

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NIARKIOS LUIZ SANTOS DE SALLES GRAÇA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE VOO NA OBTENÇÃO DE
PRODUTOS CARTOGRÁFICOS EMPREGANDO RECOBRIMENTO AÉREO COM
VANT E TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM

CURITIBA

2019



NIARKIOS LUIZ SANTOS DE SALLES GRAÇA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE VOO NA OBTENÇÃO DE
PRODUTOS CARTOGRÁFICOS EMPREGANDO RECOBRIMENTO AÉREO COM
VANT E TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

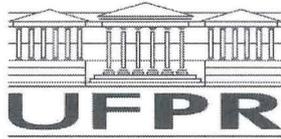
G729e Graça, Niarkios Luiz Santos de Salles
Estudo da influência da geometria de voo na obtenção de produtos cartográficos empregando recobrimento aéreo com VANT e técnica fotogramétrica SfM [recurso eletrônico] / Niarkios Luiz Santos de Salles Graça – Curitiba, 2019.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.
Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita

1. Fotogrametria. 2. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). I. Universidade Federal do Paraná. II. Mitishita, Edson A. III. Título.

CDD: 526.982

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **NIARKIOS LUIZ SANTOS DE SALLES GRAÇA** intitulada: **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE VOO NA OBTENÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS EMPREGANDO RECOBRIMENTO AÉREO COM VANT E TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

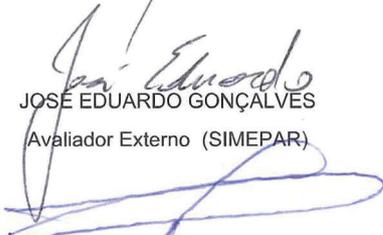
CURITIBA, 27 de Fevereiro de 2019.


EDSON APARECIDO MITISHITA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO

Avaliador Externo (UFPR)


JOSE EDUARDO GONÇALVES

Avaliador Externo (SIMEPAR)


DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

Avaliador Interno (UFPR)

A minha família dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela oportunidade da vida, suporte e incentivo.

A minha noiva Natalia (Xù), por ter dividido comigo todos os momentos ao longo desta jornada, e muitas outras que virão.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e a Universidade Federal do Paraná, pelos conhecimentos e experiências proporcionados.

À amiga e secretária do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas Mônica Verali, por toda ajuda, apoio, suporte e dedicação ao seu trabalho e aos alunos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro.

Agradeço ao professor Dr. Edson A. Mitishita que, com profundos conhecimentos e habilidades "maiêuticas", consegue conduzir seus alunos pelos caminhos tortuosos da pesquisa.

Ao amigo Edson Mitishita, por ter me proporcionado aprendizados e amadurecimento, muito além dos bancos da academia. Meu sincero muito obrigado.

Aos colegas e amigos Biffi, Felipe, José Eduardo, Leonardo Ercolin, Marlo, Pedrosa, Pierre, Wander pelo auxílio dentro e fora do ambiente acadêmico, além do companheirismo de sempre.

Aos dedicados alunos: Alex Kraemer e Luiz Bossola pelo valoroso auxílio na coleta de dados de campo.

I also would like to thank my brother J.E. Mihelic, for helping me with my English.

Thanks a lot, brother!

Agradeço ao professor e amigo Tony Vinicius M. Sampaio pelo empréstimo do equipamento que viabilizou este trabalho e por ter oportunizado a interação e produção científica com outros pesquisadores.

Não por menos, agradeço a toda ELITE: André, Bii, Cassol, Grow, Kael, Livia, Nati (Xú) e Vicky. Vocês certamente tornaram esta jornada mais agradável.

“... não é sobre o quão forte você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”

(Rocky Balboa, 2006)

RESUMO

O uso de plataformas aéreas remotamente pilotadas em aplicações de sensoriamento remoto tem sido cada vez mais frequente. Estas plataformas tem dado a muitas pessoas, a oportunidade de adquirir dados para aplicações variadas a um custo baixo em relação às plataformas tripuladas e sensores orbitais. Facilidades trazidas por novas abordagens de processamento de imagens, como o “Structure from Motion (SfM)”, tem permitido um elevado grau de automação na extração de geoinformação a partir das imagens coletadas. Todavia, a maioria dos trabalhos se concentra em discorrer sobre as aplicações da plataforma e os resultados obtidos. Quase nada é dito sobre as escolhas das geometrias de voo, ou se elas exerceram, eventualmente, influências nos produtos cartográficos gerados. Dentro do contexto exposto, este trabalho tratou de investigar a existência de influências de distintas configurações de recobrimento de voo sobre as exatidões dos produtos cartográficos gerados a partir da abordagem SfM. Em uma área de aproximadamente 39 hectares foram executados recobrimentos com altura de voo de 100 m e 200 m, tomando imagens verticais e inclinadas em faixas de voo convencionais e com direções cruzadas. A partir dos recobrimentos executados foram conduzidos experimentos que trataram de investigar as precisões e exatidões obtidas para a nuvem densa na etapa da aerotriangulação, a qualidade visual da nuvem densa quanto à reconstrução tridimensional de objetos, análises das exatidões planimétrica do Ortomosaico e altimétrica do MDT. Além disso, também são investigadas as influências da disponibilidade de pontos de apoio e os efeitos da autocalibração na exatidão da nuvem densa. Resultados apontaram que o uso de maiores sobreposições não implica necessariamente em melhores exatidões. Contudo, o uso de faixas de voo cruzadas e imagens inclinadas, independente da porcentagem de sobreposição entre fotos e faixas, contribuem de forma significativa para a obtenção de melhores exatidões.

Palavras-chave: VANT, Fotogrametria, Plano de voo, Ortomosaico, MDT.

ABSTRACT

The use of remotely piloted aircraft platforms in remote sensing has been increasingly frequent. These platforms have given many users the opportunity to acquire data for a variety of applications at a low cost in relation to manned platforms and orbital sensors. Facilities brought by new image processing approaches, such as "Structure from Motion (SfM)", have allowed a high degree of automation in the extraction of geo-information from the collected images. However, most of the published papers are focused mainly on the applications itself and the results obtained. Almost nothing is said about the choices of flight geometries, or whether they have exerted, eventually, influences at the generated cartographic products. In this context, this work investigated the existence of influences of different flight configurations (geometries), on the accuracy obtained in different cartographic products using the SfM approach. In an area of approximately 39 hectares, flights were performed with heights of 100 m and 200 m, taking vertical and tilted images ($\pm 10^\circ$) in parallel and cross strips directions. From these flights, experiments were carried out to investigate the precision and accuracy obtained for the dense cloud, in the aerotriangulation stage, the visual quality of the dense cloud in terms of the tridimensional object reconstruction was checked, Orthomosaic planimetric accuracy and height accuracy of the DTM. In addition, the influences of the ground control point availability and the effects of self-calibration (in situ camera calibration) on the accuracy of the dense cloud were also investigated. Results showed that the use of greater overlaps does not necessarily imply better accuracy. However, the use of cross-flight strips and tilted images, regardless of the overlap percentage between photos and strips, significantly contribute to achieving better accuracies.

Keywords: UAV, Photogrammetry, Flight Plan, Ortomosaic, DTM.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| FIGURA 1- Princípio da colinearidade..... | 38 |
| FIGURA 2- Direções das faixas de voo..... | 53 |
| FIGURA 3 - Recobrimento longitudinal e lateral | 54 |
| FIGURA 4 - Condição mínima de apoio para um modelo fotogramétrico. | 57 |
| FIGURA 5 - Distribuição de pontos de controle em um bloco fotogramétrico. | 58 |
| FIGURA 6 - Esquema de um alvo e suas proporções em relação ao GSD. | 59 |
| FIGURA 7 - Área de estudo. | 61 |
| FIGURA 8 - DJI Phantom 3 Pro. | 63 |
| FIGURA 9 - Voo a 100 m, câmera na posição vertical. (a) Sobreposição longitudinal de 60% e Lateral de 59%; (b) Sobreposição longitudinal de 80% e Lateral de 75%. | 64 |
| FIGURA 10 - Voo a 100 m, câmera na posição inclinada. Ambos (a) e (b) com sobreposição longitudinal de 80% e Lateral de 75%. | 65 |
| FIGURA 11 - Voo a 200 m, câmera na posição vertical. Ambos (a) e (b) com sobreposição longitudinal de 65% e Lateral de 63%. | 65 |
| FIGURA 12 - Disposição dos apoios de campo RTK. | 68 |
| FIGURA 13- Distribuição dos pontos de controle para o experimento..... | 77 |
| FIGURA 14- Distribuição dos pontos de controle e verificação na Fase 1..... | 79 |
| FIGURA 15- Pontos de Verificação disponíveis na Fase 2, verificação dos ortomosaicos e MDT. | 80 |
| FIGURA 16 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Vertical (RLO 60% e RLA 75%). | 87 |
| FIGURA 17 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Vertical (RLO 80% e RLA 75%). | 96 |
| FIGURA 18 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Vertical, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 75%). | 105 |
| FIGURA 19 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Inclinado (RLO 80% e RLA 75%). | 115 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 20 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Inclinado (RLO 60% e RLA 75%). | 124 |
| FIGURA 21 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m, Inclinado, faixas cruzadas (RLO 80% e RLA 75%). | 133 |
| FIGURA 22 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m, inclinado, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 75%). | 142 |
| FIGURA 23 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%). | 151 |
| FIGURA 24 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%). | 160 |
| FIGURA 25 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 200 m Vertical (RLO 60% e RLA 60%). | 170 |
| FIGURA 26 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 200 m Vertical, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 60%). | 179 |
| FIGURA 27 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m e 200 m, fotos verticais, (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%). | 189 |
| FIGURA 28 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m e 200 m, fotos verticais e inclinadas, (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%). | 198 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO 1- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. RLO 60% e RLA 75%..... | 86 |
| GRÁFICO 2- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. RLO 60% e RLA | 88 |
| GRÁFICO 3- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%. | 90 |
| GRÁFICO 4- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 75%..... | 91 |
| GRÁFICO 5- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 60% e RLA 75%..... | 92 |
| GRÁFICO 6- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação RLO 80% e RLA 75%..... | 94 |
| GRÁFICO 7- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. RLO 80% e RLA 75%..... | 95 |
| GRÁFICO 8- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. RLO 80% e RLA 75%. | 97 |
| GRÁFICO 9- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%. | 99 |
| GRÁFICO 10- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 80% e RLA 75%..... | 100 |
| GRÁFICO 11- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 80% e RLA 75%. | 101 |
| GRÁFICO 12- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 104 |
| GRÁFICO 13- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 104 |
| GRÁFICO 14- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 106 |
| GRÁFICO 15- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 108 |
| GRÁFICO 16- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 109 |

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO 17- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 110 |
| GRÁFICO 18- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%..... | 113 |
| GRÁFICO 19- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%..... | 113 |
| GRÁFICO 20- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, Inclinado, RLO 80% e RLA 75%. | 116 |
| GRÁFICO 21- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos Inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 118 |
| GRÁFICO 22- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%..... | 119 |
| GRÁFICO 23- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%. | 120 |
| GRÁFICO 24- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%..... | 122 |
| GRÁFICO 25- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%..... | 123 |
| GRÁFICO 26- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, Inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 125 |
| GRÁFICO 27- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 126 |
| GRÁFICO 28- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%..... | 128 |
| GRÁFICO 29- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 128 |
| GRÁFICO 30- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 131 |
| GRÁFICO 31- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 131 |
| GRÁFICO 32- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 134 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 33- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%. | 136 |
| GRÁFICO 34- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, fotos inclinadas RLO 80% e RLA 75%. | 137 |
| GRÁFICO 35- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 138 |
| GRÁFICO 36- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 140 |
| GRÁFICO 37- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 141 |
| GRÁFICO 38- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 143 |
| GRÁFICO 39- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 145 |
| GRÁFICO 40- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%..... | 146 |
| GRÁFICO 41- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 147 |
| GRÁFICO 42- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 150 |
| GRÁFICO 43- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 150 |
| GRÁFICO 44- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 153 |
| GRÁFICO 45- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 154 |
| GRÁFICO 46- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 155 |
| GRÁFICO 47- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 156 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 48- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 159 |
| GRÁFICO 49- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 159 |
| GRÁFICO 50- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 162 |
| GRÁFICO 51- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 163 |
| GRÁFICO 52- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 165 |
| GRÁFICO 53- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 166 |
| GRÁFICO 54- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%. | 169 |
| GRÁFICO 55- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%. | 169 |
| GRÁFICO 56- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%. | 172 |
| GRÁFICO 57- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%. | 173 |
| GRÁFICO 58- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%. | 174 |
| GRÁFICO 59- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 60% e RLA 60%. | 175 |
| GRÁFICO 60- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 178 |
| GRÁFICO 61- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 178 |
| GRÁFICO 62- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%. | 181 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 63- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%..... | 182 |
| GRÁFICO 64- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%..... | 183 |
| GRÁFICO 65- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 60% e RLA 60%. | 184 |
| GRÁFICO 66- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 187 |
| GRÁFICO 67- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 188 |
| GRÁFICO 68- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 190 |
| GRÁFICO 69- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 192 |
| GRÁFICO 70- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 193 |
| GRÁFICO 71- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 194 |
| GRÁFICO 72- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 197 |
| GRÁFICO 73- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 197 |
| GRÁFICO 74- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 200 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 75- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 201 |
| GRÁFICO 76- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%..... | 203 |
| GRÁFICO 77- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 203 |
| GRÁFICO 78 – Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%..... | 207 |
| GRÁFICO 79 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%..... | 208 |
| GRÁFICO 80 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%..... | 209 |
| GRÁFICO 81 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%..... | 210 |
| GRÁFICO 82 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 200 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%..... | 211 |
| GRÁFICO 83 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 200 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%..... | 212 |
| GRÁFICO 84 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%. | 213 |
| GRÁFICO 85 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%. | 214 |
| GRÁFICO 86 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%. | 215 |

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO 87 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%. | 215 |
| GRÁFICO 88 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação default. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%. | 219 |
| GRÁFICO 89 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação 9. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%. | 219 |
| GRÁFICO 90 – Dispersão das discrepâncias altimetrias. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%. | 220 |
| GRÁFICO 91 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação default. Experimento Voo a 100 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 75%. | 222 |
| GRÁFICO 92 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação 9. Experimento Voo a 100 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 75%. | 223 |
| GRÁFICO 93 – Dispersão das discrepâncias altimetrias. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%. | 224 |
| GRÁFICO 94 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação <i>default</i> . Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%. | 226 |
| GRÁFICO 95 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação 9. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%. | 226 |
| GRÁFICO 96 – Dispersão das discrepâncias altimetrias. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%. | 228 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| QUADRO 1 - Parâmetros do <i>Workflow</i> de processamento no <i>Agisoft PhotoScan</i> ® .. | 71 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1- Parâmetros de voo. | 66 |
| TABELA 2 – Planos de voo efetivamente executados..... | 81 |
| TABELA 3- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%..... | 83 |
| TABELA 4- Resumo dos resíduos. Experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%..... | 84 |
| TABELA 5- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%..... | 85 |
| TABELA 6- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, RLO 60% e RLA 75%. | 88 |
| TABELA 7- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%..... | 89 |
| TABELA 8- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 75%. | 91 |
| TABELA 9- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%..... | 92 |
| TABELA 10- Resumo dos resíduos. Experimento fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%..... | 93 |
| TABELA 11- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%..... | 94 |
| TABELA 12- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, RLO 80% e RLA 75%. | 97 |
| TABELA 13- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%..... | 98 |
| TABELA 14- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 80% e RLA 75%. | 100 |
| TABELA 15- POI determinado na autocalibração no experimento faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%. | 102 |
| TABELA 16- Resumo dos resíduos. Experimento faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%. | 102 |
| TABELA 17- Resumo das discrepâncias. Experimento faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 18- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 106 |
| TABELA 19- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 107 |
| TABELA 20- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 109 |
| TABELA 21- POI determinado na autocalibração no experimento, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 111 |
| TABELA 22- Resumo dos resíduos. Experimento fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 112 |
| TABELA 23- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 112 |
| TABELA 24- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Imagens inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 116 |
| TABELA 25- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos Inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 117 |
| TABELA 26- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%. | 119 |
| TABELA 27- POI determinado na autocalibração no experimento, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 121 |
| TABELA 28- Resumo dos resíduos. Experimento fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 121 |
| TABELA 29- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 122 |
| TABELA 30- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 125 |
| TABELA 31- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 126 |
| TABELA 32- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 127 |
| TABELA 33- POI determinado na autocalibração no experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 129 |
| TABELA 34- Resumo dos resíduos. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 130 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 35- Resumo das discrepâncias. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 130 |
| TABELA 36- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 134 |
| TABELA 37- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%. | 135 |
| TABELA 38- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 137 |
| TABELA 39- POI determinados na autocalibração no experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 139 |
| TABELA 40- Resumo dos resíduos. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 139 |
| TABELA 41- Resumo das discrepâncias. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 140 |
| TABELA 42- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 143 |
| TABELA 43- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 144 |
| TABELA 44- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%. | 146 |
| TABELA 45- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos verticais e inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75%..... | 148 |
| TABELA 46- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 148 |
| TABELA 47- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 149 |
| TABELA 48- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 152 |
| TABELA 49- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 154 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 50- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 155 |
| TABELA 51- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos verticais e inclinadas a 100 m, RLO 80% e RLA 75%..... | 157 |
| TABELA 52- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 157 |
| TABELA 53- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 158 |
| TABELA 54- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%..... | 161 |
| TABELA 55- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 163 |
| TABELA 56- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 164 |
| TABELA 57- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%..... | 167 |
| TABELA 58- Resumo dos resíduos. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%..... | 167 |
| TABELA 59- Resumo das discrepâncias. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%..... | 168 |
| TABELA 60- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%..... | 171 |
| TABELA 61- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%..... | 172 |
| TABELA 62- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%. | 174 |
| TABELA 63- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 176 |
| TABELA 64- Resumo dos resíduos. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 176 |

| | |
|--|-----|
| TABELA 65 - Resumo das discrepâncias. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 177 |
| TABELA 66- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas RLO 60% e RLA 60%. | 180 |
| TABELA 67- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%. | 182 |
| TABELA 68- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%. | 183 |
| TABELA 69- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 185 |
| TABELA 70- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 186 |
| TABELA 71- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 186 |
| TABELA 72- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 190 |
| TABELA 73- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 191 |
| TABELA 74- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 193 |
| TABELA 75- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 195 |
| TABELA 76- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 195 |
| TABELA 77- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 196 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 78- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 199 |
| TABELA 79- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 201 |
| TABELA 80- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. | 202 |
| TABELA 81 - Valores de EQM para as combinações de POI. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%. | 217 |
| TABELA 82 - Valores de EQM para as combinações de POI. Experimento Voo a 100 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 75%. | 221 |
| TABELA 83 - Valores de EQM para as combinações de POI. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%. | 225 |

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

| | |
|---------|---|
| 2D | -Duas dimensões (xy) |
| 3D | -Três dimensões (xyz) |
| CMOS | - <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> |
| CP | -Centro Perspectivo |
| EQM | -Erro Quadrático Médio (EQMs - plural) |
| ET-CQDG | -Especificação Técnica Para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais |
| GNSS | - <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| GPS | - <i>Global Positioning System</i> |
| GSD | - <i>Ground Sample Distance</i> |
| LIDAR | - <i>Light Detection and Ranging</i> |
| MDE | -Modelos Digitais de Elevação |
| MDT | -Modelo Digital de Terreno (MDTs-plural) |
| POE | -Parâmetros de Orientação Exterior |
| POI | -Parâmetros de Orientação Interior |
| RAPS | -Remotely Piloted Aircraft Systems |
| RLA | -Recobrimento Lateral |
| RLO | -Recobrimento Longitudinal |
| RMS | - <i>Root Mean Square error</i> |
| RTK | - <i>Real Time Kinematic</i> |
| SFM | - <i>Structure from Motion</i> |
| SIFT | - <i>Scale Invariant Feature Transform</i> |
| SW | -Shapiro Wilk |
| UAV | - <i>Unmanned Aircraft Vehicle</i> |
| VANT | -Veículos Aéreos Não Tripulados |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 32 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 36 |
| 1.1.1 Objetivos específicos | 36 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 36 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 37 |
| 2.1 FOTOGRAMETRIA CLASSICA | 37 |
| 2.1.1 Calibração de câmeras | 39 |
| 2.1.2 Bundle adjustment | 42 |
| 2.2 DETECÇÃO E CORRESPONDÊNCIA DE PONTOS..... | 47 |
| 2.3 STRUCTURE FROM MOTION- SFM..... | 48 |
| 2.4 PLANO DE VOO | 51 |
| 2.4.1 Especificações da Câmera..... | 51 |
| 2.4.2 Ground Sample Distance – GSD..... | 51 |
| 2.4.3 Direção de voo..... | 53 |
| 2.4.4 Recobrimento longitudinal (RLO) e lateral (RLA)..... | 53 |
| 2.4.5 Cálculos de um plano de voo | 55 |
| 2.4.6 Pontos de apoio | 56 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 60 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO | 60 |
| 3.2 MATERIAIS..... | 61 |
| 3.2.1 Recursos de Software | 62 |
| 3.2.2 Recursos de Hardware..... | 62 |
| 3.3 METODOLOGIA | 63 |
| 3.3.1 Recobrimentos aéreos | 64 |
| 3.3.2 Apoio de campo (GNSS e MDT LIDAR)..... | 66 |
| 3.3.3 Geração da Nuvem de Pontos, MDT e Ortofotos (Fase 1). | 68 |
| 3.3.4 Métricas e Estatísticas | 71 |
| 3.3.5 Verificações e Análises (Fase 2) | 73 |
| 3.3.5.1 Relatórios de processamento | 73 |
| 3.3.5.2 Ortomosaico e MDT | 73 |
| 3.3.6 Estudo da influência da disponibilidade de pontos de apoio na exatidão da nuvem de pontos. | 76 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.7 Estudo dos efeitos da autocalibração na geração da nuvem de pontos. | 77 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 78 |
| 4.1 SELEÇÃO DOS APOIOS DE CAMPO | 79 |
| 4.2 RECOBRIMENTOS EXECUTADOS | 80 |
| 4.3 ESTUDO DOS RECOBRIMENTOS | 82 |
| 4.3.1 Aerolevanteamento a 100 m com fotos verticais. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%. | 83 |
| 4.3.1.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos verticais RLO 60% e RLA 75%. | 84 |
| 4.3.1.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%. | 87 |
| 4.3.1.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 75% | 89 |
| 4.3.1.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR) | 90 |
| 4.3.2 Aerolevanteamento a 100 m com fotos verticais. Recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%. | 92 |
| 4.3.2.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%. | 93 |
| 4.3.2.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%. | 96 |
| 4.3.2.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75% | 98 |
| 4.3.2.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75% com MDT (LIDAR) | 99 |
| 4.3.3 Aerolevanteamento a 100 m com fotos verticais, faixas cruzadas. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%. | 101 |
| 4.3.3.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m – faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%. | 102 |
| 4.3.3.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos verticais faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 105 |
| 4.3.3.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 107 |
| 4.3.3.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR). | 108 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.4 Aerolevantamento a 100 m com fotos Inclínadas. Recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%. | 110 |
| 4.3.4.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 111 |
| 4.3.4.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 115 |
| 4.3.4.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos Inclínadas, RLO 80% e RLA 75%. | 117 |
| 4.3.4.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos Inclínadas, RLO 80% e RLA 75% com MDT (LIDAR). | 118 |
| 4.3.5 Aerolevantamento a 100 m com fotos Inclínadas. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%. | 120 |
| 4.3.5.1.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 121 |
| 4.3.5.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 124 |
| 4.3.5.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos Inclínadas, RLO 60% e RLA 75%. | 126 |
| 4.3.5.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos Inclínadas, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR). | 127 |
| 4.3.6 Aerolevantamento a 100 m com fotos inclinadas, faixas cruzadas. Recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%. | 129 |
| 4.3.6.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m – faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. | 129 |
| 4.3.6.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%. | 133 |
| 4.3.6.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%. | 135 |
| 4.3.6.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75% com MDT (LIDAR). | 136 |
| 4.3.7 Aerolevantamento a 100 m com fotos inclinadas, faixas cruzadas. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%. | 138 |
| 4.3.7.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m – faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%. | 139 |
| 4.3.7.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. | 142 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4.3.7.3 | Análise do MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%..... | 144 |
| 4.3.7.4 | Comparativo MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR)..... | 145 |
| 4.3.8 | Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos verticais (RLO 60% e 75% RLA) + bloco a 100 m com fotos inclinadas (RLO 60% e 75% RLA). | 147 |
| 4.3.8.1 | Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%)..... | 148 |
| 4.3.8.2 | Análise do Ortomosaico - Bloco composto- a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%). | 152 |
| 4.3.8.3 | Análise do MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%). | 153 |
| 4.3.8.4 | Comparativo MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%) com MDT (LIDAR). | 154 |
| 4.3.9 | Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos verticais (RLO 80% e 75% RLA) + bloco a 100 m com fotos inclinadas (RLO 80% e 75% RLA). | 156 |
| 4.3.9.1 | Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%)..... | 157 |
| 4.3.9.2 | Análise do Ortomosaico - Bloco composto- a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%). | 161 |
| 4.3.9.3 | Análise do MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%). | 162 |
| 4.3.9.4 | Comparativo MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%) com MDT (LIDAR). | 164 |
| 4.3.10 | Aerolevantamento a 200 m com fotos verticais. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%. | 166 |
| 4.3.10.1 | Análise da nuvem densa de pontos - voo 200 m - fotos verticais RLO 60% e RLA 60%..... | 167 |
| 4.3.10.2 | Análise do Ortomosaico - voo 200 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%. | 171 |
| 4.3.10.3 | Análise do MDT - voo 200 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 60% ... | 172 |
| 4.3.10.4 | Comparativo MDT - voo 200 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 60% com MDT (LIDAR)..... | 173 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.11 Aerolevantamento a 200 m com fotos verticais, faixas cruzadas. | |
| Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%. | 175 |
| 4.3.11.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 176 |
| 4.3.11.2 Análise do Ortomosaico - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%. | 180 |
| 4.3.11.3 Análise do MDT - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%..... | 181 |
| 4.3.11.4 Comparativo MDT - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60% com MDT (LIDAR)..... | 182 |
| 4.3.12 Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos verticais (RLO 80% e 75% RLA) + bloco a 200 m com fotos verticais (RLO 60% e 60% RLA)..... | 184 |
| 4.3.12.1 Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%). | 185 |
| 4.3.12.2 Análise do Ortomosaico - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%). | 189 |
| 4.3.12.3 Análise do MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA60%). | 191 |
| 4.3.12.4 Comparativo MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%) com MDT (LIDAR). | 192 |
| 4.3.13 Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos inclinadas (RLO 60% e 75% RLA) + bloco a 200 m com fotos verticais (RLO 60% e 60% RLA)..... | 194 |
| 4.3.13.1 Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos inclinadas com RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais com RLO 60% e RLA 60%. | 195 |
| 4.3.13.2 Análise do Ortomosaico - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos inclinadas com RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais com RLO 60% e RLA 60%. | 198 |
| 4.3.13.3 Análise do MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos inclinadas com RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais com RLO 60% e RLA60%. | 200 |
| 4.3.13.4 Comparativo MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais + inclinadas - (RLO 60% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%) com MDT (LIDAR). .. | 202 |
| 4.3.14 Considerações gerais sobre os experimentos | 204 |

| | |
|---|------------|
| 4.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISPONIBILIDADE DE PONTOS DE APOIO NA EXATIDÃO DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA POR TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM. | 206 |
| 4.5 ESTUDO DOS EFEITOS DA AUTOCALIBRAÇÃO NA GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA POR TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM..... | 217 |
| 4.6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 231 |
| REFERÊNCIAS | 232 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Everaerts (2008), discussões envolvendo o emprego de *Unmanned Aircraft Vehicle* – UAV (Veículos Aéreos Não Tripulados - VANT¹ em tradução livre) ou ainda Remotely Piloted Aircraft Systems - RAPS, como plataformas aéreas de sensoriamento remoto, têm sido cada vez mais frequentes. Essas plataformas têm dado a muitos grupos de pesquisa a oportunidade de adquirir imagens a um custo baixo, justificando plenamente o seu uso nas Ciências Geodésicas ou Cartográficas. Segundo o autor, estas plataformas podem captar novos usuários e ampliar possibilidades de aplicações, principalmente à medida que houver adequada regulamentação do espaço aéreo para aceitá-los nas atividades de aerolevanteamento.

Eisenbeiss (2009) descreve o potencial de tal plataforma na Fotogrametria e estabelece o termo “*UAV Photogrammetry*”. O autor descreve plataformas e o fluxo de trabalho para o processamento das imagens. Através de experimentos aplicados a Arqueologia e ao Meio Ambiente, o autor comprova a eficiência do uso da nova plataforma como meio de coleta de dados fotogramétricos.

Colomina e Molina (2014) realizaram uma revisão do estado da arte e do uso dessas plataformas em aplicações de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. Nesta revisão é salientada a utilização de instrumentos de fácil obtenção “*off the shelf*”, que, associados a conhecimentos da Visão Computacional e da Geomática, têm permitido a geração semiautomática de informações espaciais, com qualidade posicional planialtimétrica na ordem do centímetro. É possível encontrar textos científicos citando o uso dessas plataformas nas mais variadas áreas do conhecimento e aplicações. A seguir são listados alguns exemplos:

No Meio Ambiente, Iarocci *et al.* (2014) fizeram uso de uma plataforma aérea para coletar em um vulcão, amostras de lama, gases, fotografias aéreas, vídeos e medidas de temperatura. Já Coveney e Roberts (2017), investigaram as precisões de modelos de elevação e ortofotos, derivadas de levantamentos com plataformas VANT, bem como discutiram a aplicabilidade em estudos de previsão de inundações. Ezequiel *et al.* (2014) demonstram várias aplicações de imagens aéreas obtidas a partir de VANT de baixo custo, no âmbito de avaliações e recuperação

¹ Neste trabalho será empregado o termo VANT para designar a plataforma aérea.

pós-desastre, gerenciamento ambiental e desenvolvimento de infraestrutura nas Filipinas.

Na Agricultura, Rokhmana (2015) demonstra o potencial da plataforma em aplicações agrícolas objetivando melhorar estimativas de produção. Já Rizky, Liyantono e Solahudin (2015), empregaram imagens VANT para avaliar a fertilidade de plantas de arroz através de análises de refletância.

Na Arqueologia e Arquitetura, Holness *et al.* (2016) conduziram experimentos para verificar o potencial de uma plataforma VANT, no intuito de subsidiar a coleta de dados em pesquisas arqueológicas. Os autores puderam não só comprovar o potencial da plataforma como também conseguiram detectar feições anteriormente imperceptíveis. Fryskowska *et al.* (2017), propuseram uma metodologia que, a partir de levantamentos VANT e dados LIDAR, permitisse inferir sobre sítios arqueológicos. Há ainda esforços de integração de dados VANT e realidade aumentada, objetivando facilitar a interpretação e visualização de sítios arqueológicos e arquitetônicos (BOTRUGNO; D'ERRICO; PAOLIS, 2017).

Na área Florestal, Hassaan *et al.* (2016) conduziram um estudo para comprovar uma metodologia capaz de detectar e quantificar árvores em ambiente urbano, a partir de imagens derivadas de VANT. Os autores ressaltam que tal metodologia pode contribuir com estimativas de ganhos e perdas florestais nesse ambiente. Já Senthilnath *et al.* (2017) testaram duas plataformas VANT distintas com o objetivo de verificar o desempenho de uma nova metodologia de classificação de imagens. Puliti *et al.* (2018) conduziram experimentos misturando dados de levantamento VANT e de satélite, objetivando inferir estimativas de volume em florestas e inventário florestal.

Na revisão feita por Colomina e Molina (2014), já se evidenciava o potencial da plataforma e o caminho que a tecnologia tomaria no decorrer dos tempos. No mesmo trabalho, os autores comentaram que dada à dinâmica de voo e características da plataforma, os blocos de imagens gerados apresentam irregularidades geométricas. Tais irregularidades acabam por dificultar o processamento convencional da fototriangulação, devido a isso, metodologias alternativas têm sido adotadas para a obtenção direta da geoinformação. Uma abordagem amplamente adotada é a “*Structure from Motion (SfM)*”, advinda da Visão Computacional, que permite a reconstrução 3D de cenas, a partir de uma série

de imagens tomadas de múltiplas posições no espaço (WESTOBY *et al.*, 2012;SCHONBERGER; FRAHM, 2016)

O uso de plataformas VANT na Fotogrametria não tem por objetivo substituir o emprego de aeronaves tradicionais em levantamento de grandes regiões. Entretanto, estas plataformas oferecem facilidades operacionais, redução de custos e maior resolução espacial das imagens, características que não podem ser negligenciadas em projetos cartográficos e de engenharia em pequenas áreas. Neste contexto e diante de uma aplicação prática, é importante saber qual a melhor forma de executar um aerolevanteamento e ser capaz de, dentro das limitações do método, obter as melhores exatidões para os produtos cartográficos desejados.

Os principais produtos cartográficos derivados de levantamento a partir de plataformas VANT, são Ortomosaicos e Modelos Digitais de Elevação (MDE), além é claro, de Nuvens de Pontos. Todavia, a maioria dos trabalhos se concentra em discorrer sobre as aplicações da plataforma e os resultados obtidos. Quase nada é dito sobre as escolhas das geometrias de voo, ou se elas exerceram, eventualmente, influências nos produtos cartográficos gerados. O termo “Geometria de voo”, neste trabalho, é tratado como o conjunto de parâmetros que caracterizam um bloco de imagens (taxas de sobreposição entre fotos, faixas, altitude do voo, faixas paralelas ou cruzadas, e inclinação da câmera). Apesar do número reduzido de estudos realizados, esta temática tem sido investigada ao redor do mundo. Durante a pesquisa bibliográfica do presente estudo, foi possível identificar alguns trabalhos correlatos a esta temática:

Gerke e Przybilla (2016), valendo-se de plataformas com asa fixa (com e sem RTK), discutem sobre os efeitos em um “*Bundle Adjustment*” quanto ao uso de faixas de voo cruzada em altitude de voo distintas (105 m e 75 m), quanto a disponibilidade e distribuição de pontos de controle e o impacto dessas diferentes configurações tem na auto-calibração da câmera. Os autores entretanto consideraram apenas uma única configuração de recobrimentos longitudinal e lateral (85% – 65% respectivamente) e tão pouco deixam claros os cenários de distribuição dos pontos de controle e verificação. Dentre as conclusões feitas, os autores salientam que a topografia do terreno e o uso de faixas de voo cruzadas interferem no resultado da autocalibração o que por sua vez influencia nos resultados do ajustamento. Quanto à disponibilidade de pontos de apoio, há uma tendência que um maior número compense efeitos de distorção do bloco, mas até certo ponto

apenas. No estudo, todavia os autores consideram uma única configuração de sobreposição longitudinal e lateral e não discutem os efeitos em produtos cartográficos derivados do recobrimento.

Nasrullah (2016) conduziu um extenso estudo sobre as influências do uso de diferentes câmeras, a qualidade das posições iniciais das imagens (georreferenciamento direto), o número e distribuição dos pontos de controle no terreno, altitudes de voo, distúrbios de desfoque nas imagens, diferentes sobreposições entre imagens e faixas de voo, diferentes inclinações de câmera e disposição de faixas de voo. Em uma área de aproximadamente seis hectares, o autor concluiu que, em se tratando de aerotriangulação, os fatores que mais afetam a deformação do bloco fotogramétrico são: a quantidade de pontos de controle usados no ajustamento; a forma que eles são distribuídos na área; e a qualidade das posições iniciais das imagens. Todavia, nada foi discutido sobre a geração de produtos cartográficos tais como o Ortomosaico ou Modelo de Elevação.

Nesta temática, ainda no mesmo ano, Carrascosa *et al.* (2016) avaliou a qualidade posicional de ortomosaicos mediante os seguintes parâmetros: variação de altitude de voo (30, 40, 50, 60, 70 e 80 m); configuração de recobrimentos longitudinal e lateral (80% – 50% e 70% – 40%); pontos de apoio (com ou sem). Tomando fotos verticais, de um sítio arqueológico com área de aproximadamente 1 hectare, os autores apontaram que, diferente do autor citado previamente, a altitude foi o parâmetro que mais contribuiu nos resultados obtidos. Entretanto, o uso de faixas de voo cruzadas ou de imagens inclinadas não foi considerado no estudo.

Em contrapartida, há uma maior ocorrência de publicações envolvendo exclusivamente a modelagem de superfícies, como em: (ROCK; RIES; UDELHOVEN, 2011), (NOCERINO *et al.*, 2013), (TAHAR, 2015) e (GINDRAUX; BOESCH; FARINOTTI, 2017). Uma conclusão comum nestes estudos é que a altitude de voo foi a variável que mais contribui com a variação das exatidões dos modelos de elevação gerados. Além disso, alguns autores citaram também a influência da quantidade de pontos de controle e a forma com que eles se encontram distribuídos na área de estudo.

Diante da temática citada percebeu-se a existência de aspectos comuns na literatura analisada: a maioria dos trabalhos discute resultados de voos a uma altitude média máxima de 100 m, as áreas de estudo são em média inferiores a 10 hectares e nenhuma das publicações discorre de maneira sequenciada partindo do

“*Bundle Adjustment*” até a geração do Ortomosaico, de modo a permitir uma compreensão da propagação dos erros. Dentro deste contexto de aquisição de imagens a partir de uma plataforma VANT, e diante da metodologia de processamento SFM, têm-se como hipótese de pesquisa, que a partir de alturas de voo de 100 m e 200 m a adoção de uma determinada geometria de voo influencia as exatidões obtidas.

1.1 OBJETIVO GERAL

A partir de um recobrimento aéreo VANT, verificar sob o escopo da técnica fotogramétrica SFM, a influência de distintas geometrias de voo no desempenho das exatidões de produtos cartográficos.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Verificar se as exatidões planimétricas e altimétricas alcançadas na geração da Nuvem de Pontos, MDT e Ortomosaico;
- b) Verificar a influência do número e distribuição de pontos de controle nas exatidões planimétricas e altimétricas da Nuvem de Pontos empregando diferentes configurações de voo;
- c) Verificar a influência da escolha dos parâmetros de orientação interior da câmera nas exatidões planimétricas e altimétricas da Nuvem de Pontos empregando diferentes configurações de voo;

1.2 JUSTIFICATIVA

A popularização das plataformas VANT e a capacidade de realização autônoma de voos, juntamente com as facilidades de processamento de imagens, têm captado usuários das mais diversas áreas, muitos dos quais não possuem conhecimentos fundamentais de Fotogrametria. Desta forma, não é difícil encontrar resultados de aplicações fotogramétricas para a geração de Nuvem de Pontos, Ortomosaico e MDT, fundamentadas somente nos aspectos tradicionais do recobrimento fotogramétrico, pontos de controle e configurações básicas (“*default*”)

dos programas computacionais de processamento. Com o advento de novas plataformas e metodologias de processamento, poucos estudos são encontrados discutindo de forma integrada a temática citada (Aero triangulação, MDT, Ortomosaico). No contexto das novas metodologias de processamento, a utilização de recobrimentos semelhantes aos utilizados na Fotogrametria clássica (60% e 30%, recobrimento longitudinal lateral respectivamente), objetivando reduzir o número de imagens e o esforço computacional necessário no processamento, ainda apresenta viabilidade técnica? Justifica-se, portanto, a relevância do estudo sobre a influência da geometria de voo na geração de produtos cartográficos derivados de um levantamento VANT. Objetiva-se com isso, tornar claro se existe, eventualmente, alguma condição de voo ideal que maximize a qualidade métrica dos produtos cartográficos finais ou que garanta a melhor exatidão possível para um determinado produto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FOTOGRAMETRIA CLASSICA

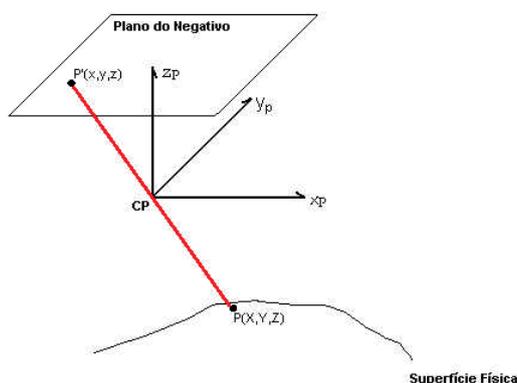
O “*Manual of Photogrammetry*” editado pela a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto- ASPRS traz a seguinte definição de Fotogrametria:

“[...] a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o ambiente através do processo de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia radiante eletromagnética e outros fenômenos fotográficos”. (ASPRS, 2004, tradução nossa).

Inicialmente a Fotogrametria se desenvolveu através do emprego de instrumental ótico mecânico (Fotogrametria Analógica) que, segundo Andrade (2003), foi desenvolvido até o limite do potencial. Posteriormente, com o avanço computacional, foi possível o desenvolvimento e implementação de modelos matemáticos e cálculos em ambiente digital (Fotogrametria Analítica), permitindo a mitigação de condições limitadas outrora pelo instrumental existente. A Fotogrametria esta respaldada em um principio básico conhecido como: Condição de Colinearidade.

Essa condição presume que a luz propaga-se de forma linear no espaço entre a câmara (espaço imagem, no plano do negativo) e o objeto fotografado (espaço objeto, na superfície física) conforme FIGURA 1.

FIGURA 1- Princípio da colinearidade.



Fonte: O autor (2019)

Na FIGURA 1, o espaço imagem é representado pelo ponto “P'(X, Y, Z)”. Enquanto que o espaço objeto é representado pelo ponto “P (X, Y, Z)”. Ambos interligados por um segmento de reta que contém o Centro Perspectivo (CP). Para estabelecer uma forma de relacionar um espaço ao outro emprega-se o modelo matemático conhecido como as Equações de Colinearidade:

$$x_i = -f \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{12}(Y_i - Y_0) + r_{13}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (1)$$

$$y_i = -f \frac{r_{21}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{23}(Z_i - Z_0)}{r_{31}(X_i - X_0) + r_{32}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)} \quad (2)$$

Onde:

- f – distância focal;
- X_i, Y_i e Z_i - são coordenadas no espaço objeto para um dado ponto i ;
- X_0, Y_0 e Z_0 - são coordenadas do centro perspectivo;
- x_i, y_i - são coordenadas fotogramétricas para o ponto i ;

r_{11} à r_{33} - são elementos da matriz de rotação

A matriz de rotação definida pelos elementos r_{11} à r_{33} é construída a partir dos ângulos de orientação do sensor no instante da tomada da imagem. Também são denominados de ângulos de Euler (ω , φ e κ). A equação (3) apresenta a matriz de rotação geral, composta pelas rotações nos três eixos coordenados e os seus coeficientes em função dos ângulos de Euler. Maiores informações podem ser obtidas em (ANDRADE, 2003) e (LUGNANI, 1987).

$$R = R_Z(\kappa)R_Y(\varphi)R_X(\omega) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

$$r_{11} = \cos \varphi \cos \kappa$$

$$r_{21} = \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa$$

$$r_{31} = -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa$$

$$r_{12} = -\cos \varphi \sin \kappa$$

$$r_{22} = -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa$$

$$r_{32} = \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa$$

$$r_{13} = \sin \varphi$$

$$r_{23} = -\sin \omega \cos \varphi$$

$$r_{33} = \cos \omega \cos \varphi$$

2.1.1 Calibração de câmeras

A capacidade de reconstrução do feixe de luz, no instante em que a imagem é tomada, é condição fundamental para a extração de informações métricas com técnicas fotogramétricas. Contudo, na prática, a condição de colinearidade não é plenamente atendida devido a uma série de erros sistemáticos que envolvem desde o trabalho do filme (no caso das câmeras analógicas), até efeitos de distorção provocados pelo sistema de lentes. A determinação destes erros sistemáticos inerentes à câmera é denominado de Calibração. No processo de calibração são determinados parâmetros tais como: distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0) e os coeficientes que modelam as distorções das lentes. Esses

parâmetros mencionados também são conhecidos como Parâmetros de Orientação Interior- POI.

O conjunto de todos os desvios sofridos pelo raio luminoso ao atravessar um sistema de lentes é parametrizado geralmente em dois grupos: Distorção Radial Simétrica e Distorção Descentrada.

A distorção Radial Simétrica pode ser definida como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio, ao atravessar uma lente. As equações (4) e (5) mostram essas correções:

$$\delta_{RSx} = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)x \quad (4)$$

$$\delta_{RSy} = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)y \quad (5)$$

Onde:

δ_{RSx} e δ_{RSy} – valores da distorção radial simétrica;

k_1 , k_2 e k_3 – parâmetros da distorção radial simétrica;

r – é dado pela raiz quadrada do quadrado da soma das componentes x e y

x e y – coordenadas (em milímetros) no referencial fotogramétrico.

O efeito da distorção descentrada é proveniente da incapacidade humana em alinhar perfeitamente os eixos óticos de um sistema de lentes que compõe uma objetiva. Esta distorção é constituída de uma componente tangencial e radial assimétrica. As correções para essa distorção são obtidas a partir das equações (6) e (7):

$$\delta_{Dx} = P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \quad (6)$$

$$\delta_{Dy} = 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2) \quad (7)$$

Onde:

δ_{Dx} e δ_{Dy} – valores da distorção descentrada;

P_1 , e P_2 – parâmetros da distorção descentrada;

r – é dado pela raiz quadrada do quadrado da soma das componentes x e y

x e y – coordenadas (em milímetros) no referencial fotogramétrico.

Outra fonte de erro, por assim dizer, é a refração fotogramétrica. Segundo Andrade (2003), é definida como o ângulo entre o raio colinear e a tangente ao raio

real no ponto nodal exterior. As funções matemáticas que modelam este efeito são apresentadas pelas equações (8) e (9):

$$\delta_{\varepsilon 45x} = x \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) \cdot \varepsilon_{45} \quad (8)$$

$$\delta_{\varepsilon 45y} = y \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) \cdot \varepsilon_{45} \quad (9)$$

Onde:

$\delta_{\varepsilon 45x}$ e $\delta_{\varepsilon 45y}$ – valores da refração;

ε_{45} – valor do índice de refração médio para 45° de inclinação;

r – é dado pela raiz quadrada do quadrado da soma das componentes x e y

x e y – coordenadas (em milímetros) no referencial fotogramétrico.

f – distância focal.

No caso de imagens digitais há a possibilidade de existir também diferenças no comprimento e largura dos pixels. Tais diferenças podem ser descritas por um fator de afinidade. Tal fator também pode representar um efeito de não ortogonalidade entre os eixos do sistema imagem (coluna e linha) e do sistema fotogramétrico. Este efeito de afinidade muito embora exista, pode ou não ser significativo. Com o avanço tecnológico dos sistemas digitais, estes parâmetros geralmente são negligenciados nos dias de hoje. As equações que permitem a correção do seu efeito são apresentadas pelas equações (10) e (11):

$$\delta_{Ax} = A_1x + A_2y \quad (10)$$

$$\delta_{Ay} = A_1y \quad (11)$$

Onde:

δ_{Ax} e δ_{Ay} – valores da correção da não afinidade;

A_1 , e A_2 – parâmetros de não afinidade;

x e y – coordenadas (em milímetros) no referencial fotogramétrico

Henrichsen (2000), comenta que os POI de cada câmera são, geralmente, conhecidos ou determinados de antemão ao processamento das imagens. Segundo o autor, estes parâmetros são geralmente obtidos em condições controladas. Em situações especiais como o uso de plataformas VANT para fins fotogramétricos, estas condições nem sempre são viabilizadas. Muitas plataformas possuem sistema integrado de estabilização da câmera e mecanismos de disparo que dificultam uma calibração em ambiente controlado. Neste contexto, muitos softwares de processamento são munidos de rotinas de cálculo que permitem uma calibração da câmera com base nos próprios dados coletados. Essa prática é denominada de calibração em serviço ou autocalibração (HONKAVAARA, 2004; COLOMINA; MOLINA, 2014; GABRLIK *et al.*, 2018). De acordo com Cramer, Przybilla, Zurhorst (2017), Isso geralmente é motivado pelo fato das câmeras de baixo custo, associadas às plataformas VANT, não conseguirem manter os POI constantes ao longo do tempo. Portanto, não podem ser vistas como câmeras métricas. Ainda assim, segundo os autores, repetidas calibrações (terrestres) comprovam que alguns dos sistemas comercialmente disponíveis são suficientemente estáveis.

O advento de técnicas de processamento com elevado grau de automação, leva muitos usuários de softwares fotogramétricos a negligenciarem questões técnicas importantes, tais como a correta utilização dos POI. A determinação dos POI por meio de calibração requer por exemplo análises inerentes às correlações entre POI e POE, além de análises de significância de parâmetros. Além disso, muitos desses usuários fazem uso de configurações padrão, confiando cegamente nos resultados obtidos e em alguns casos, incorrendo em problemas de sub ou super-parametrização (JAMES; ROBSON; SMITH, 2017).

2.1.2 Bundle adjustment

Andrade (2003), em sua elucidação histórica sobre Fotogrametria, enfatiza a contribuição notória de Helmut Schmid. Na década de 1950, utilizando a condição de colinearidade estabeleceu o "*Bundle Method*". Aplicou o princípio dos mínimos quadrados para ajustar observações de um bloco de fotografias e propagar variâncias para as variáveis incógnitas. A notação empregada é considerada padrão em Fotogrametria.

Este método determina simultaneamente os Parâmetros de Orientação Exterior- POE e as coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço objeto, para todas as fotografias pertencentes a um bloco. O método consiste em uma fototriangulação (ou aerotriangulação). Segundo Lugnani (1987), é um método fotogramétrico no qual se determina as coordenadas dos pontos no espaço objeto (pontos fotogramétricos) por meio da relação geométrica de fotos adjacentes devidamente tomadas, de um esparso controle de campo e de um conjunto de valores aproximados de parâmetros. Já Andrade (2003), afirma que o principal objetivo da fototriangulação é fornecer coordenadas precisas para os pontos necessários à orientação absoluta de Modelos Fotogramétricos. Permitindo uma restituição ou a elaboração de ortofotos. Em outras palavras, a aerotriangulação ajusta as posições e orientações (POE) das fotos, dentro de certo limite, de forma que fixado o espaço objeto (coordenadas de pontos de controle), seja possível satisfazer a condição de colinearidade simultaneamente à determinação das coordenadas dos pontos envolvidos.

O modelo matemático funcional que é comumente adotado na Fototriangulação são as equações de colinearidade (Equações (1) e (2)). Estas parametrizam o princípio de colinearidade (FIGURA 1) entre pontos no espaço imagem, com o centro perspectivo da câmera e pontos no espaço objeto.

Cada ponto em uma imagem gera duas equações (x e y). Admitindo um modelo formado por duas fotos, cada ponto homólogo é responsável por quatro equações (2 raios). Admitindo que a cada foto associa-se seis incógnitas (POE), o número de equações e incógnitas em relação ao número de fotos e pontos envolvidos é dado por:

$$- \text{n}^\circ \text{ equações} = 4 * \text{n}^\circ \text{ pontos};$$

$$- \text{n}^\circ \text{ parâmetros} = 6 * \text{n}^\circ \text{ fotos} + 3 * \text{n}^\circ \text{ pontos};$$

Todavia, ainda que o número de equações seja maior que o número de parâmetros o problema ainda não terá solução em termos de um ajustamento se não for definido o referencial (escala de trabalho). Um referencial pode ser definido determinando-se uma origem, uma orientação e uma escala, ou seja, 7 parâmetros. Neste caso, para que haja solução devem ser adicionados no mínimo 2 pontos planialtimétricos e 1 ponto altimétrico (X , Y , Z de dois pontos e Z de um terceiro ponto). Assim, define-se um referencial, com solução única (ANDRADE, 2003).

Resolvido este problema, a solução do sistema de equações pode ser obtida através de um ajustamento pelo método paramétrico (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$L_a = F(X_a) \quad (12)$$

Onde

L_a - é o vetor das observações ajustadas;

X_a - é o vetor dos parâmetros ajustados;

F - é o modelo matemático funcional (eq. de colinearidade).

Uma vez que o modelo matemático é de solução não linear, é efetuada uma linearização por série de Taylor, e sua solução obtida iterativamente a partir de um ponto aproximado. Para garantir a convergência do sistema, é preciso a inclusão de parâmetros aproximados. O modelo linearizado na forma matricial é apresentado na Equação (13).

$$AX + L = V \quad (13)$$

Com

$$L = L_0 - L_b \quad (14)$$

$$L_0 = F(X_0) \quad (15)$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_0} \quad (16)$$

Onde:

L_0 - o vetor das observações calculado com os parâmetros aproximados;

L_b - vetor das observações (x_p, y_p) ;

X_0 - vetor dos parâmetros aproximados;

V - vetor dos resíduos das observações;

X - vetor das correções aos parâmetros aproximados e;

A - matriz das derivadas parciais, resultado da linearização de $F(X_a)$, no ponto de expansão X .

Entretanto, como visto anteriormente, o referencial deve ser definido para que o sistema possa ser resolvido. Neste caso, uma das opções é adicionar uma condição para a fixação dos pontos de apoio no referencial geodésico, segundo uma precisão. Esta condição é denominada injunção relativa de peso ou de posição (ANDRADE, 2003). Neste tipo de injunção, as variáveis devem atender a uma função além do modelo matemático funcional, sendo controlada por pesos. Isto é:

$$G(X_a) = 0 \quad (17)$$

que linearizando-se tem-se:

$$\left. \frac{\partial G}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_0} (X_a - X_0) + G(x_0) = 0 \quad (18)$$

sendo:

$$C = \left. \frac{\partial G}{\partial X_a} \right|_{X_a=X_0} \quad (19)$$

No caso da Fototriangulação, tem-se:

$$X_{obs} = X_{calc} \quad (20)$$

$$Y_{obs} = Y_{calc} \quad (21)$$

$$Z_{obs} = Z_{calc} \quad (22)$$

Neste método, as equações normais são definidas por:

$$X = -(N + N^C)^{-1} \cdot (U + U^C) \quad (23)$$

Sendo:

$$N = A^T P A \quad (24)$$

$$N^C = C^T P^C C \quad (25)$$

$$U = A^T P L \quad (26)$$

$$U^C = C^T P^C \varepsilon \quad (27)$$

$$\varepsilon = X_g^{calc} - X_g^{obs} \quad (28)$$

$$P = \sigma_0^2 \cdot \sum L_b^{-1} \quad (29)$$

Onde:

P^C - matriz dos pesos da injeção de posição;

P - matriz dos pesos das observações;

C - matriz das derivadas parciais da função de injeção;

ε - vetor de resíduos das injeções;

X_g^{obs} - vetor das coordenadas dos pontos de controle observadas no espaço

objeto;

X_g^{Calc} - vetor das coordenadas dos pontos de controle ajustadas no espaço objeto;

X_A - vetor dos parâmetros ajustados após as iterações;

σ_0^2 - variância das observações de peso unitário a priori e;

$\sum L_b^{-1}$ - matriz covariância das observações.

A variância dos parâmetros ajustados pode ser determinada a partir da matriz de variância-covariância, obtida no processo de ajustamento, a qual é apresentada na equação (30).

$$\sum X = \hat{\sigma}_0^2 \cdot (N + N^c)^{-1} \quad (30)$$

Com $\hat{\sigma}_0^2$ sendo a variância das observações de peso unitário a posteriori. Esta última por sua vez pode ser determinada por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u + s} \quad (31)$$

Onde:

n - número total de equações;

u - número total de incógnitas e;

s - número de injunções.

O Método citado é amplamente empregado pela comunidade fotogramétrica e está implementado em inúmeros pacotes computacionais de processamento. Maiores detalhes sobre o assunto podem ser encontrados em (COELHO e BRITO, 2007; KRAUS, 2007; LINDER, 2016). De acordo com este último autor, três fases principais da fotogrametria podem ser distinguidas em relação às técnicas e instrumental usado para condução dos trabalhos. A Fotogrametria Analógica, a Analítica e a Digital. A transição de uma fase para a outra durou cerca de 20 anos ou ainda mais. Doyle (1964) comenta que o desenvolvimento da fotogrametria analítica começou muito antes da fotografia ser inventada, com estudos geométricos das leis da perspectiva e geometria projetiva. Já Wroble (1991) resume que a evolução da fase analítica para a fase digital é delineada em parte pelos métodos empregados e em parte pelos princípios matemáticos e físicos. Nas primeiras décadas da Fotogrametria, os trabalhos eram conduzidos por meio de equipamentos

puramente óticos e mecânicos. Instrumentos grandes, complicados, caros e exigiam mão de obra especializada. Todas as etapas de trabalho eram produzidas manualmente nesse instrumental. Com o surgimento dos computadores, a ideia era reconstruir a orientação não mais na forma analógica, mas sim matematicamente por meio de algoritmos. Fórmulas e parâmetros (coeficientes) sendo calculados e armazenados em um computador. No entanto, o trabalho ainda era feito com fotos físicas, impressas em papel e ainda requeriam uma alta precisão no instrumental de medição. De acordo com Linder (2016), esta fase foi denominada Fotogrametria Analítica. Nas últimas décadas a capacidade de processamento e armazenagem dos computadores aumentou significativamente. Tecnologias surgiram permitindo a tomada de fotos digitais, de alta resolução. Essa é a fase atual, a Fotogrametria Digital.

2.2 DETECÇÃO E CORRESPONDÊNCIA DE PONTOS

Quando no início da modernização da Fotogrametria muito se investiu em técnicas de mensuração automática de pontos nas imagens. O trabalho que em outros tempos era feito manualmente por um operador passou a ser automatizado. A detecção automática de pontos homólogos passou a ser objeto de interesse da comunidade científica. No âmbito da Fotogrametria o processo era baseado na correlação matemática de regiões específicas nas imagens (ACKERMANN, 1984). Já no âmbito da Visão computacional, de acordo com Snavely, Seitz e Szeliski (2008), desde 1980 já havia o interesse em reconstruir a estrutura de cenas 3D, a partir de imagens, simultaneamente também à determinação de parâmetros de orientação interna e externa da câmera. Em muitos estudos, as imagens utilizadas nem sempre atendem aos mesmos padrões de geometria estereoscópica preconizados na Fotogrametria. Em muitos casos as imagens não são verticais (inclinação superior a 4 graus), repletas de ruídos, derivadas de sensores portáteis (aparelho telefônico celular) ou derivadas de sequências de vídeos (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008; LINGUA; MARENCHINO; NEX, 2009).

Dada à importância do assunto detecção de pontos (feições), Remondino (2006) fez uma revisão sobre operadores de detecção de pontos para correspondência de imagens. O autor descreve que as principais propriedades para um detector de pontos, são: (1) precisão, ou seja, a capacidade de detectar um

padrão em sua localização correta de pixels; (2) estabilidade, isto é, a capacidade de detectar a mesma característica depois que a imagem sofre alguma transformação geométrica (por exemplo, rotação ou escala), ou mudanças de iluminação; (3) sensibilidade, ou seja, a capacidade de detectar pontos em condições de baixo contraste; (4) controlabilidade e velocidade, ou seja, o número de parâmetros que controlam o operador e o tempo necessário para identificar recursos. Um dos operadores mais conhecidos na atualidade é o “*Scale Invariant Feature Transform – SIFT*”. Desenvolvido por Lowe (2004), o operador é capaz de identificar pontos notáveis em uma imagem e procurar correspondências em outras imagens de forma extremamente eficiente. Para isso o operador identifica os pontos notáveis (“*key points*”) na imagem e associa um descritor (“*descriptor*”).

A detecção dos pontos é feita através da diferenciação em distintas escalas, de imagens suavizadas. As feições que se mantiverem em todas as escalas são admitidas como candidatas a pontos notáveis. Os candidatos instáveis são então filtrados com base em uma razão entre autovalores. Em seguida é atribuída uma escala e uma orientação ao ponto. Ao atribuir uma orientação exclusiva a cada ponto notável, com base nas propriedades locais da imagem, um descritor pode ser apresentado relativamente a essa orientação e, portanto, alcançar a invariância para rotação na imagem (LOWE, 2004). O descritor é um vetor que contém as resultantes dos somatórios dos vetores gradiente, na vizinhança do ponto notável. Desta forma atribui-se a cada ponto uma característica única, um identificador específico de cada ponto. Finalmente, cada ponto notável do operador SIFT, é identificado por: P(posição), s(escala), r(orientação) e um descritor “f” (STACHNISS, 2016).

No contexto atual da Fotogrametria o operador de (LOWE, 2004) tem enorme contribuição. Pode-se dizer que na era da Fotogrametria Digital o operador citado é um marco que permite classificar a Fotogrametria antes e depois deste operador.

2.3 STRUCTURE FROM MOTION- SFM

Westoby et al. (2012) comenta que esta técnica de processamento conhecida por SFM, surgiu na década de 1980, junto a comunidade da Visão

Computacional e foi impulsionada graças ao desenvolvimento de algoritmos de detecção e correspondência feições. Ainda segundo os autores, o SFM ganhou visibilidade e popularizou-se por meio de uma série de mecanismos de processamento em nuvem (Microsoft® Photosynth™) produziam modelos digitais 3D.

O SFM opera sob os mesmos princípios básicos da Fotogrametria, ou seja, uma posição 3D pode ser determinada a partir de uma série de imagens sobrepostas. Contudo, difere fundamentalmente no fato que na Fotogrametria convencional, a geometria da cena, posições e orientações da câmera são resolvidas automaticamente sem a necessidade de se especificar a priori, um conjunto de coordenadas 3D no espaço objeto. Toda solução é obtida de forma simultânea em um ajustamento iterativo (“*Bundle Adjustment*”) altamente redundante.

O método SFM pode ser resumido em um conjunto de etapas que incluem identificação e correspondência automática de pontos notáveis (“*tie points*”), “*Bundle Adjustment*” e frequentemente, a densificação de pontos.

O primeiro passo neste processo é a identificação automática de pontos notáveis, o que geralmente emprega algoritmos de registro e orientação de imagens, (ZITOVA; FLUSSER, 2003).

O já mencionado SIFT, é um dos algoritmos usados para identificar e rastrear feições notáveis em todas as imagens. Para isso vários estágios de processamento são executados de modo a permitir a extração de feições que são invariantes a escala, iluminação e rotação. O resultado do primeiro passo é uma lista de pontos notáveis e descritores que permitem a identificação dos pontos homólogos entre todas as imagens.

O segundo passo é a realização de um “*Bundle Adjustment*” para determinação simultânea da posição e orientação da câmera juntamente com as coordenadas 3D dos pontos homólogos (TRIGGS *et al.*, 2000). O “*Bundle Adjustment*” é empregado no SfM de maneira iterativa, determinando-se simultaneamente a localização espacial (3D) de pontos e a posição e orientação da câmera. No processo iterativo, busca-se minimizar os erros na interseção (equações de colinearidade) que definem os pontos, valendo-se do critério dos mínimos quadrados (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015). No “*Bundle Adjustment*”, quando câmeras digitais não calibradas são usadas, além da solução da posição e

orientação da câmera e das coordenadas espaciais dos pontos, também se pode determinar os Parâmetros de Orientação Interna – POI da câmera (distância focal, coeficientes de distorção de lentes e coordenadas do ponto principal) (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008). Este procedimento é conhecido na Fotogrametria como “autocalibração”. O resultado do ajustamento é uma nuvem de pontos 3D (nuvem esparsa) que representa a reconstrução da cena, juntamente com informações sobre a posição, orientação e características internas da câmera empregada na tomada das imagens (FONSTAD et al., 2013). No caso do SFM, aplicado a um conjunto de imagens coletadas sem qualquer informação sobre a posição ou orientação da câmera no espaço, a nuvem de pontos 3D é gerada em um sistema de coordenadas arbitrário, mas internamente consistente (orientação relativa).

Depois da geração da nuvem esparsa por meio do “*Bundle Adjustment*” pode ser aplicado um algoritmo de densificação de pontos (FURUKAWA; PONCE, 2010). Estes algoritmos valem-se de informações já obtidas no ajustamento e determinam a localização 3D de mais pontos nas imagens. Sem uma densificação, apenas uma nuvem de pontos esparsa é gerada e a densidade de pontos estará intimamente relacionada ao número pontos na primeira etapa (MATÍAS et al., 2009). Muitas câmeras gravam informações nos cabeçalhos das imagens (EXIF). Neste caso, valores de distância focal e coordenadas geográficas, quando existentes são úteis como inicialização, mas são inaccurados (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008). Caso disponha-se de coordenadas 3D de pontos, em um referencial cartográfico, é possível empregar uma transformação de similaridade no espaço e orientar a nuvem de pontos de forma absoluta.

Neste contexto, Colomina e Molina (2014) em sua revisão sobre o estado da arte do uso de plataformas autônomas remotamente pilotadas na Fotogrametria, escrevem o seguinte sobre o uso de SFM:

“Notamos que a “velha” comunidade fotogramétrica, disposta a beneficiar-se da próxima onda tecnológica, está relutante em deixar um recém-chegado ao *sanctorum sanctorum* do processamento de dados, sem examinar seu desempenho. É propensa a continuar usando softwares e métodos tradicionais. Por outro lado, a “nova” comunidade de mapeamento é menos sensível a isso e tem menor necessidade de ferramentas de autodiagnóstico e checagem de controle de qualidade intermediário. Portanto mais propensas à utilização de implementações totalmente automatizadas do mesmo paradigma. Parece haver espaço para todos, clássicos atualizados e recém-chegados.” (COLOMINA e MOLINA, 2014, p. 11, tradução nossa)

2.4 PLANO DE VOO

O sucesso de qualquer recobrimento fotogramétrico com fins de extração de geoinformação exige um bom planejamento. Wolf e Dewitt (2000) afirmam que a primeira e mais importante informação que precede um planejamento de voo é saber quais produtos serão gerados e qual será aplicação. Segundo os autores, somente a partir dessa informação é que se pode decidir sobre os equipamentos e procedimentos mais adequados. Na obra citada, é possível encontrar um arcabouço de informações e tratamentos matemáticos para um plano de voo fotogramétrico tradicional, empregando aeronaves tripuladas. Contudo, com a modernização das tecnologias e o surgimento de novas plataformas introduzem-se novos conceitos. No contexto de aeronaves remotamente pilotadas, despertou-se o interesse no assunto a ponto de promover pesquisas no sentido de desenvolver e automatizar o processo de elaboração de planos de voo (LOPEZ et al., 2013; GANDOR; REHAK; SKALLOUD, 2015; PEPE; FREGONESE; SCAIONI, 2018).

Neste sentido e no contexto das plataformas remotamente pilotadas serão abordados neste tópico os principais aspectos inerentes a um plano de voo.

2.4.1 Especificações da Câmera

O conhecimento de especificações da câmera permite a obtenção de inúmeras outras informações. Estes parâmetros dizem respeito às dimensões de imagem (pixel) e de sensor (mm) bem como os parâmetros de orientação interna da câmera (NAKAMURA, 2006). Neste último caso, geralmente o único parâmetro fornecido junto aos manuais são a distância focal. A partir dessas informações derivam-se outros conceitos, os quais são abordados nos próximos itens.

2.4.2 Ground Sample Distance – GSD

O termo surgiu no período de transição das imagens analógicas para as digitais onde as imagens eram então digitalizadas em scanners (NEUMANN, 2005). O termo era usado para designar as dimensões de um pixel no terreno conforme a escala da fotografia digitalizada. A definição teórica de escala em fotogrametria digital está, portanto relacionada à dimensão do pixel, projetado no terreno. De

acordo com a equação 32, o terreno é um plano e a escala é constante em toda a imagem.

$$GSD = \frac{H T_p}{f} \quad (32)$$

Onde

H - Altura de voo (m);

F - distância focal (mm);

T_p - tamanho do pixel (mm).

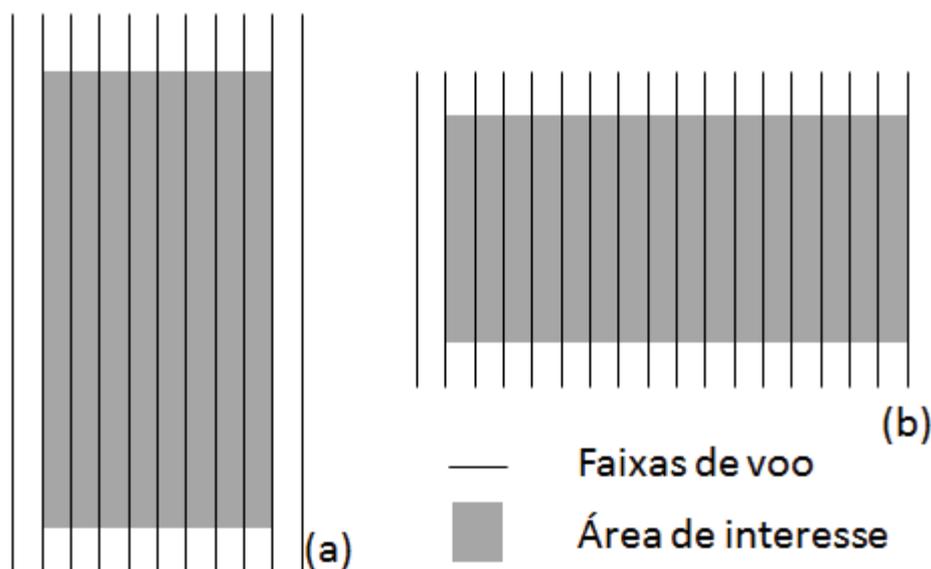
A variável T_p por sua vez, é obtida tomando-se o valor médio entre razões da altura da imagem (pixel) e a altura do sensor (mm) e, largura da imagem (pixel) e largura do sensor (mm).

Como mencionado previamente, a equação 32 representa um valor teórico uma vez que o valor real deve considerar a altitude de voo em relação ao solo, definido a partir de um modelo de elevação (DEM) por exemplo. Orych (2015) reforça esta observação e diz que a real resolução do sensor é altamente dependente de outros fatores limitantes do sistema de imagem tais como ruído interno, parâmetros de perda da conversão analógico-digital e sistema óptico. Uma calibração adequada pode determinar o valor do que se chama de “Ground Resolved Distance - GRD”. Há que se mencionar que o valor do GSD não traduz a dimensão da menor feição identificável em uma fotografia. A informação que o cérebro humano é capaz de extrair de uma imagem depende do número de elementos pictóricos (pixels) em um conglomerado. Os níveis de decisão envolvem Detecção: descobrindo a existência de um objeto; Reconhecimento: classificando o objeto como pertencente a um grupo; Identificação: identificando o tipo de objeto. O número de pixels ocupados pelo objeto determina a certeza da decisão quanto à existência de um objeto ou mesmo sua identificação (SANDAU, 2010). Um consenso na comunidade fotogramétrica é que a dimensão do GSD deve ser 3 vezes menor que a dimensão do menor objeto que se deseja identificar nas imagens.

2.4.3 Direção de voo

Considerando o polígono que delimita a área de interesse, normalmente as direções das faixas de voo obedecem a orientação Leste/Oeste ou Norte/Sul. Aconselha-se, entretanto que as direções das fixas de voo sejam paralelas à direção de maior amplitude do polígono limítrofe (FIGURA 2 (a)). Isso permite que haja uma diminuição do número de manobras entre as faixas de voo, garantindo maior autonomia de voo. Já na FIGURA 2(b) é possível notar o aumento significativo do número de faixas de voo, a ponto de, em alguns casos, exigir um segundo voo para concluir o recobrimento de toda área. Isso dependerá da autonomia de voo da plataforma. No caso de plataformas VANT, a autonomia de voo depende da carga da bateria.

FIGURA 2- Direções das faixas de voo.



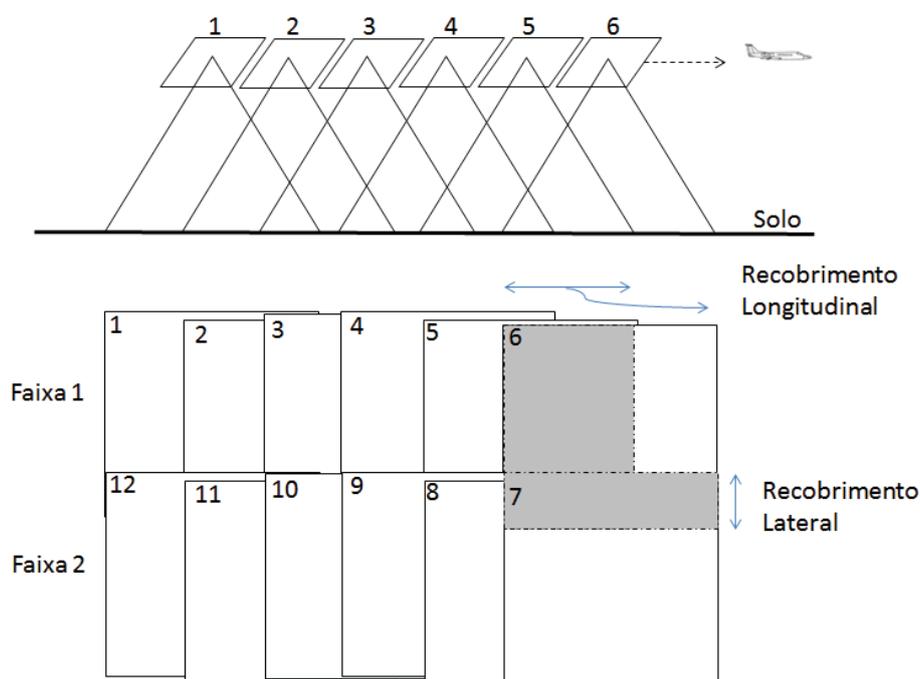
Fonte: O autor (2019)

2.4.4 Recobrimento longitudinal (RLO) e lateral (RLA)

A cobertura fotográfica de uma área é realizada empregando-se fotos verticais consecutivas e com sobreposição de modo a permitir a estereoscopia (WOLF; DEWITT, 2000; KRAUS, 2007). Como ilustrado na FIGURA 2, o recobrimento longitudinal é a sobreposição de fotos sucessivas ao longo de uma faixa de voo e o recobrimento lateral é a sobreposição entre faixas de voo

adjacentes. As magnitudes especificadas para os recobrimentos influenciam diretamente no número de faixas de voo e no número de fotos por faixa. Magnitudes menores implicam em um menor número de faixas de voo e de fotos e magnitudes maiores por sua vez, produzem um efeito contrário, maior número de faixas de voo e de fotos.

FIGURA 3 - Recobrimento longitudinal e lateral .



Fonte: O autor (2019)

Para garantir estereoscopia, o recobrimento longitudinal mínimo necessário é de 50%, porém é arriscado executar um voo nessa condição pois a plataforma de voo sofre com influências atmosféricas (vento por exemplo). Sendo assim em voos tripulados, tradicionalmente emprega-se recobrimento longitudinal de 60%. Já para garantir conexão entre as faixas de voo e evitar “furos”, o recobrimento lateral é executado com 30%.

Neste contexto convém mencionar a importância da variável “velocidade” da aeronave. O controle da velocidade da aeronave é importante para manter os recobrimentos longitudinais adequados. Caso haja uma aceleração da aeronave, há uma diminuição no recobrimento longitudinal e caso haja uma desaceleração, há um aumento no recobrimento. Ambas as situações são indesejadas. Um exemplo que

ilustra esta situação é quando há rajadas de vento na mesma direção das faixas de voo. Assumindo a velocidade constante da aeronave, a rajada de vento pode provocar a aceleração ou desaceleração da mesma e a conseqüente influência no recobrimento. Em alguns casos, a tomada das imagens é feita seguindo um critério de distância (aero base) ou de tempo. Neste ultimo caso, o aspecto da variação da velocidade é mais crítico.

2.4.5 Cálculos de um plano de voo

Muito embora haja inúmeros programas computacionais que permitem o cálculo dos planos de voo de forma automatizada e otimizada, serão transcritos aqui algumas das operações básicas inerentes ao processo. Para isso considera-se uma câmara fotográfica cuja imagem possui dimensões (pixel) $L_i \times A_i$ e um sensor com dimensões (mm) $L_s \times A_s$. Sendo assim o tamanho do pixel (T_p) em milímetros, fica definido conforme a Equação 32:

$$T_p = \frac{\frac{L_s}{L_i} + \frac{A_s}{A_i}}{2} \quad (33)$$

Assumindo-se conhecida a distancia focal (f) e uma altura de voo (H) bem como as dimensões em metros de um retângulo que delimita a área alvo ($B_r \times A_r$), podem-se calcular os seguintes parâmetros de voo:

Escala da foto:

$$E = \frac{1}{\left(\frac{f}{H}\right)} \quad (34)$$

Dimensões da foto altura (A_f) e largura (L_f), projetadas no terreno:

$$A_f = E \cdot A_s \quad (35)$$

$$L_f = E \cdot L_s \quad (36)$$

Definindo-se um recobrimento longitudinal ($RLo\%$) e ($RLa\%$), e considerando as direções da faixa de voo paralelas a maior dimensão do retângulo que delimita a área alvo (Br), pode-se calcular:

Distância entre faixas de voo:

$$Dfa = Lf \cdot \left(1 - \frac{RLa}{100}\right) \quad (37)$$

Aero base:

$$B = Af \cdot \left(1 - \frac{RLo}{100}\right) \quad (38)$$

Número de faixas:

$$Nfa = \frac{Ar}{Dfa} \quad (39)$$

Número de fotos por faixa

$$NFfa = \frac{Br}{B} \quad (40)$$

Definindo-se também a velocidade (v) da aeronave em metros por segundo, é possível definir o intervalo de tempo entre duas fotos consecutivas:

$$\Delta t = \frac{B}{v} \quad (41)$$

2.4.6 Pontos de apoio

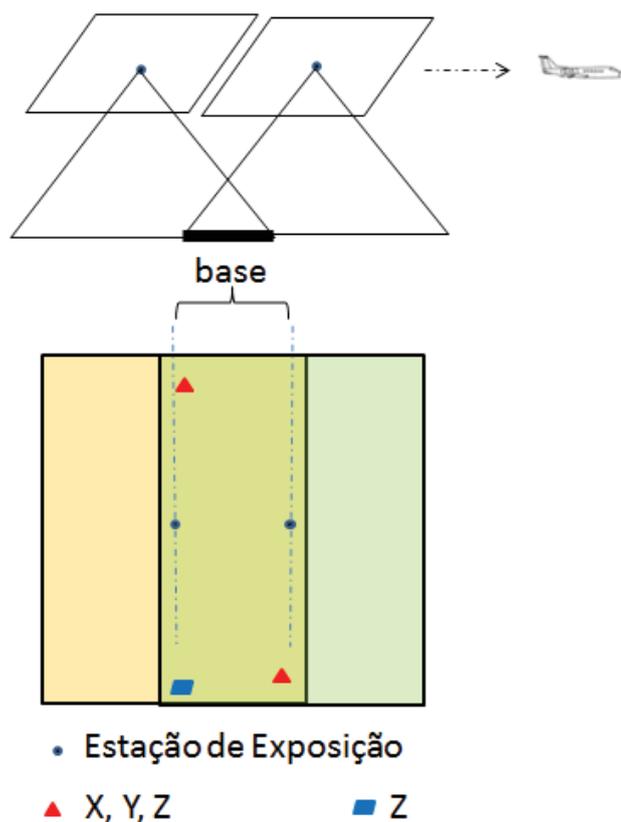
Não menos importante que o plano de voo propriamente dito, é a compreensão da importância dos pontos de apoio (pontos de controle e verificação) nos trabalhos Fotogramétricos. Quando não se possui instrumental embarcado, capaz de fornecer um posicionamento que permita o georreferenciamento direto das imagens o uso de pontos de controle se faz necessário (CRAMER; STALLMANN; HAALA, 2000).

Andrade (2003) afirma que a finalidade primordial, mas não única, dos pontos de controle é a materialização do referencial com que se deseja trabalhar. De

acordo com o autor, a definição do referencial se dá pelo conhecimento dos parâmetros que definem a origem do referencial, a orientação dos eixos e a unidade de medida (escala).

Os pontos de controle devem ser visíveis a partir de um mínimo de duas fotografias sobrepostas (interseção de dois raios de luz conforme a equação de colinearidade). Para atender a condição mínima de definição do referencial cartográfico, pelo menos três pontos de controle são necessários (dois pontos com coordenadas x,y,z e uma terceira posição com coordenada z conhecida). Contudo isso fornece uma solução única em que não é viável a análise de erros. A FIGURA 4 ilustra um exemplo da condição mínima de pontos de controle para um modelo estereoscópico.

FIGURA 4 - Condição mínima de apoio para um modelo fotogramétrico.

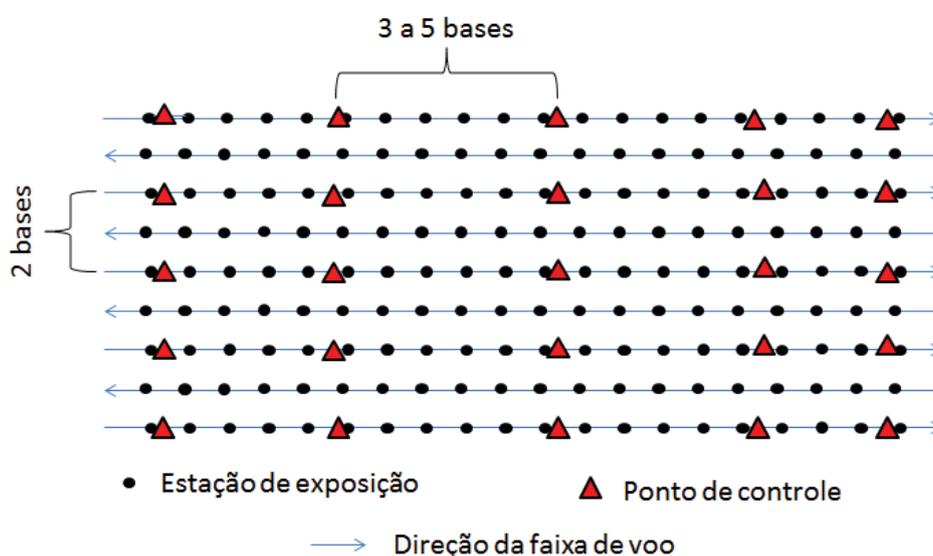


Fonte: O autor (2019)

Como mencionado anteriormente, a situação descrita oferece a condição mínima de apoio e caso haja alguma inconsistência nas coordenadas, o referencial

materializado estará incorreto. Considerando um bloco fotogramétrico composto por vários modelos, a recomendação é que haja pontos de controle nas bordas do bloco e internamente distribuídos, conforme indicado na FIGURA 5. Segundo narra Andrade (2003), os pontos internos ao bloco podem ser exclusivamente verticais (z). Porém, com a facilidade de determinação de coordenadas 3D por meio de técnicas de posicionamento GNSS o posicionamento em campo é facilitado a ponto de justificar que todos os pontos de apoio tenham suas coordenadas 3D determinadas.

FIGURA 5 - Distribuição de pontos de controle em um bloco fotogramétrico.



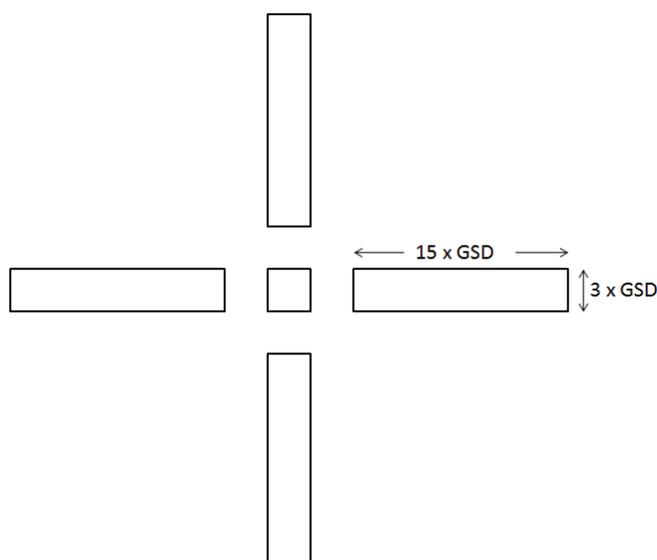
Fonte: O autor (2019)

Outro aspecto importante no que diz respeito ao apoio de campo é a disponibilidade de feições naturalmente foto identificáveis. Em muitos casos, principalmente em áreas de vegetação, existe a dificuldade na obtenção de feições no terreno que possam ser corretamente identificadas nas imagens. Nestes casos, é imprescindível a “Pré-Sinalização” em campo. Neste procedimento busca-se posicionar feições artificiais (alvos) estrategicamente posicionados no bloco, de maneira que possam ser observados a partir de um maior número possível de fotos.

O desenho do alvo deve ser simétrico de modo a permitir que o profissional responsável pela identificação e medição, consiga visualmente definir o centro do alvo. Local este onde deve ter sido posicionado o equipamento GNSS usado para a determinação das coordenadas.

Os alvos para apoio fotogramétrico tradicionalmente apresentam geometrias “pontuais”, em “X”, “T” ou “Y” (WOLF; DEWITT, 2000; COSTA; SILVA, 2012). As dimensões do alvo devem ser compatíveis com a escala das imagens, de modo a permitir a correta identificação e medição sem que sejam sub ou superdimensionado. Considerando que o GSD deve ser 3 vezes menor que a dimensão do menor objeto que se deseja identificar nas imagens, uma feição pontual deverá ter seu diâmetro, caso uma circunferência, ou lado, caso um quadrado com dimensão equivalente a 3 GSD. Outro detalhe que convém mencionar é que para correta identificação dos alvos nas imagens, é necessário um elevado contraste em relação ao solo. Pode-se, por exemplo, pintar com tinta branca o asfalto o, em terreno rural, usar cal e carvão. A FIGURA 6 exemplifica um alvo pontual quadrado, que traz em seus lados, abas que auxiliam na identificação visual dos mesmos.

FIGURA 6 - Esquema de um alvo e suas proporções em relação ao GSD.



Fonte: O autor (2019)

Apesar do desenvolvimento tecnológico alcançado com a medida direta da posição e orientação de sensores no instante da tomada das imagens, pontos de apoio são ainda frequentemente empregados na Fotogrametria (SCHWARZ; FRASER; GUSTAFSON, 1984; SCHWARZ; FRASER; GUSTAFSON, 1984; SKALOUD; CRAMER; SCHWARZ, 1996; HUTTON; MOSTAFA, 2005; HAALA;

CRAMER; ROTHERMEL, 2013; GABRLIK et al., 2018). Mesmo com as tecnologias e facilidades existentes na atualidade, o levantamento de pontos de apoio é uma das etapas mais onerosas de um projeto cartográfico. Em projetos fotogramétricos clássicos é usual, estabelecer pontos de apoio nas bordas do bloco fotogramétrico e a cada 3 a 5 bases. Uma boa distribuição de pontos de controle de solo não só é necessária para resolver a orientação absoluta do bloco de imagens no referencial cartográfico desejado, mas também serve para mitigar as deformações do bloco, resultantes principalmente de erros oriundos dos POI da câmera (GERKE; PRZYBILLA, 2016).

Ao longo dos anos, desenvolvimentos científicos e tecnológicos foram feitos, para reduzir o número de pontos de apoio (CRAMER, 2001; CRAMER; STALLMANN; HAALA, 2000; PFEIFER; GLIRA; BRIESE, 2012; DEBIASI, 2012; FILHO, 2017). Neste segmento, a medida direta da posição e orientação do sensor via a integração GNSS + IMU tem sido o caminho para o posicionamento das câmeras fotogramétricas digitais. Por consequência, o sucesso dos resultados está fortemente correlacionado à qualidade do instrumental empregado (Receptores GNSS + IMU de alta resolução). Entretanto, para o caso de plataformas de voo autônomas (VANT) “*off the shelf*”, a utilização dessa tecnologia é praticamente inviabilizada, devido à capacidade de carga da plataforma (“*payload*”) e ao alto custo associado a um instrumental de alta resolução (HARDIN et al., 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

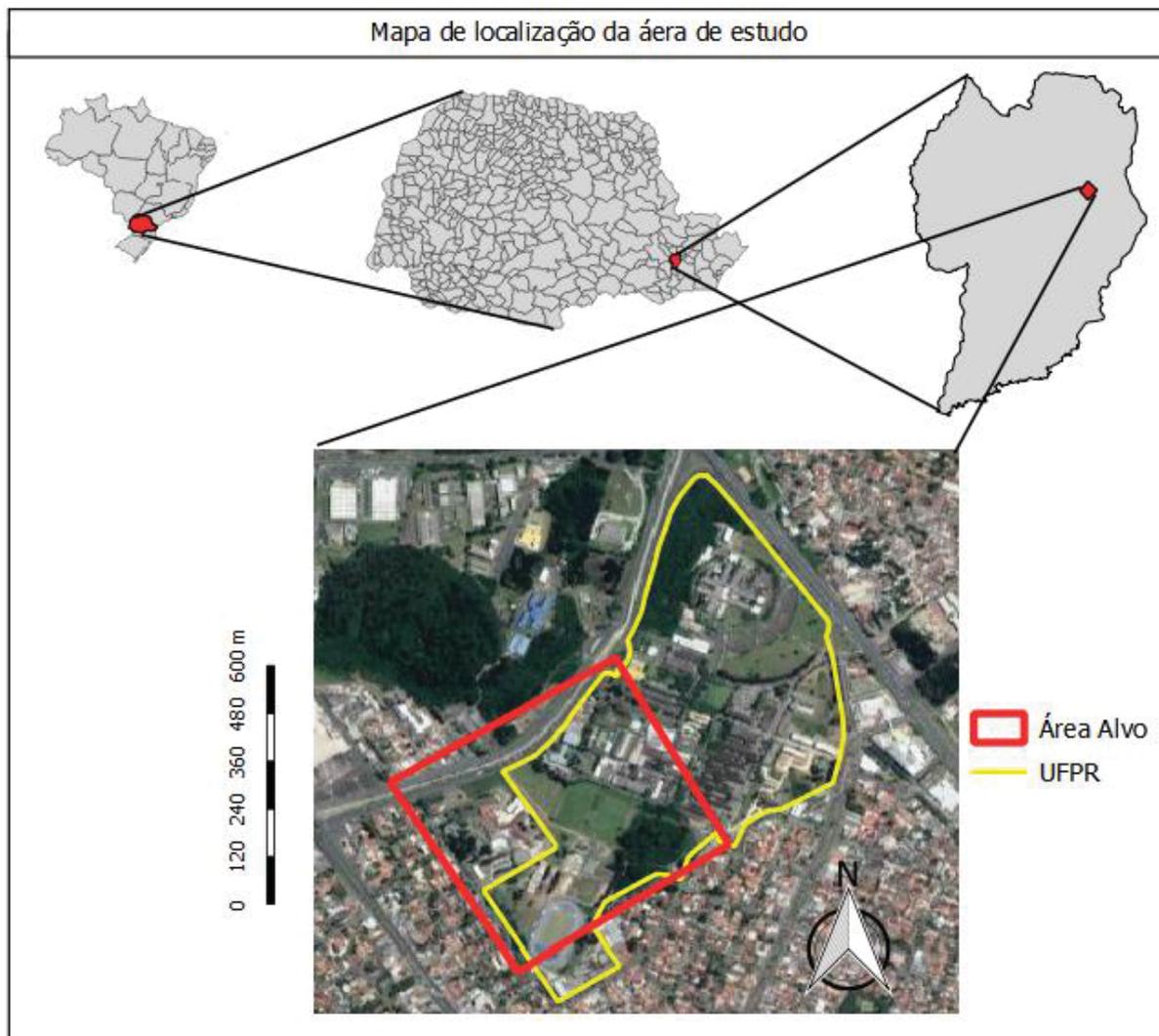
Neste capítulo são apresentados e descritos os insumos e metodologias empregadas na pesquisa bem como a área de estudo.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada para este trabalho compreende uma parte do campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – UFPR, em Curitiba. A área alvo de 39 hectares compreende uma parte do campus e foi escolhida tendo em vista o aspecto logístico de coleta de dados e a caracterização da mesma: subáreas com vegetação densa, vegetação rasteira, construção predial urbana e malha viária. Essa escolha contempla de forma fiel as situações de emprego de

aerolevantamento a partir de VANT tanto em ambientes rurais (áreas vegetadas) quanto urbanos.

FIGURA 7 - Área de estudo.



FONTE: O autor (2019).

3.2 MATERIAIS

Os recursos empregados no presente estudo foram disponibilizados pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – PPGCG, pelo *Programa de Pós-Graduação em Geografia* – PPGGEO, ambos da Universidade Federal do Paraná – UFPR e pelo autor deste trabalho.

3.2.1 Recursos de Software

Para o planejamento e execução autônoma dos voos, foram empregados os aplicativos “Ctrl+DJI” e “PIX4Dcapture”, ambos operam de forma conjunta, em sistema *Android*. O “Ctrl+DJI” é usado para monitorar em tempo real parâmetros de posição, orientação, carga da bateria e velocidade junto ao “PIX4Dcapture”. Este último aplicativo é usado para definir graficamente os limites da área a ser sobrevoada e configurar os parâmetros que definem o plano de voo (altura de voo, velocidade da aeronave, recobrimento entre fotos, inclinação da câmera em relação ao solo, disposição das faixas de voo, etc.). Também é responsável por comandos de execução autônoma do plano de voo propriamente dito. Ambos os aplicativos estão disponíveis de forma gratuita.

Para o processamento das imagens foi empregado o software Agisoft PhotoScan[®] versão 1.2.6.2834. O software permite dentre inúmeras funções: a orientação das imagens, a autocalibração da câmera, geração de nuvem de pontos, geração de ortofotomontagens e modelos de elevação.

O aplicativo Microsoft Office 2010 foi empregado para redação do texto, tabulação de dados e cálculos.

O aplicativo ACTION Stat v.3.4124 foi empregado para as análises estatísticas.

O aplicativo QGIS v 2.18.19 foi usado para realização de medidas nas Ortofotomontagens e MDT.

3.2.2 Recursos de Hardware

Com a evolução tecnológica no âmbito da eletrônica e da robótica, houve uma série de avanços que tornaram algumas plataformas aéreas extremamente interessantes para o uso em Sensoriamento Remoto e Fotogrametria (EVERAERTS, 2008; EISENBEISS, 2009; COLOMINA e MOLINA, 2014). Para a aquisição das imagens empregadas neste estudo, optou-se por usar uma solução comercialmente disponível e de fácil acesso, tanto por usuários especialistas quanto não especialistas. Apesar da diversidade de plataformas existentes e suas características intrínsecas, optou-se por empregar uma plataforma do tipo Multirrotor. Foi usada a solução apresentada pelo fabricante DJI, plataforma modelo *PHANTOM*

3 Pro. Este modelo apresenta solução completa em termos de posicionamento e orientação da plataforma, (receptor GNSS e unidade inercial), aquisição de imagens (câmera RGB de 12.4 Mega pixel estabilizada por “*gimbal*” tri axial) e capacidade de voo autônomo. A câmera é dotada de um sensor CMOS com dimensões em milímetros de 6.24 x 4.68, imagem de 4000 x 3000 pixel e distância focal nominal de 3,61 mm resultando em um pixel de aproximadamente 1,56 μ . Maiores detalhes sobre a plataforma podem ser obtidas junto ao fabricante.

FIGURA 8 - DJI Phantom 3 Pro.



FONTE: <https://www.dji.com/phantom-3-pro/info#specs>

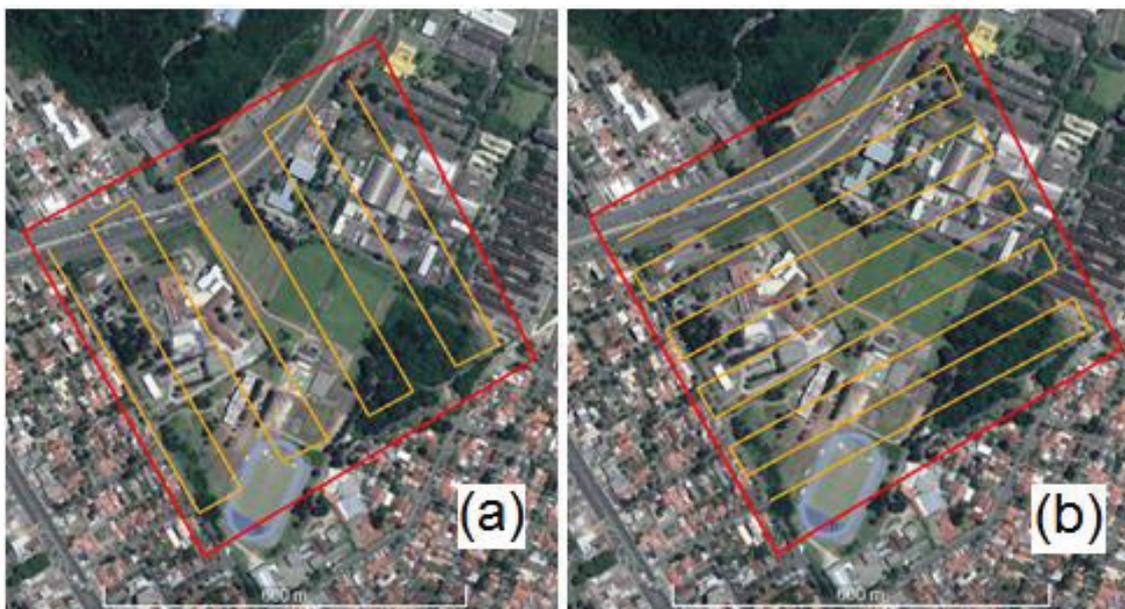
3.3 METODOLOGIA

Para atender aos objetivos desta pesquisa foi estabelecida uma área alvo e concebidos uma série de recobrimentos para serem executados de forma autônoma pela plataforma VANT. Neste item, serão descritas as metodologias empregadas neste estudo.

3.3.1 Recobrimentos aéreos

Com o intuito de realizar uma avaliação sequenciada da nuvem de pontos, do MDT e Ortomosaico, foram planejados para a área de estudo seis recobrimentos. Os planos foram elaborados de modo a contemplar uma variação na altura voo, 100 m e 200 m, além de variações quanto ao sentido das faixas voo (aproximadamente Leste/Oeste e Norte/Sul) e inclinação da câmera (no nadir e a 15°). Contudo a condição de câmera inclinada só foi executada para os voos a 100 m. A direção das faixas de voo de cada recobrimento pode ser verificada na FIGURA 9, FIGURA 10 e FIGURA 11, de modo que “(a)” indica sentido Norte/Sul e “(b)” Leste/Oeste.

FIGURA 9 - Voo a 100 m, câmera na posição vertical. (a) Sobreposição longitudinal de 60% e Lateral de 59%; (b) Sobreposição longitudinal de 80% e Lateral de 75%.



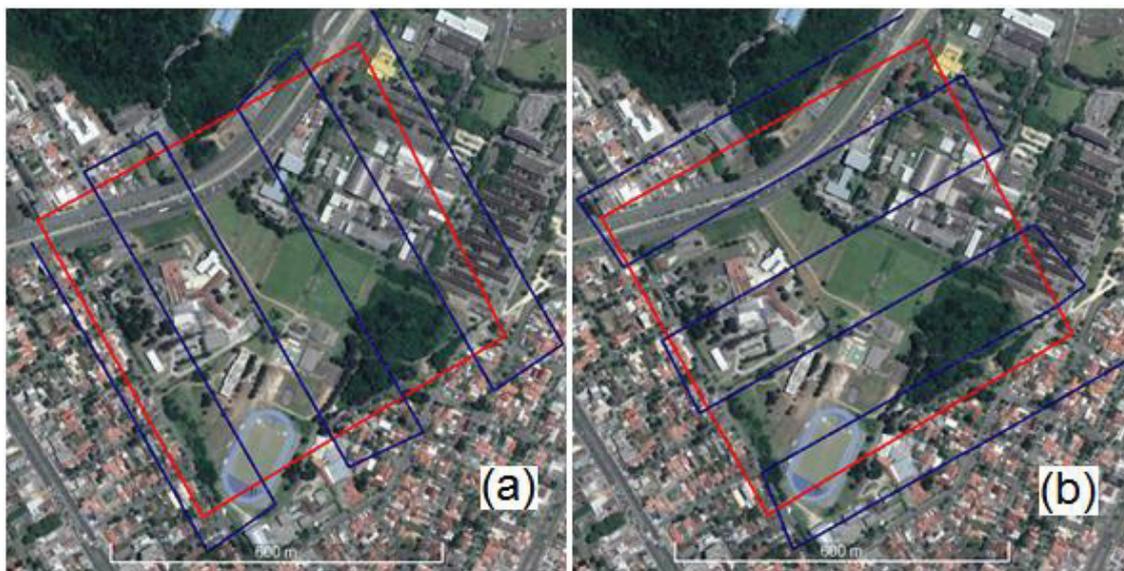
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 10 - Voo a 100 m, câmera na posição inclinada. Ambos (a) e (b) com sobreposição longitudinal de 80% e Lateral de 75%.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 11 - Voo a 200 m, câmera na posição vertical. Ambos (a) e (b) com sobreposição longitudinal de 65% e Lateral de 63%.



FONTE: O autor (2019).

Os planos retratados pela FIGURA 9 foram concebidos a com uma altitude de voo 100 m acima do nível do solo, nas direções Leste/Oeste e Norte/Sul, tendo a câmera posicionada na direção vertical (nadir). Para o voo a 100 m de altitude, na direção Norte/ Sul (FIGURA 9 (a)), decidiu-se adotar uma taxa de recobrimento entre fotos próximo a taxa convencionalmente empregada em recobrimentos aerofotogramétricos (65%). Esta sobreposição tem por objetivo simular recobrimentos que ofereçam condições mínimas de sobreposição entre imagens. Com isso pretende-se investigar os efeitos produzidos nas exatidões planimétricas e altimétricas da nuvem densa, MDT e ortomosaico. Esta mesma proporção de recobrimento foi usada nos voos a 200 m (FIGURA 11). Para os demais voos a 100 m a sobreposição adotada foi de 80% (FIGURA 10). A taxa de recobrimento entre faixas foi calculada de forma automática pelo aplicativo de planejamento de voo previamente mencionado². A Tabela 1 resume algumas características dos recobrimentos planejados:

TABELA 1- Parâmetros de voo.

| Altura de voo nominal (m) | Tipo de tomada | Direção de Voo | Recobrimento nominal entre fotos (%) | Recobrimento nominal entre faixas (%) |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|--|
| 100 | vertical | N/S | 65 | 59 |
| 100 | vertical | L/O | 80 | 75 |
| 100 | inclinada | N/S | 80 | 75 |
| 100 | inclinada | L/O | 80 | 75 |
| 200 | vertical | N/S | 65 | 63 |
| 200 | vertical | L/O | 65 | 63 |

FONTE: O autor (2019).

3.3.2 Apoio de campo (GNSS e MDT LIDAR)

Em geral, os levantamentos fotogramétricos são usados para extrair geoinformação tanto de caráter planimétrico quanto altimétrico. Estes levantamentos

² Maiores detalhes podem ser obtidos em <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115001875506--Android-Grid-Mission-Settings>. Acesso em Março de 2019.

são usados como fontes de informação em inúmeras aplicações práticas e em pesquisas. A fim de subsidiar este estudo, estabeleceu-se uma verdade de campo (*ground truth*), empregando-se coordenadas tridimensionais obtidas a partir de levantamento GNSS RTK. A técnica de posicionamento em tempo real por meio de receptor GNSS RTK foi empregada para determinar coordenadas planialtimétricas de 90 pontos em uma área de 39 hectares. Essa amostragem resulta em uma densidade de aproximadamente um ponto a cada 4333 m² ou aproximadamente 2,3 pontos a cada 10000 m² (um hectare). Estes pontos foram definidos sobre feições naturais no terreno e tiveram suas coordenadas tridimensionais determinadas com auxílio de receptor GNSS RTK Modelo Viva. Normalmente em trabalhos de Fotogrametria é comum a prática de pré-sinalização. Todavia, optou-se por conduzir esta pesquisa levando-se em conta a pior condição possível, um cenário natural sem o artifício da pré-sinalização. Os pontos foram distribuídos no perímetro da área de estudo e internamente a ela conforme a disponibilidade de feições foto identificáveis (pontos naturais). Por ser inviável a coleta de pontos de apoio para cada recobrimento executado, conforme a FIGURA 5., definiu-se uma distribuição única para todos os recobrimentos. Como padrão foi adotado a distribuição de apoio de campo referente ao recobrimento a 100 m, fotos verticais, com faixas de voo na direção aproximadamente Leste-Oeste (FIGURA 14). Para a determinação das coordenadas 3D dos pontos, foi usada uma taxa de rastreamento de 1 segundo e a linha de base máxima foi aproximadamente 550 m. O critério de aceitação das coordenadas dos pontos levantados foi de uma precisão melhor que 1 cm para as componentes planimétricas e melhor que 2 cm para a componente altimétrica.

FIGURA 12 - Disposição dos apoios de campo RTK.



FONTE: O autor (2019).

Além do uso de coordenadas tridimensionais para análises de precisão e exatidão, dispõe-se de um Modelo Digital de Terreno - MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado, o qual será usado para uma segunda comparação. De acordo com o fornecedor a precisão altimétrica do MDT é de ± 10 cm. Ainda segundo o fornecedor, o MDT foi gerado a partir de levantamento LIDAR, com equipamento Pegasus HD500 e densidade de pontos igual a 4 pontos por m^2 .

3.3.3 Geração da Nuvem de Pontos, MDT e Ortofotos (Fase 1).

Nesta fase são realizadas as etapas de orientação das imagens (aero triangulação), geração de Nuvens de pontos, Modelos de Elevação e Ortofoto. Estas operações são realizadas no software *Agisoft PhotoScan*® versão 1.2.6.2834. Para isso foi seguido o *workflow* trazido pelo software e descrito a seguir.

Em um primeiro momento as imagens são carregadas no software e feito a orientação relativa das mesmas (*Align Photos*). Nessa etapa o software determina

a posição e orientação de cada uma das imagens. Após esta etapa, são feitas as medidas dos pontos de controle e verificação (aproximadamente 22 pontos para cada categoria). Estas medidas são feitas de forma manual em cada uma das imagens que o ponto em questão possa ser identificado.

Uma vez que se introduzem as coordenadas de pontos de controle no terreno, uma escala é definida para o modelo fotogramétrico. Com isso também se define o referencial de trabalho. O modelo até então orientado de forma relativa passa a ser orientado de forma absoluta. No manual do software é dito que para referenciar os dados, emprega-se uma transformação de similaridade a 7 parâmetros (3 parâmetros para translação, 3 para rotação e 1 para escala). Essa transformação compensa apenas erros aleatórios de caráter linear do modelo. Parcelas não lineares dos erros não são corrigidas. Esta é geralmente a principal razão para erros de georreferenciamento (orientação absoluta). Durante a orientação das imagens o PhotoScan estima os parâmetros de orientação interna e externa da câmera. Essa estimativa é realizada usando apenas informações de POI e POE contidas nas próprias imagens (Tachibanaya, 2001; Tesic, 2005) podendo haver maiores incertezas nas estimativas finais. De acordo com Agisoft Photoscan (2016), a precisão das estimativas finais depende de muitos fatores como a taxa de sobreposição entre as fotos e faixas de voo, bem como a forma da superfície do objeto. Para minimizar estes erros usa-se a função “optimization” do software. Muito embora não haja informações detalhadas do processo, trata-se de uma rotina computacional que executa uma autocalibração dos POI. É feito um refino dos valores dos POI e POE, minimizando a soma dos erros e obtendo-se por consequência, uma modelagem mais adequada dos afastamentos da condição de colinearidade (DEBIASI, 2012; FILHO, 2017).

A esta altura do processamento tem-se como resultado uma nuvem esparsa de pontos (referenciada no sistema das coordenadas dos pontos de apoio) e POE de cada uma das imagens. O software se vale dessas informações para então através do menu “*Build Dense Cloud*” permitir a construção de uma nuvem densa de pontos. Conhecidos os POE de cada imagem assim como os POI, por meio da equação de colinearidade é possível a reconstrução da geometria projetiva que por sua vez, possibilita densificar a nuvem esparsa através de novas posições nas imagens. Na visão computacional este procedimento é conhecido por “Multi-View Stereopsis” (FURUKAWA; PONCE, 2010).

Objetivando a construção do ortomosaico, alguns detalhes merecem atenção. Dada à natureza da geometria projetiva das imagens, medidas diretas são inviabilizadas, sendo necessária a transformação da projeção perspectiva para uma projeção ortogonal. Uma ortofoto é dita convencional quando as feições acima do solo não estão retificadas (corrigidas para a projeção ortogonal), permanecendo a mesma aparência de inclinação existente na imagem original. Neste caso normalmente emprega-se a informação altimétrica extraída de um MDT. A ortofoto é dita verdadeira ("*true ortophoto*"), quando todas as feições são ortogonalmente projetadas, tanto no nível do solo quanto acima dele. A construção de ortofotos verdadeiras requer, todavia a modelagem 3D completa das edificações para evitar efeitos indesejados (JUNIOR, 2010). Por não ser objeto de interesse deste trabalho a confecção de ortofotos verdadeiras, os ortomosaicos produzidos são do tipo convencional, considerando-se ortoretificada apenas a informação no nível do solo. Para isso, é necessária uma classificação da nuvem densa de modo a extrair apenas o MDT. Por meio da função "*Classify Ground points*", a nuvem densa é então classificada em duas categorias: Terreno e Não Terreno. Os parâmetros usados na classificação foram os "parâmetros padrão" sugeridos pelo próprio software. Para isso são levados em consideração: a dimensão da célula que define o plano do terreno; ângulo máximo admissível entre uma reta tangente ao terreno, no centro da célula e a reta que une este ponto de tangência ao ponto que se deseja classificar; a distância máxima entre o terreno e o ponto que se deseja classificar. Desta maneira, classifica-se a nuvem densa em terreno e não terreno. A partir dessa nuvem que contém a classe terreno e da função "*Build DEM*", faz-se a construção do modelo digital de elevação (MDT). A resolução espacial do Modelo de elevação será aproximadamente a mesma do "*Ground Sample Distance – GSD*" das imagens originais. Este modelo é usado como subsídio no processo de geração de ortomosaico. Através do Menu "*Build Ortomosaic*" gera-se o ortomosaico da área abrangida pelo conjunto de imagens. A resolução espacial do Ortomosaico será a mesma do GSD das imagens originais. O Quadro 1 apresenta a sequência das etapas de processamento e os parâmetros adotados em cada uma.

Como resultados desta fase de processamento, foram exportados os relatórios de Aerotriangulação contendo os resíduos dos pontos de controle e as discrepâncias em cada um dos pontos de verificação medidos, o Ortomosaico e o MDT da área.

QUADRO 1 - Parâmetros do *Workflow* de processamento no *Agisoft PhotoScan*®.

| Sequencia de Etapas | Parâmetros empregados |
|--|---|
| Orientação das imagens (<i>Align Photos</i>) | Accuracy: High; Pair Preselection: Disabled; Key point limit: 40.000; Tie point limit:4.000 |
| Construção da nuvem densa (<i>Build Dense Cloud</i>) | Quality: High; Depth filtering: Moderate |
| Classificação da nuvem densa - terreno e não terreno. (<i>Classify Ground Points</i>) | From: Any class; To: Ground + Low Points; Max Angle (deg): 15; Max distance (m): 1; Cell Size (m): 100; |
| Construção do modelo de elevação-MDT (<i>Build DEM</i>) | Source data: Dense Cloud; Interpolation: Enabled (default); Point classes: Ground; |
| Construção do Ortomosaico (<i>Build Orthomosaic</i>) | Surface: DEM; Blending mode: Mosaic(default); |

FONTE: O autor (2019).

3.3.4 Métricas e Estatísticas

Nos relatórios de processamento do software *Agisoft PhotoScan*, infelizmente, informações relevantes tais como variância a posteriori do ajustamento ou matriz variância covariância dos valores calculados não são apresentadas. Portanto uma depuração rigorosa dos resultados é inviabilizada. Todavia faz-se uma análise verificando a métrica Erro Quadrático Médio (EQM) ou do inglês “*Root Mean Square Error*” (RMSE) das discrepâncias obtidas. São checadas as magnitudes das discrepâncias entre os valores de referência (“*Ground Truth*”) e os valores calculados. A métrica EQM é dada pela raiz quadrada do somatório do quadrado das discrepâncias “*e*”, divididos pelo número de observações “*n*” (tamanho da amostra):

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (42)$$

Uma segunda análise diz respeito ao tipo de distribuição estatística dos conjuntos amostrados. Para tanto é feito um teste de normalidade dos mesmos. Tal verificação é justificada devido ao fato de procedimentos estatísticos, como testes t, testes para coeficientes de regressão, análise de variância, e o teste F de homogeneidade de variância terem como pressuposto amostras com uma

distribuição normal. A suposição de normalidade de um conjunto de dados, em um procedimento estatístico, requer um teste efetivo de forma a validar a suposição. Ou um argumento cuidadoso mostrando que a violação da suposição não invalida o procedimento utilizado (THODE, 2002). Dado o desempenho do teste Shapiro-Wilk para detecção de normalidade, alguns autores recomendam seu uso: Thode (2002), Razali e Wah (2011), Ghasemi e Zahediasl (2012).

O teste t é usado para testar hipóteses sobre a média da população (verificação de tendência). De acordo com Casella e Berger (2002), as hipóteses que podem ser escolhidas para o teste T são:

| | H_0 | H_1 |
|-----------|---------------|------------------|
| Diferente | $\mu = \mu_0$ | $\mu \neq \mu_0$ |
| Menor que | $\mu = \mu_0$ | $\mu < \mu_0$ |
| Maior que | $\mu = \mu_0$ | $\mu > \mu_0$ |

O teste estatístico é dado por:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (43)$$

Onde \bar{X} é a média da amostra; μ_0 é o valor da hipótese nula (H_0); “s” é o valor do desvio padrão e “n” o tamanho da amostra e “ H_1 ” é a hipótese alternativa.

Todos os procedimentos básicos de estatística - o teste T, o teste F, a análise de variância (ANOVA), entre outros - dependem fortemente da suposição de que os dados da amostra (ou as estatísticas suficientes) estejam distribuídos de acordo com uma distribuição específica. Mas, para cada teste clássico, existe uma alternativa não paramétrica com menos hipóteses sobre os dados. Mesmo se as hipóteses a partir de um modelo paramétrico são modestas e pouco restritivas, elas serão, sem dúvida, falsas, no sentido mais puro. Se os dados não satisfazem as suposições assumidas pelas técnicas tradicionais, métodos não paramétricos de inferência estatística devem ser usados. As técnicas não paramétricas assumem pouca ou nenhuma hipótese sobre a distribuição de probabilidade da população no qual se retiram os dados (PORTAL ACTION, 2018 a).

Sendo assim, caso a condição de normalidade não tenha sido comprovada através do teste Shapiro-Wilk, emprega-se o teste de Wilcoxon para uma única amostra. O Teste de Wilcoxon - Amostra Única é um método alternativo do Teste

t de uma amostra, que é utilizado para testar se a localização (mediana) de uma amostra é igual a um valor especificado. Maiores detalhes podem ser obtidos em Portal Action (2018 b).

3.3.5 Verificações e Análises (Fase 2)

Após a geração da Nuvem Densa de pontos também foram gerados MDT e Ortomosaicos. Para verificar e analisar estes produtos, foram adotadas as metodologias descritas a seguir:

3.3.5.1 Relatórios de processamento

Após o termino da Fase 1 no software Photoscan, exporta-se o relatório de processamento. Neste relatório constam dentre outros itens, todos os critérios empregados no processamento, parâmetros de orientação interior e exterior da câmera bem como os valores dos resíduos em pontos de controle e as discrepâncias dos pontos de verificação. A partir desses valores é possível inferir sobre algumas características da nuvem de pontos. Nesta oportunidade verifica-se a condição de normalidade das discrepâncias em pontos de verificação, a existência de tendência e a magnitude do EQM de cada componente (X, Y e Z). Busca-se com isso uma primeira avaliação qualitativa.

3.3.5.2 Ortomosaico e MDT

Muito embora o relatório de processamento forneça indícios da qualidade dos resultados, não há garantias que os produtos cartográficos derivados tenham as mesmas qualidades. Uma avaliação específica de cada produto em questão se faz necessária.

A avaliação do ortomosaico e do MDT é feita através da análise de discrepâncias em pontos de verificação distribuídos ao longo dos mesmos. Para isso emprega-se uma lista de pontos diferente da usada anteriormente na Fase 1.

Dentre os 90 pontos de apoio que foram determinados com auxílio de receptor *RTK* (item 3.3.2), aproximadamente metade (45) foi empregado na Fase 1,

sendo 22 pontos de controle e 23 pontos de verificação. Os 45 pontos restantes foram empregados nas análises dos Ortomosaicos e MDT.

Com auxílio do software Qgis V2.18.19, foi possível um gerenciamento dos dados e a extração de coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação. Inicialmente cada um dos 45 pontos de verificação foi identificado e assinalado no Ortomosaico. Definiu-se assim uma camada de informação contendo a posição planimétrica dos pontos medidos. Com auxílio do plug-in “*Raster Interpolation*”, determinou-se por interpolação bi linear junto ao MDT, para cada posição medida no Ortomosaico, qual o respectivo valor altimétrico associado. Então, é viabilizada a obtenção das três componentes cartesianas de cada ponto. Não obstante ao fato que distintos interpoladores podem entregar valores também distintos, para fins da presente análise considera-se o interpolador bi linear.

De posse deste conjunto de coordenadas foi possível uma confrontação com os valores de referência (coordenadas XYZ do levantamento RTK). As condições de normalidade das discrepâncias, a existência de tendência e a magnitude do EQM de cada componente (X, Y e Z) também são verificadas. Além desta verificação a partir de coordenadas GNSS, faz-se uma comparação do MDT fotogramétrico com um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado. As coordenadas altimétricas, obtidas a partir do MDT fotogramétrico SFM, cuja imprecisão é $\pm 10\text{cm}$, são comparadas com as coordenadas altimétricas obtidas junto ao MDT LIDAR ($\pm 10\text{cm}$), interpoladas de forma análoga para as mesmas posições planimétricas medidas no Ortomosaico.

O estabelecimento de critérios de aceitação e definição de qualidade de produtos cartográficos é alvo de extensas deliberações ao redor do mundo (EURO-SDR, 2011). Em 2011, a “*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing- ASPRS*” iniciou discussões sobre o assunto, e em 2014 publicou o relatório: “*ASPRS POSITIONAL ACCURACY STANDARDS FOR DIGITAL GEOSPATIAL DATA*”. Neste documento incluem-se padrões de precisão posicional para ortoimagem, dados planimétricos digitais e dados digitais de elevação levando-se em conta a existência de cobertura vegetal (ASPRS, 2015). O mais interessante é que este documento não associa a precisão do produto cartográfico com o GSD da imagem de origem, o tamanho do pixel da ortoimagem ou a escala do produto em questão. É justificado que dado à natureza digital dos dados geoespaciais atuais e às diferentes arquiteturas e configurações de sensores aéreos, muitas aplicações

não podem ser vinculadas diretamente à escala de compilação, resolução da imagem de origem ou resolução final de pixels. A relação entre a classe de precisão recomendadas para RMS_x , RMS_y e RMS_z e o tamanho do pixel da ortoimagem, varia conforme as características do sensor e dos processos de mapeamento utilizados. A classe de precisão horizontal apropriada deve ser negociada e acordada entre o usuário final e o provedor de dados, com base nas necessidades específicas do projeto e nos critérios de design. No Brasil, os critérios que definem a qualidade dos produtos cartográficos são estabelecidos pelo Decreto nº 89.817/1984 e, conforme ressalta (SANTOS et al., 2010), não contempla plenamente as demandas das novas tecnologias. Sendo assim, normas complementares foram criadas para atender a Produtos Cartográficos Digitais-PCD (DSG, 2019). Apesar da existência de normas, os produtos cartográficos gerados neste trabalho não serão submetidos a nenhuma das normas citadas.

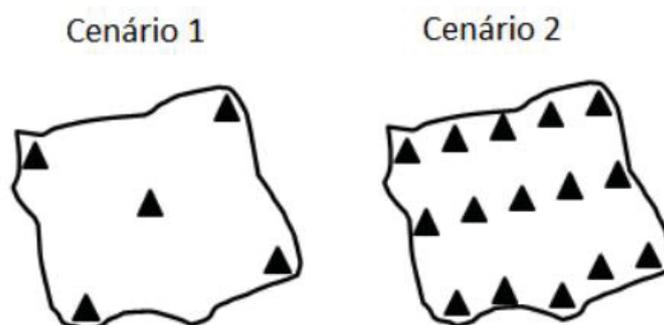
Como um dos objetivos da pesquisa é verificar a existência de alterações provocadas nas exatidões, exclusivamente conforme a mudança da geometria do recobrimento buscou-se minimizar as potenciais influências oriundas das medidas manuais. Foi adotado então um procedimento que garanta as mesmas medidas em qualquer bloco fotogramétrico composto por imagens obtidas à mesma altitude e inclinação de câmera. Para viabilizar esta condição, as imagens coletadas com a mesma altitude e inclinação da câmera, foram inicialmente processadas em um único bloco fotogramétrico (faixas cruzadas). Posteriormente, após a orientação do bloco e da realização das medidas manuais de todos os pontos de controle e verificação, criam-se outras duas cópias do projeto original. Em cada cópia faz-se a eliminação de imagens de modo a individualizar um recobrimento com uma única orientação de faixas de voo (Norte/Sul ou Leste-Oeste). Desse modo é possível garantir que todas as análises feitas a partir do conjunto de imagens com uma mesma altura de voo e inclinação de câmera, tenham rigorosamente as influências das mesmas medidas.

3.3.6 Estudo da influência da disponibilidade de pontos de apoio na exatidão da nuvem de pontos.

Não obstante às análises dos recobrimentos, pretende-se conduzir uma investigação sobre os efeitos de dois distintos cenários de distribuição de pontos de apoio nos recobrimentos realizados. A determinação de pontos de apoio é sem sombra de dúvidas, uma parte dos trabalhos fotogramétricos que mais demanda tempo e custos. Sendo assim, no contexto do presente estudo é de relevância conduzir uma investigação nesta temática. Quanto ao número de pontos de controle nos blocos fotogramétricos, no contexto da fotogrametria clássica apoiada por GPS embarcado para determinação das estações de exposição, Ackermann (1992) sugere o uso de um mínimo quatro pontos de controle 3D. Porém isso pode resultar em singularidades nos cálculos. O autor sugere então a adição de pontos de controle vertical nas bordas do bloco ou uso de faixas de voo cruzadas. Sendo assim, decidiu-se por considerar os dois cenários de distribuição de pontos de apoio conforme ilustra a FIGURA 13. O primeiro cenário considerado leva em conta um total de cinco pontos de controle, sendo um em cada canto do bloco e um na região central. Já o segundo cenário avalia a condição tradicional de distribuição de pontos (um ponto a cada três ou cinco bases). Porém, dada às dificuldades de obtenção de feições pontuais naturais, que permitissem a definição de pontos de apoio no terreno, conforme cada recobrimento a ser avaliado, adotou-se uma distribuição padrão de pontos de apoio. O Cenário 2 teve sua distribuição de pontos de apoio definido conforme um voo a 100 m de altura e recobrimentos de 80% e 75%, longitudinal e lateral respectivamente. Embora seja possível a utilização de somente um ponto de controle ou um processamento sem nenhum ponto de controle, estas configurações não são consideradas para análise, tendo em vista a limitação de precisão dos sensores de posicionamento e orientação embarcados na plataforma VANT (baixo custo). Salienta-se aqui, que as duas configurações mencionadas, um ponto de controle ou nenhum ponto, são frequentemente empregadas em aplicações que não requerem necessariamente, a obtenção de informação métrica, geralmente apenas análises visuais de um determinado fenômeno (GRAÇA; MITISHITA; GONÇALVES, 2017; SOPCHAKI *et al.*, 2018). Nestes casos, a inexistência de pontos de controle não inviabiliza a condução do projeto, pois as informações de posição do sensor podem ser obtidas diretamente do sistema de navegação de

baixo custo da plataforma, sendo registradas nas próprias fotos (TESIC, 2005; TACHIBANAYA, 2001).

FIGURA 13- Distribuição dos pontos de controle para o experimento.



FONTE: O autor (2019).

3.3.7 Estudo dos efeitos da autocalibração na geração da nuvem de pontos.

Softwares como o PhotoScan possuem rotinas internas que permitem posicionar e orientar as imagens ao mesmo tempo em que determina os POI da câmera. Com informações extraídas apenas das imagens (metadados EXIF), é possível gerar um modelo para a superfície, nuvem de pontos, (JAMES et al., 2017). Muitos usuários de softwares de processamento, desconhecem os reais significados dos parâmetros que estes softwares empregam e acabam adotando valores padrão (“*default*”). Os autores citados, motivados pelas facilidades oferecidas por tais softwares, também questionam o uso de valores padrão. Baseando-se em simulações de Monte Carlo, os autores investigaram a existência de configurações ideais de processamento no contexto do SFM. No estudo apresentado, foi concluído que a correta identificação e remoção de “*outliers*”, juntamente com a atribuição correta de pesos às observações, desempenham papel crucial na obtenção de melhores exatidões. Entretanto não é estabelecida uma avaliação comparativa em considerando duas alturas de voo distintas ou uso de imagens inclinadas. Sendo assim, propõe-se uma avaliação das influências dos POI nos valores de EQM de uma nuvem de pontos obtida por SFM, contemplando esta lacuna.

O software PhotoScan possui, rotina para a realização de autocalibração da câmera e permite que o usuário defina quais parâmetros são considerados: distância focal (c), coordenadas do ponto principal (X_0, Y_0), distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3, K_4), distorção descentrada ou tangencial (P_1, P_2, P_3, P_4), não afinidade e ortogonalidade (B_1 e B_2). Os modelos matemáticos empregados pelo PhotoScan, na determinação dos POI constam no manual do usuário (AGISOFT PHOTOSCAN, 2016).

A metodologia de avaliação consistirá em submeter o bloco fotogramétrico a distintas combinações de POI e então, avaliar os valores de EQM dos resíduos nos pontos de controle e as discrepâncias nos pontos de verificação. A seguir são apresentadas as combinações de POI consideradas neste estudo:

- 1) Considerando (c) e (X_0, Y_0);
- 2) Considerando (c) e (X_0, Y_0), $K_1 + K_2 + K_3$;
- 3) Considerando (c) e (X_0, Y_0), (K_1, K_2, K_3, K_4);
- 4) Condição “*default*” (c) e (X_0, Y_0), ($K_1 + K_2 + K_3$); $P_1 + P_2$
- 5) Considerando (c) e (X_0, Y_0), (K_1, K_2, K_3, K_4), (B_1, B_2);
- 6) Considerando (c) e (X_0, Y_0), (K_1, K_2, K_3, K_4), (B_1, B_2) + P_1 ;
- 7) Considerando (c) e (X_0, Y_0), (K_1, K_2, K_3, K_4), (B_1, B_2) + $P_1 + P_2$;
- 8) Considerando (c) e (X_0, Y_0), (K_1, K_2, K_3, K_4), (B_1, B_2) + $P_1 + P_2 + P_3$;
- 9) Considerando (c) e (X_0, Y_0), (K_1, K_2, K_3, K_4), (B_1, B_2), (P_1, P_2, P_3, P_4);

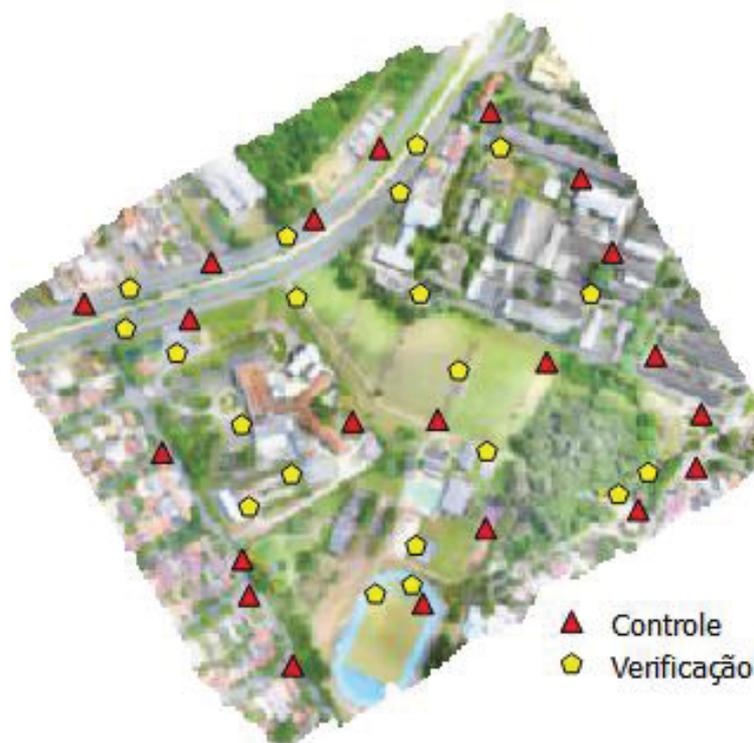
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos. Apresenta-se inicialmente a distribuição dos pontos de controle e verificação na área de estudo e em seguida uma comparação das características dos recobrimentos executados frente ao que foi planejado. Posteriormente são apresentados e discutidos uma série de experimentos derivados dos recobrimentos executados.

4.1 SELEÇÃO DOS APOIOS DE CAMPO

Dentre os 90 pontos inicialmente levantados por técnica RTK, seguindo os fundamentos descritos no item 2.4.6, foram selecionados para a Fase 1 aproximadamente 45 pontos (FIGURA 14). Todavia nem todos os pontos puderam ser efetivamente utilizados. Alguns estavam obstruídos (oclusão) quando as imagens foram tomadas e outros não puderam ser corretamente identificados. Em média foi possível a realização de medidas em 21 pontos de controle e 20 de verificação em cada um dos recobrimentos analisados.

FIGURA 14- Distribuição dos pontos de controle e verificação na Fase 1.



FONTE: O autor (2019).

Para a Fase 2, fez-se uso dos demais 45 pontos, não empregados na Fase 1. A distribuição destes pontos ao longo da área de estudo pode ser verificada na FIGURA 15. Por motivo de oclusão, dificuldade de identificação de alguns pontos, ou por proximidade com outros pontos, nem todos puderam ter suas coordenadas extraídas dos ortomosaicos. Por consequência também não foram identificados no MDT. Em média, foi viável a medida em 32 pontos em cada recobrimento analisado.

FIGURA 15- Pontos de Verificação disponíveis na Fase 2, verificação dos ortomosaicos e MDT.



FONTE: O autor (2019).

4.2 RECOBRIMENTOS EXECUTADOS

Por ser parte da área urbanizada e com elevado grau de circulação de pessoas e veículos, optou-se por executar os voos em finais de semana. Com isso houve uma acentuada diminuição na quantidade de veículos estacionados nas ruas e em trânsito. O tempo de voo ficou limitado à autonomia da bateria (18 minutos). Por conta de variações nas condições climáticas durante a execução dos voos a coleta de dados foi feita conforme janela de tempo adequada (céu limpo, sol próximo ao zênite e pouco vento). Após a etapa de aquisição das imagens procedeu-se as etapas de processamento da Fase 1 (item 3.3.3). Foram concebidos para este trabalho, voos com as características descritas na TABELA 1. Fazendo uma primeira análise quanto às taxas de sobreposição e a altitude de voo inicialmente planejados, algumas diferenças são perceptíveis. Na TABELA 2 têm-se os valores efetivamente executados e as diferenças em relação ao que foi planejado.

TABELA 2 – Planos de voo efetivamente executados.

| Altura de voo (m) | Tipo de tomada | Nº Fotos | Direção de voo | Recobrimento entre fotos (RLO%) | Recobrimento entre faixas (RLA%) | Δ (m) H voo | Δ % Fotos | Δ % Faixas |
|-------------------|----------------|----------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 105 | Vertical | 92 | N/S | 56 | 55 | 5 | -5 | -4 |
| 98 | Vertical | 248 | L/O | 75 | 67 | -2 | -5 | -6 |
| 104 | Inclinada | 321 | N/S | 78 | 74 | 4 | -2 | -3 |
| 105 | Inclinada | 302 | L/O | 78 | 74 | 5 | -2 | -1 |
| 207 | Vertical | 48 | N/S | 59 | 59 | 7 | -5 | -4 |
| 210 | Vertical | 48 | L/O | 59 | 59 | 10 | -4 | -4 |

FONTE: O autor (2019).

Uma implicação direta que se tem na mudança da variável altura de voo diz respeito ao valor do *GSD*. Para a condição planejada de voo a 100 m o valor seria 4,3 cm, entretanto passou a ser 4,6 cm para o voo na direção N/S e 4,2 cm na direção L/O. Outra diferença observada diz respeito aos valores referentes às taxas de sobreposição obtidas. Duas hipóteses podem ser levantadas a respeito dessa variação: algum tipo de “pane” nos aplicativos de planejamento ou contribuição de condições atmosféricas adversas (rajadas de vento). Apesar dos cuidados anteriormente mencionados, problemas ocorreram. Apesar da incidência de ventos ou correntes de ar no nível do solo ter sido aparentemente desprezível o mesmo não pode ser dito para outros níveis. Na meteorologia, a velocidade e a direção do vento, juntamente com a temperatura, a umidade e a pressão do ar atmosférico, são as variáveis mais importantes empregadas na caracterização da atmosfera terrestre (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). As características topográficas e urbanas também contribuem para a forma que as correntes de ar se deslocam (JARDIM, 2011). O fato da plataforma fotogramétrica se deslocar na coluna de ar (variando a pressão atmosférica) e ao longo desta conforme esclarecem Oliveira; Amorin e Ereczynski (2018), fica sujeita as oscilações de correntes. Dada às razões expostas, podem-se justificar as variações nas taxas de sobreposição principalmente pela influência atmosférica junto à plataforma fotogramétrica. Outro aspecto ponderado por Haala *et al.*(2011), sobre problemas em configuração geométrica do bloco, diz respeito ao fato de que câmeras não fotogramétricas têm “*footprint*” menor do que as métricas. Tanto a elevada dinâmica do voo em si quanto à dimensão reduzida do “*footprint*” resulta em desvios consideráveis nas sobreposições das

imagens. Como consequência, prejudicam o processamento de imagens VANT pelas ferramentas modernas.

4.3 ESTUDO DOS RECOBRIMENTOS

Neste item são apresentados e discutidos experimentos realizados a partir dos aerolevantamentos descritos na TABELA 2. Com o intuito de permitir uma maior variação nas características dos recobrimentos disponíveis para análise, foram feitas manipulações nos recobrimentos com sobreposição longitudinal (RLO) de 80%. A partir dos blocos fotogramétricos com 80% de RLO, foram criados outros blocos, eliminando-se imagens intermediárias ao longo das faixas de voo, porém preservando a sobreposição lateral (RLA). Isso permitiu a criação de blocos fotogramétricos com sobreposição longitudinal de aproximadamente 60%.

A orientação das imagens feita pelo Agisoft PhotoScan foi realizada levando-se em conta condição padrão (“*Default*”) do software na determinação dos POI. O software executa um procedimento de calibração em “trabalho” (autocalibração), que segundo manual do usuário, emprega o modelo tradicional de “Conrady e Brow”.

Cada recobrimento discutido contempla as seguintes análises:

- a) Significância dos POI;
- b) Precisões e exatidões da nuvem densa de pontos na aerotriangulação.
- c) A inspeção visual de uma subárea da nuvem densa quanto à reconstrução tridimensional de objetos;
- d) Exatidão planimétrica do Ortomosaico;
- e) Exatidão altimétrica do MDT obtido por técnica SFM.
- f) Comparativo do MDT SFM com MDT LIDAR

Os testes estatísticos para verificar a condição de normalidade ou de tendência das amostras são realizados considerando um nível de significância igual a 5% ($\alpha=0.05$). Rejeita-se a hipótese nula de normalidade ou de existência de tendência caso a magnitude do p-valor seja inferior ao valor “ α ” estabelecido (JAWLIK, 2016). As análises comparativas entre MDT SFM e MDT LIDAR, fundamentam-se em valores numéricos e comparações visuais na forma de diagramas de caixa (ARAUJO; ABAR, 2012).

Para fins de padronização das análises de exatidões obtidas nos experimentos, é arbitrado um valor de referência para planimetria igual a 8 cm (2 GSD) para recobrimentos com altura de voo próximo a 100 m e 16 cm para os recobrimentos com altura de voo próximo a 200 m. Já o valor de referência altimétrico estabelecido será 10 cm para os recobrimentos com altura de voo a 100 metros e 20 cm para os recobrimentos com altura de voo próximo a 200 metros, ou seja, 2,5 GSD.

4.3.1 Aerolevanteamento a 100 m com fotos verticais. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.

Neste experimento discutem-se os resultados de um recobrimento com altura de voo aproximadamente 100 m e câmera orientada perpendicularmente em relação ao solo (fotos verticais $\pm 4^\circ$). O processamento das 129 imagens que compõe o bloco fotogramétrico foi executado adotando a condição padrão (“*Default*”) do software Agisoft PhotoScan em relação aos parâmetros de orientação interior da câmera (POI) na autocalibração. Nesta condição são admitidos os parâmetros: distância focal (c), coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0), distorção radial simétrica ($K1$, $K2$, $K3$) e distorção descentrada ($P1$, $P2$). A TABELA 3 mostra os POI obtidos na autocalibração e as respectivas precisões ($\pm\sigma$).

TABELA 3- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|---------------|---------------|
| C | 3,6294 | 0,0011 |
| x_0 | -0,0225 | 0,0001 |
| y_0 | 0,0082 | 0,0001 |
| K1 | 1,16583e-003 | 6,76425e-006 |
| K2 | -1,26228e-004 | 1,12054e-006 |
| K3 | 1,66339e-006 | 5,14038e-008 |
| P1 | -3,04902e-005 | 1,04604e-006 |
| P2 | 4,53106e-005 | 1,22922e-006 |

FONTE: O autor (2019).

A significância do parâmetro se baseia na magnitude do respectivo desvio padrão. Se a ordem de grandeza do desvio padrão for menor que o valor do próprio parâmetro é admitido à significância deste. Caso ordem de grandeza do desvio

padrão seja igual ou maior que o a ordem de grandeza do parâmetro, tem-se que o parâmetro é não significativo. Neste caso, todos os parâmetros foram significativos.

4.3.1.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos verticais RLO 60% e RLA 75%.

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 21 pontos de controle e 20 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 4 um resumo descritivo dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z em 21 pontos de controle, empregados para referenciar cartograficamente a nuvem de pontos. É possível verificar que o valor do EQM da resultante planimétrica (8,3 cm) ultrapassa o limiar estabelecido (2 GSD = 8 cm). Entretanto, mediante um teste t para média das resultantes planimétricas (RP), ao nível de confiança de 95%, tem-se que o EQM pode ser considerado estatisticamente dentro do limiar de precisão planimétrica estabelecido nesse estudo. Para o caso da precisão altimétrica (EQM Z), a tolerância altimétrica (2,5 GSD) é extrapolada (12,4 cm >10,0 cm).

TABELA 4- Resumo dos resíduos. Experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| EQM | 4,8 | 6,8 | 12,4 | 8,3 |
| Máximo | 9,4 | 12,2 | 24,2 | 15,4 |
| Mínimo | -9,5 | -10,9 | -25,5 | 1,6 |
| RP= Resultante Planimétrica | | | | |

FONTE: O autor (2019).

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos são analisadas as discrepâncias tridimensionais em 20 pontos de verificação. Na TABELA 5, as exatidões planimétrica e altimétrica, obtidas com valores de EQM das discrepâncias, indicam magnitudes similares aos EQM determinados a partir dos resíduos nos pontos de apoio (precisões). Os valores das médias das discrepâncias tridimensionais “ ΔX ” e “ ΔZ ”, diferentes de zero, indicam possível não normalidade e tendências nas amostras. Porém o p-valor do teste estatístico de normalidade Shapiro-Wilk (SW), com um nível de confiança de 95%, comprova que se trata de uma amostra com distribuição normal (p-valor > 0,05). Já a inexistência de tendência é comprovada pela magnitude dos p-valores do teste t, com o mesmo nível de

confiança (95%). Aplicando o teste t para a média das resultantes planimétricas (RP), sob as mesmas condições anteriores, comprova-se que o EQM = 9,9 cm apesar de ultrapassar o limiar de 8 cm, pode ser aceito como dentro do intervalo de confiança admissível para 2 GSD.

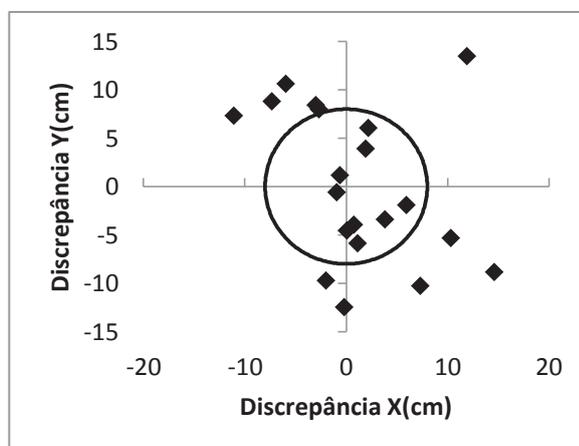
TABELA 5- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 6,4 | 7,6 | 10,6 | 9,9 |
| Máximo | 14,6 | 13,5 | 19,8 | 18,0 |
| Média | 1,3 | 0,0 | 2,8 | 8,8 |
| Mínimo | -11,1 | -12,5 | -13,2 | 1,1 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0.813 | 0.358 | 0.131 | |
| Tendência t | 0.370 | 0.987 | 0.241 | |

FONTE: O autor (2019).

Uma análise visual da distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser feita no GRÁFICO 1. A circunferência representa a tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Apesar o EQM planimétrico calculado (9,9 cm) ser aceito dentro da tolerância admissível ao nível de confiança de 95%, verifica-se que 55% das discrepâncias extrapolaram o limite planimétrico admissível.

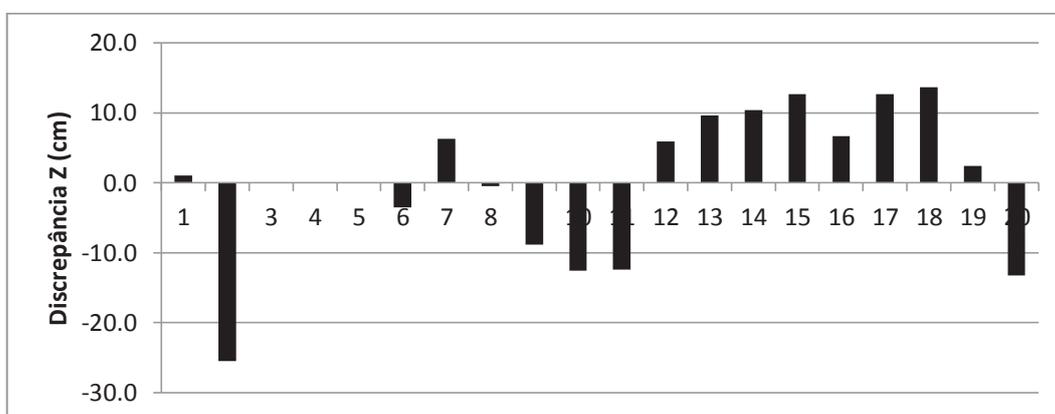
GRÁFICO 1- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 1 visualiza-se a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Constata-se que apesar do EQM das discrepâncias altimétricas (10,6 cm) serem próximas à tolerância admissível (10 cm), 45% das discrepâncias são superiores a tolerância estabelecida. Verificando-se a posição espacial desses pontos, constatou-se que as coordenadas altimétricas foram determinadas com a interseção fotogramétrica de apenas dois raios. Nesta condição, a imprecisão da medida fotogramétrica na componente “x” pode ter degradado o valor calculado da componente altimétrica, justificando maiores discrepâncias nesses pontos.

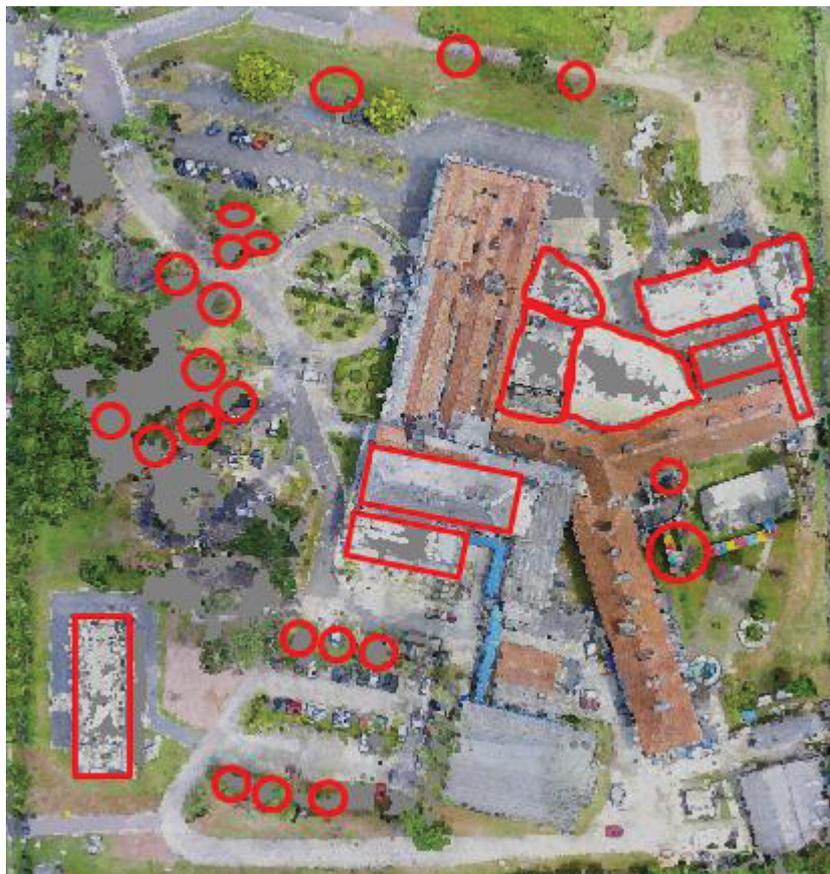
GRÁFICO 1- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Não obstante a uma análise qualitativa da nuvem de pontos, fez-se também uma inspeção visual da mesma quanto à reconstrução tridimensional de objetos. Tomou-se como base a qualidade visual de objetos reconstruídos considerando falhas na reconstrução e textura dos objetos de uma sub-região da área de estudo. A realidade do cenário descrito pela FIGURA 16, traz um total de 60 árvores e 19 edificações. É possível identificar a existência de falhas de reconstrução de algumas árvores e edificações (assinaladas na figura). Aproximadamente 35% das árvores não foram corretamente reconstruídas enquanto 42% dos telhados da cena não apresentaram uma textura sólida, característica de uma superfície corretamente reconstruída. A provável causa dessa porcentagem é a dificuldade do algoritmo de detecção de pontos, implementado no PhotoScan, em detectar pontos homólogos em regiões no bloco com deficiência de recobrimento (60%RLO).

FIGURA 16 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Vertical (RLO 60% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.1.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

Para análise da exatidão planimétrica deste produto foram empregados 33 pontos de verificação. Nestes pontos, foram calculadas as discrepâncias ΔX , ΔY e posteriormente as métricas e estatísticas para cada componente. A TABELA 6 mostra um resumo dos resultados obtidos e as estatísticas realizadas. De acordo com os p-valores obtidos, ao nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras ($p\text{-valor} > 0,05$). Adotando o valor de 2 GSD para a exatidão planimétrica admissível (8 cm) e aplicando o Teste t com 95% de confiança, o EQM das resultantes planimétricas (8,9 cm) é estatisticamente aceito dentro do limiar estabelecido.

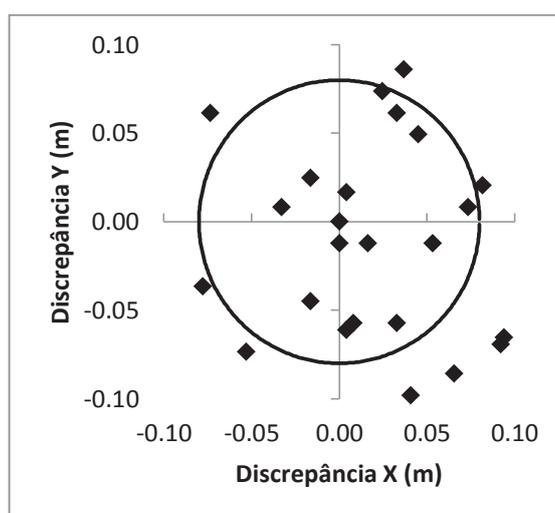
TABELA 6- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 6,0 | 6,6 | 8,9 |
| Máximo | 11,4 | 11,8 | 13,4 |
| Média | 0,6 | -0,06 | 8,12 |
| Mínimo | -13,1 | -11,0 | 0,00 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,772 | 0,239 | |
| Tendência t | 0,573 | 0,958 | |

FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 2 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas em relação a uma circunferência de raio igual à tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Ainda que se admita o EQM da resultante planimétrica como dentro limiar estabelecido, ao nível de confiança de 95%, verifica-se que 54% das discrepâncias extrapolam este limiar. Na análise do Ortomosaico, ainda que tenha sido empregado um maior número de pontos de verificação, a percentagem de discrepâncias planimétricas que não se enquadra à tolerância planimétrica é praticamente a mesma que foi obtida na avaliação da nuvem de pontos (54,5%).

GRÁFICO 2- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.1.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%

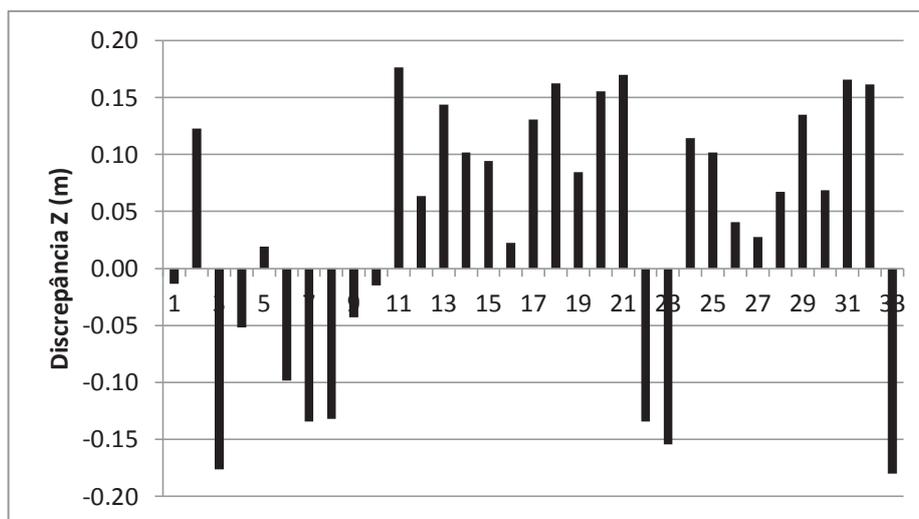
A verificação da exatidão altimétrica do MDT resultante da filtragem da nuvem de pontos, obtida pelo processo fotogramétrico SFM, foi realizada com base nas posições planimétricas de 33 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. Os valores de altimetria destes 33 pontos foram obtidos por interpolação junto ao MDT correspondente empregando o modelo bilinear. As coordenadas altimétricas obtidas a partir do MDT, são comparadas com os valores derivados de observações GNSS. A TABELA 7- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%. mostra as métricas e estatísticas obtidas a partir do cálculo das discrepâncias altimétricas. A média das discrepâncias, diferente de zero, sugere não normalidade dos dados. Fato este comprovado pela reprovação junto ao teste estatístico de normalidade ($0,007 < 0,05$) ao nível de confiança de 95%. O valor do EQM das discrepâncias altimétricas possui uma magnitude acima do limiar estabelecido ($11,7 > 10$ cm). Entretanto, o teste estatístico t, ao nível de confiança de 95%, comprova que o valor EQM das discrepâncias pode ser aceito dentro da tolerância altimétrica admissível ($10 \text{ cm} = 2,5 \text{ GSD}$). Por conta da reprovação junto ao teste de normalidade, a aplicação do teste t para detecção de tendência é inviabilizada. No GRÁFICO 3 é apresentado a distribuição das discrepâncias altimétricas, podendo ser constatado a existência de uma tendência positiva na amostra. Apesar do EQM das discrepâncias (exatidão altimétrica) ser aceito dentro da tolerância altimétrica admissível (10 cm) ao nível de 95% de confiança, 57% das discrepâncias altimétricas são superiores a tolerância altimétrica estabelecida.

TABELA 7- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 11,7 |
| Máximo | 17,6 |
| Média | 3,6 |
| Mínimo | -13,0 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,007 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 3- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.1.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR)

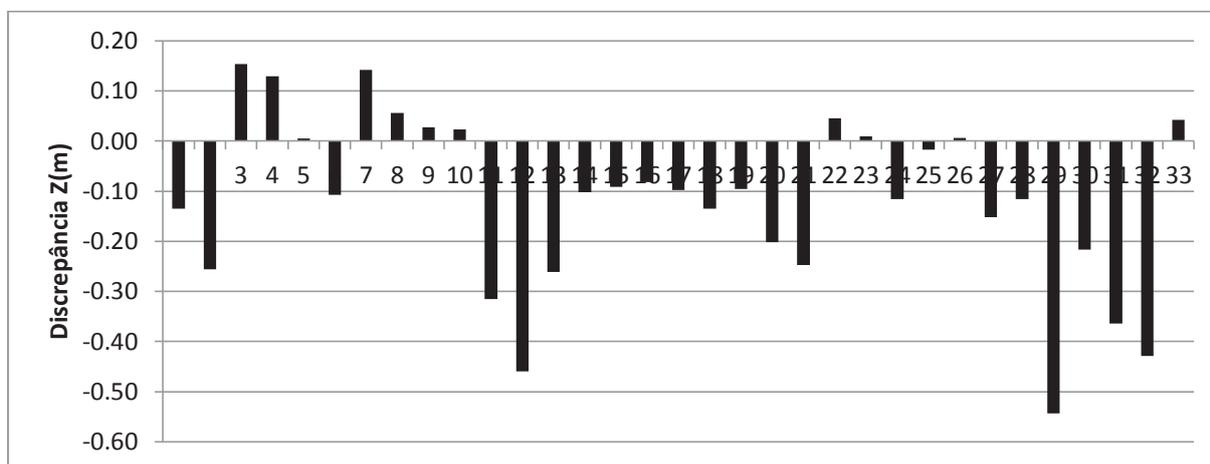
Uma segunda verificação do MDT, obtido com o procedimento fotogramétrico SFM, foi realizada com base em um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado. As coordenadas altimétricas de um conjunto de pontos, obtidas a partir do MDT fotogramétrico SFM, cuja imprecisão é $\pm 10\text{cm}$, são comparadas com as coordenadas altimétricas do mesmo conjunto de pontos, porém interpoladas a partir do MDT LIDAR ($\pm 10\text{cm}$). O conjunto de pontos, empregado nessa verificação, é o mesmo que foi utilizado na verificação anterior (item 4.3.1.3). A TABELA 8 mostra os valores das métricas e estatísticas obtidas a partir das discrepâncias entre ambos os MDTs nos pontos de verificação. O EQM das discrepâncias apresentou valor de 20,7 cm. Valor este que pode ser admitido se considerado que ambos os modelos de elevação possuem imprecisões de $\pm 10\text{cm}$. Analisando a média das discrepâncias, verifica-se um valor positivo diferente de zero, indicando uma provável distribuição anormal da amostra. Entretanto, a condição de normalidade é comprovada pelo teste estatístico SW ($p\text{-valor} > 0,05$). Já a hipótese de inexistência de tendência é rejeitada pelo $p\text{-valor}$ do teste t, com o nível de confiança de 95% ($p\text{-valor} < 0,05$). Uma visualização da distribuição das discrepâncias bem como uma tendência negativa, pode ser verificada no GRÁFICO 4.

TABELA 8- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|--------------------|-----------------------|
| EQM | 20,7 |
| Máximo | 15,4 |
| Média | 11,8 |
| Mínimo | -54,4 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,2003 |
| Teste de tendência | 0,0004 |

FONTE: O autor (2019).

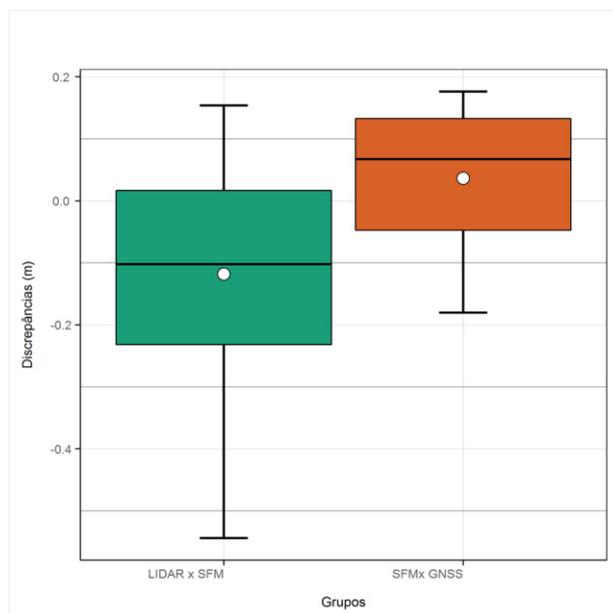
GRÁFICO 4- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 5 mostra um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Verifica-se que a discrepância resultante da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS (a esquerda) apresenta grau de similaridade com as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR (a direita), apesar de uma tendência nas discrepâncias da comparação entre MDT SFM e LIDAR. Desta forma, considerando as imprecisões dos MDTs, é possível aceitar que ambos os MDTs possuem exatidões similares.

GRÁFICO 5- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.2 Aerolevanteamento a 100 m com fotos verticais. Recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.

Como mencionado no item 4.2, este voo resultou em percentagens de recobrimento distintas das planejadas. Efetivamente foi obtido um recobrimento longitudinal de 75% e lateral de 67% totalizando 248 imagens com um GSD médio próximo de 4,0 cm. Para a determinação dos POI na autocalibração também foi adotada a condição padrão do software Agisoft PhotoScan. A TABELA 9 mostra os POI obtidos e que, segundo o critério da magnitude do desvio padrão “ σ ”, todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 9- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|-------------|---------------|
| C | 3,6294 | 0,0005 |
| x_0 | -0,0225 | 0,0000 |
| y_0 | 0,0082 | 0,0001 |
| K1 | 1,1654E-03 | 3,094E-06 |
| K2 | -1,2614E-04 | 5,087E-07 |
| K3 | 1,6586E-06 | 2,286E-08 |
| P1 | -3,1008E-05 | 5,242E-07 |
| P2 | 4,6503E-05 | 6,731E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.2.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.

No processamento da nuvem de pontos com o SFM foram utilizados 21 pontos de apoio e 20 pontos de verificação. Na TABELA 10 é apresentado o resumo descritivo dos resíduos em 21 pontos de controle empregados para referenciar a nuvem de pontos. Verifica-se que o valor do EQM planimétrico (8,3 cm) foi o mesmo do recobrimento anteriormente descrito (TABELA 4). Seguindo a mesma comparação, o EQM altimétrico 13,2 cm foi 0,8 cm pior, também extrapolando a tolerância altimétrica de 2,5 GSD.

TABELA 10- Resumo dos resíduos. Experimento fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|-----------------------------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 4,9 | 6,7 | 13,2 | 8,3 |
| Máximo | 9,8 | 11,7 | 25,9 | 14,5 |
| Mínimo | -8,5 | -9,8 | -27,3 | 0,6 |
| RP= Resultante Planimétrica | | | | |

FONTE: O autor (2019).

A verificação da exatidão da nuvem de pontos obtida na etapa de processamento SFM, foi realizada com base na análise das discrepâncias tridimensionais em 20 pontos de verificação. Conforme TABELA 11, as exatidões planimétrica e altimétrica, representadas por valores de EQM das discrepâncias tridimensionais nos pontos de verificação, indicam magnitudes similares às precisões planimétrica e altimétrica, determinadas com os resíduos nos pontos de apoio. Apesar de valores de precisões e exatidões similares, verifica-se que o valor do EQM das discrepâncias altimétricas (exatidão altimétrica) encontra-se dentro do valor da tolerância admissível. Os valores das médias das discrepâncias tridimensionais “ ΔX ”, “ ΔY ” e “ ΔZ ”, diferentes de zero, indicam possível não normalidade e tendência nos resultados obtidos. Porém o respectivo p-valor do teste estatístico de normalidade, com um nível de confiança de 95%, comprova que se trata de amostras com distribuição normal e os p-valores do teste t, com o mesmo nível de confiança, comprovam a inexistência de tendência. O teste t com 95% de confiança comprova que o EQM planimétrico pode ser aceito dentro da tolerância planimétrica admissível de 2 GSD.

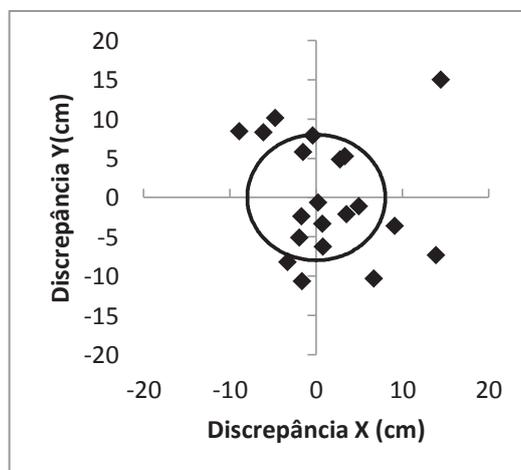
TABELA 11- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 6,1 | 7,3 | 9,5 | 9,4 |
| Máximo | 14,5 | 15,0 | 16,6 | 20,8 |
| Média | 1,5 | 0,2 | 0,9 | 8,3 |
| Mínimo | -8,9 | -10,6 | -17,5 | 0,7 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,377 | 0,343 | 0,400 | |
| Tendência t | 0,279 | 0,898 | 0,697 | |

FONTE: O autor (2019).

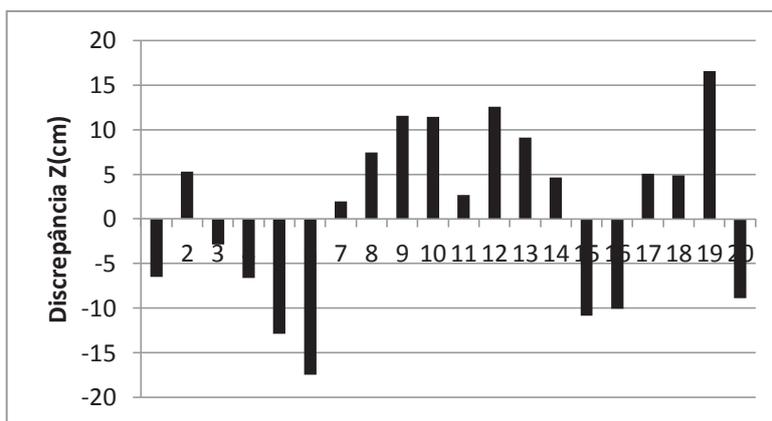
A distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser observada no GRÁFICO 6. O círculo representa a tolerância de 2 GSD (8,0 cm). Apesar o EQM planimétrico calculado (9,4 cm) ser aceito dentro da tolerância admissível, ao nível de confiança de 95%, verifica-se que 45% das discrepâncias planimétricas não se encontram dentro desta tolerância. O GRÁFICO 7 mostra a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação, confirmando a inexistência de tendência na amostra. Apesar da exatidão altimétrica (EQM 9,5 cm) das discrepâncias ser menor que a tolerância altimétrica admissível (2,5 GSD = 10 cm), 40% das discrepâncias altimétricas são superiores a tolerância estabelecida. O mesmo fenômeno de degradação altimétrica, por conta do número de raios que determinam o ponto, descrito anteriormente, é observado no presente caso.

GRÁFICO 6- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

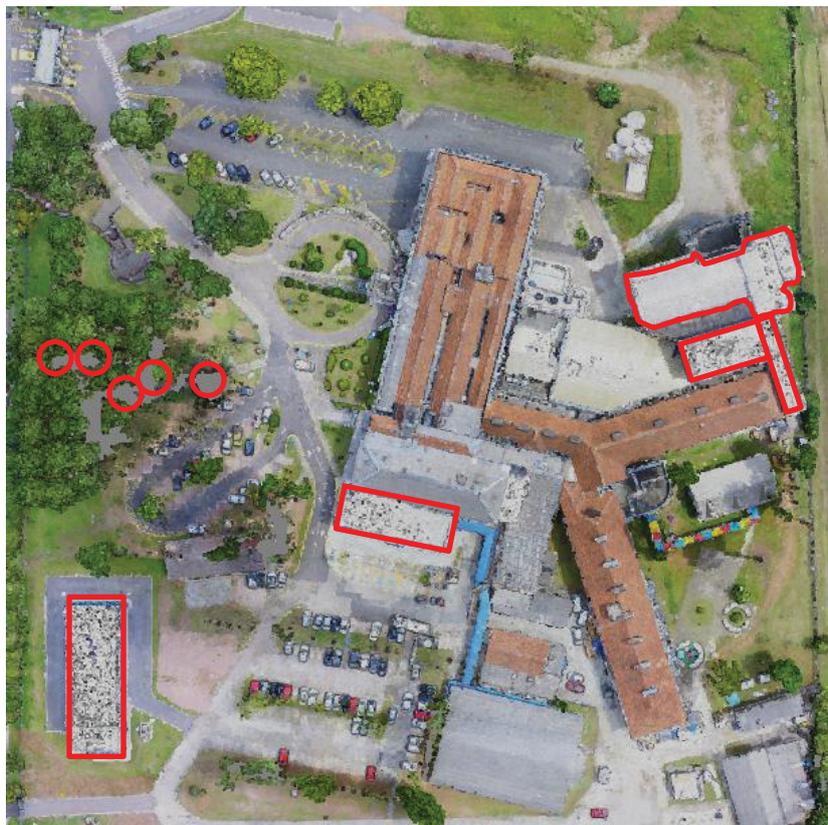
GRÁFICO 7- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

A inspeção visual da qualidade da nuvem de pontos na reconstrução tridimensional dos objetos, previamente descrita, também foi aplicada para este conjunto de dados. Como no experimento anterior, considera-se na área teste a existência de 60 árvores e 19 edificações. Na FIGURA 17 é possível constatar que aproximadamente 8% das árvores não foram reconstruídas. Nota-se também que aproximadamente 21% dos telhados da cena não foram reconstruídos corretamente (textura sólida). Consultando a nuvem esparsa de pontos, que deu origem a nuvem densa, observou-se que esses locais possuem deficiência de preenchimento por pontos. Considerando os resultados obtidos no experimento anterior percebe-se que o uso de um maior recobrimento longitudinal não promoveu melhores resultados já que os objetos com problemas de reconstrução foram os mesmos. A causa provável dessa deficiência é a dificuldade do algoritmo na medição de pontos homólogos em áreas homogêneas (sem contraste).

FIGURA 17 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Vertical (RLO 80% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.2.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.

Para análise da exatidão planimétrica do Ortomosaico foram empregados 34 pontos de verificação. Calculadas as discrepâncias ΔX e ΔY dos 34 pontos e posteriormente as métricas e estatísticas de cada conjunto de dados, apresentam-se na TABELA 12 os resultados obtidos. Para o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$) não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das componentes planimétricas (p -valor $> 0,05$). Estabelecendo o valor de 2 GSD para a exatidão planimétrica admissível, a exatidão obtida com base no EQM das resultantes planimétricas (8,5 cm) é similar ao valor de exatidão planimétrica que foi obtida na nuvem de pontos. Igualmente, o teste t com 95% de confiança comprova que o EQM planimétrico, obtido das discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação no ortomosaico, pode ser aceito dentro da tolerância planimétrica admissível de 2 GSD.

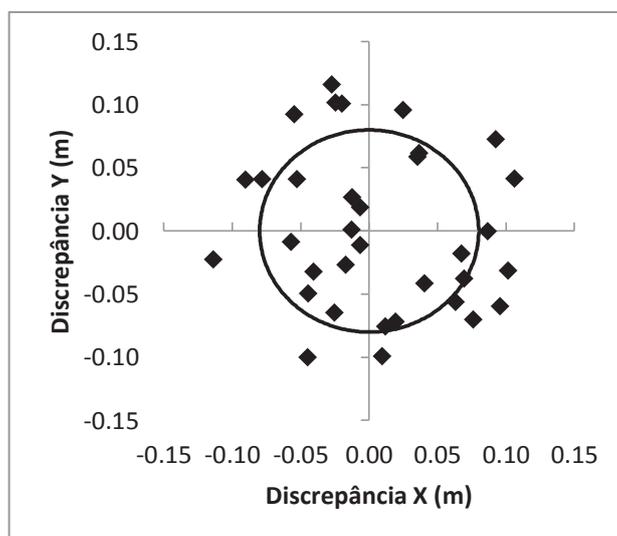
TABELA 12- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 5,9 | 6,1 | 8,5 |
| Máximo | 0,106 | 0,116 | 11,9 |
| Média | 0,006 | 0,001 | 7,9 |
| Mínimo | -0,114 | -0,100 | 1,3 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,371 | 0,176 | |
| Tendência t | 0,542 | 0,933 | |

FONTE: O autor (2019).

Uma distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser verificada no GRÁFICO 8. O círculo representa a tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Apesar o EQM planimétrico calculado ser aceito dentro da tolerância admissível ao nível de confiança de 95%, verifica-se que 50% das discrepâncias planimétricas não se encontram dentro do limite planimétrico admissível. Apesar de ser utilizado um número de pontos de verificação 85% maior, a percentagem de discrepâncias planimétricas que não se enquadra é praticamente a mesma que foi obtida na avaliação da nuvem de pontos (45%).

GRÁFICO 8- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.2.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%

O MDT resultante da processo fotogramétrico SFM teve sua exatidão altimétrica verificada com base nas posições planimétricas de 34 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. Os respectivos valores altimétricos foram obtidos de forma análoga ao item 4.3.1.3. A TABELA 13 mostra os valores estatísticos obtidos das análises das discrepâncias altimétricas. Apesar da média das discrepâncias altimétricas não ser igual a zero, a condição de normalidade e a inexistência de tendência são comprovadas pelo p-valor do teste estatístico correspondente, com o nível de confiança de 95%. O valor EQM igual a 12,8 cm encontra-se acima do limiar estabelecido 2,5 GSD (10 cm). Entretanto, o teste estatístico t comprova que o valor EQM obtido pode ser aceito dentro da tolerância admissível.

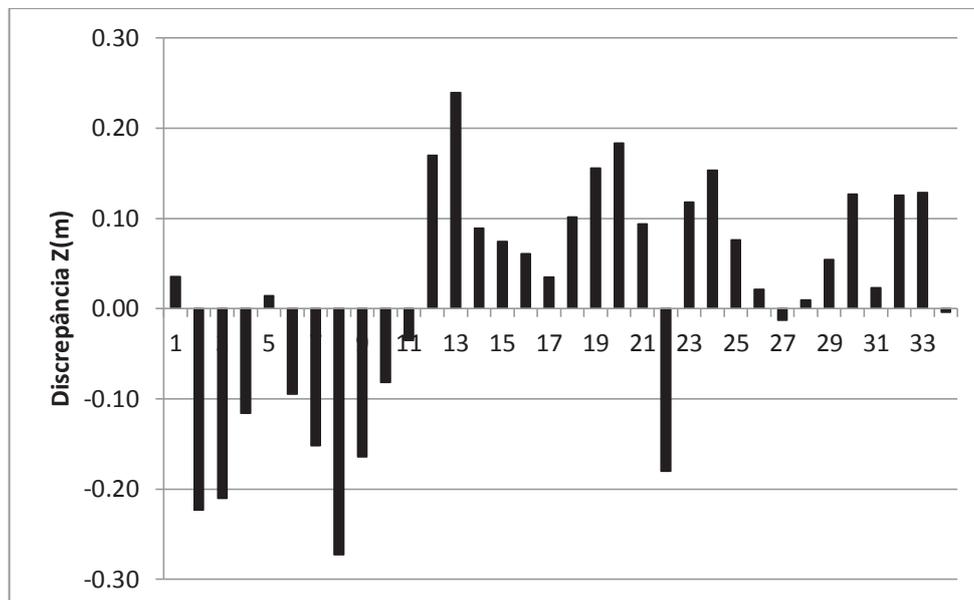
TABELA 13- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | ΔZ(cm) |
|---------------------|----------------------------------|
| EQM | 12,8 |
| Máximo | 24,0 |
| Média | 1.6 |
| Mínimo | -27,3 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,131 |
| Tendência t | 0,476 |

FONTE: O autor (2019).

A distribuição das discrepâncias pode ser visualizada no GRÁFICO 9, o qual também mostra a inexistência de tendência. Apesar da magnitude do EQM ser aceita dentro da tolerância altimétrica admissível ao nível de 95% de confiança, 50% das discrepâncias ultrapassaram a tolerância estabelecida.

GRÁFICO 9- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.2.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos verticais, RLO 80% e RLA 75% com MDT (LIDAR)

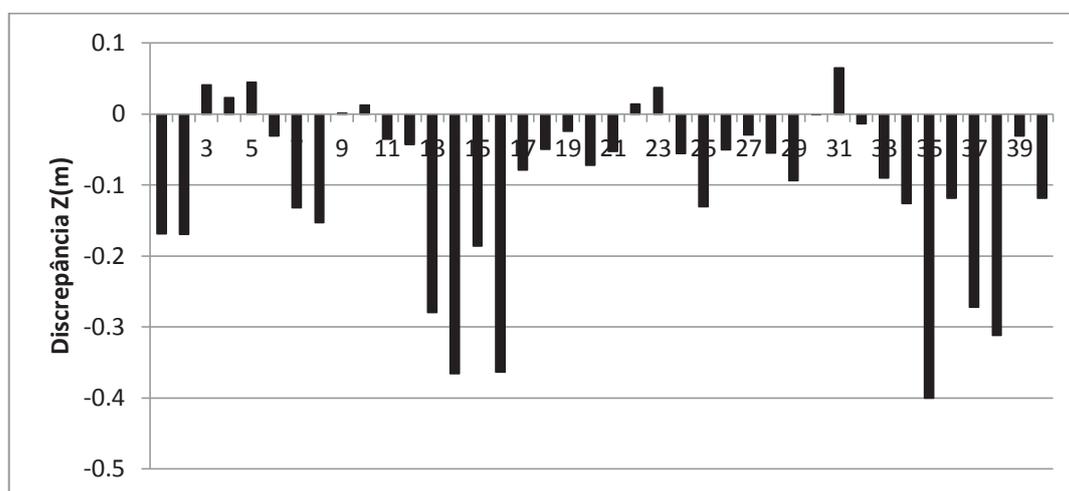
A segunda verificação do MDT SFM é feita com o MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado. A TABELA 14 mostra os valores estatísticos obtidos das análises das discrepâncias altimétricas em 33 pontos de verificação. A média das discrepâncias se afasta de zero indicando uma provável distribuição anormal da amostra e a existência de tendência. Entretanto, a condição de normalidade é comprovada pelo teste estatístico de SW. Já o p-valor do teste t, com o nível de confiança de 95%, comprova a existência de tendência, o que pode visualmente verificado no GRÁFICO 10. Como pode ser visto na TABELA 14, o valor do EQM das discrepâncias altimétrica, obtida da comparação dos MDTs, apresentou valor de 16,4 cm. Valor este que pode ser admitido como dentro da exatidão esperada, pois ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de 10 cm.

TABELA 14- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|--------------------|-----------------------|
| EQM | 16,4 |
| Máximo | 20,0 |
| Média | -7,5 |
| Mínimo | -32,8 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,246 |
| Teste de Tendência | 0,005 |

FONTE: O autor (2019).

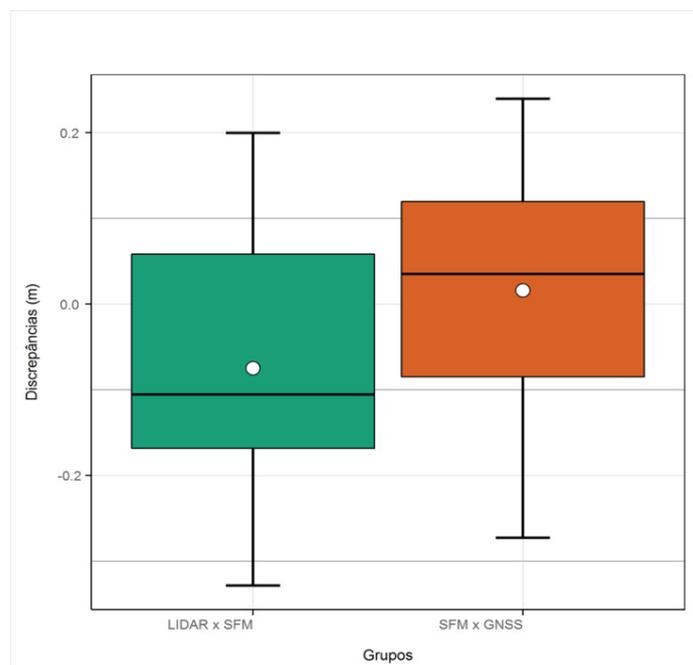
GRÁFICO 10- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 11 mostra um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Verifica-se que as discrepâncias resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS é similar as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR, apesar de uma pequena tendência resultante da comparação entre MDT SFM e LIDAR. Desta forma, pode admitir que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 11- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.3 Aerolevanteamento a 100 m com fotos verticais, faixas cruzadas. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.

As análises que se seguem são resultantes do processamento de um bloco contendo 219 imagens provenientes de dois levantamentos aéreos realizados com direções cruzadas (aproximadamente Norte/Sul e Leste/Oeste). Ambos a 100 m do solo com recobrimento longitudinal e lateral de 60% e 75% respectivamente, resultando em um GSD médio de aproximadamente 4,0 cm. Igualmente aos outros experimentos realizados, a configuração padrão de POI do software Agisoft PhotoScan foi adotada. Os POI resultantes da autocalibração são apresentados na TABELA 15. Conforme o critério da magnitude do desvio padrão “ σ ”, empregado para a análise da significância dos parâmetros, conclui-se que todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 15- POI determinado na autocalibração no experimento faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|-------------|---------------|
| C | 3,6368 | 0,0006 |
| x_0 | -0,0254 | 0,0001 |
| y_0 | 0,0115 | 0,0001 |
| K1 | 1,2687E-03 | 4,470E-06 |
| K2 | -1,4730E-04 | 7,552E-07 |
| K3 | 2,6893E-06 | 3,546E-08 |
| P1 | 4,6353E-05 | 8,781E-07 |
| P2 | -1,6941E-05 | 3,457E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.3.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m – faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

No processamento da nuvem de pontos com o SFM foram utilizados 21 pontos de controle e 19 pontos de verificação. Na TABELA 16 é apresentado o resumo descritivo dos resíduos planialtimétricos em 21 pontos de controle empregados para referenciar a nuvem de pontos. Os valores de EQM planimétrico (2,8 cm) e altimétrico (6,8 cm) foram os menores valores obtidos até o momento. Ambos os valores são inferiores da tolerância estabelecida (2 GSD para planimetria e 2,5 GSD para altimetria).

TABELA 16- Resumo dos resíduos. Experimento faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 2,0 | 2,0 | 6,8 | 2,8 |
| Máximo | 5,2 | 4,7 | 6,0 | 6,4 |
| Mínimo | -4,4 | -2,8 | -15,2 | 0,6 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

A análise das discrepâncias tridimensionais em 19 pontos fornecem as métricas e estatísticas empregadas na verificação da exatidão da nuvem de pontos obtida na etapa de processamento SFM. Conforme TABELA 17, as exatidões planimétrica e altimétrica, representadas por valores de EQM das discrepâncias,

refletiram as baixas magnitudes das precisões planimétrica e altimétrica (EQM dos resíduos nos pontos de apoio). Verifica-se que o tanto o valor do EQM da resultante planimétrica quanto o EQM altimétrico (exatidões planimétrica e altimétrica) encontra-se próximo à metade do valor da tolerância admissível. Os valores das médias das discrepâncias tridimensionais “ ΔX ”, “ ΔY ” e “ ΔZ ”, diferentes de zero, sugerem a existência de uma distribuição não normal e tendência nos resultados obtidos. Entretanto, os p-valores dos testes estatísticos de normalidade e de tendência, com um nível de confiança de 95%, atestam que as amostras possuem distribuições normais e são isentas de tendências.

TABELA 17- Resumo das discrepâncias. Experimento faixas cruzadas, fotos verticais, RLO 60% e RLA 75%.

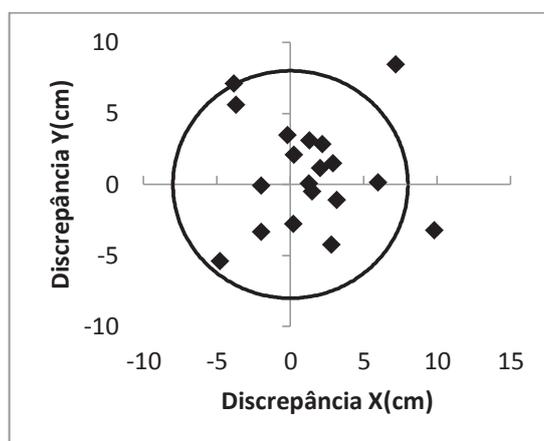
| Métricas | ΔX(cm) | ΔY(cm) | ΔZ(cm) | RP (cm) |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| EQM | 3,9 | 3,8 | 4,9 | 5,4 |
| Máximo | 9,8 | 8,4 | 11,4 | 11,1 |
| Média | 1,3 | 0,8 | 1,4 | 4,6 |
| Mínimo | -4,8 | -5,4 | -9,6 | 1,3 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,602 | 0,863 | 0,288 | |
| Tendência t | 0,158 | 0,390 | 0,205 | |

FONTE: O autor (2019).

A distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser observada no GRÁFICO 12, o qual demonstra que apenas três dos 19 valores extrapolaram a tolerância de 8,0 cm (aproximadamente 15%).

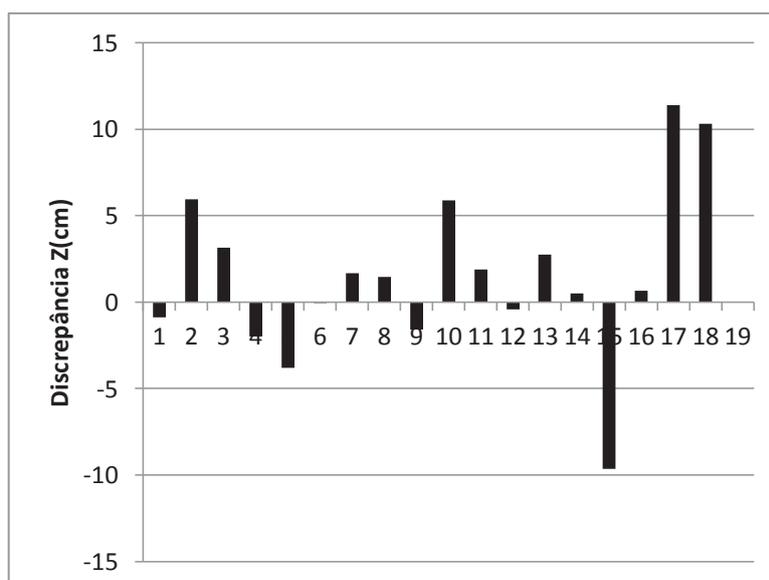
No GRÁFICO 13 visualiza-se a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Apesar do teste estatístico validar a inexistência de tendência é possível verificar um pequeno acúmulo de valores positivos nas discrepâncias. Verifica-se que o valor do EQM altimétrico é inferior aos previamente obtidos nos experimentos anteriores e mesmo assim, 10% dos valores das discrepâncias extrapolaram a tolerância de 2,5 GSD. Desta forma, conclui-se que a utilização de faixas cruzadas aumentou a exatidão altimétrica do experimento realizado.

GRÁFICO 12- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 13- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.

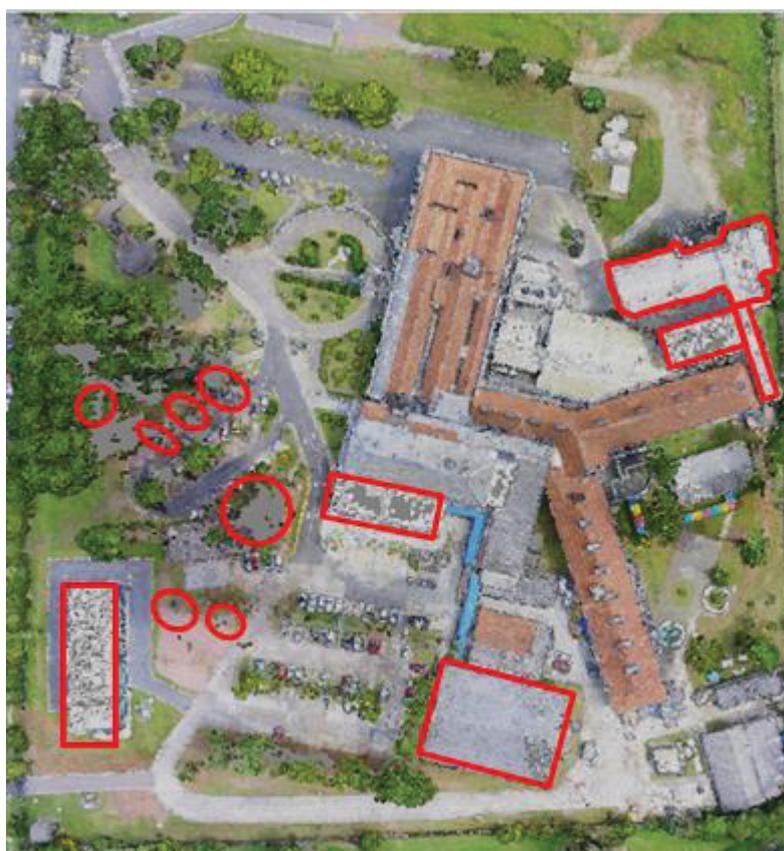


FONTE: O autor (2019).

Conforme previamente descrito nos experimentos anteriores, foi realizada uma verificação visual da qualidade da reconstrução de objetos, a partir da nuvem de pontos. Considerando a existência de 60 árvores e 19 edificações na FIGURA 18, constata-se que aproximadamente 12% das árvores não foram reconstruídas corretamente enquanto que ocorrências envolvendo edificações representam 26% do total estabelecido. Comparando o desempenho obtido com os resultados de experimentos anteriores, verifica-se que falhas de reconstrução são recorrentes em

algumas edificações e árvores. Neste caso, apesar do valor numérico do EQM altimétrico ter sido reduzido em aproximadamente 50%, a utilização de faixas cruzadas não conseguiu mitigar os problemas de reconstrução dos objetos apontados. O algoritmo continua tendo dificuldades na detecção de pontos homólogos em áreas homogêneas (sem contraste).

FIGURA 18 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Vertical, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.3.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos verticais faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%

Para análise da exatidão planimétrica do Ortomosaico foram empregados 35 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 18 as métricas e estatísticas obtidas a partir das discrepâncias ΔX e ΔY nos pontos de verificação. Para o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$) não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras (p -valor $> 0,05$). Verifica-se que a exatidão planimétrica obtida a partir do EQM das

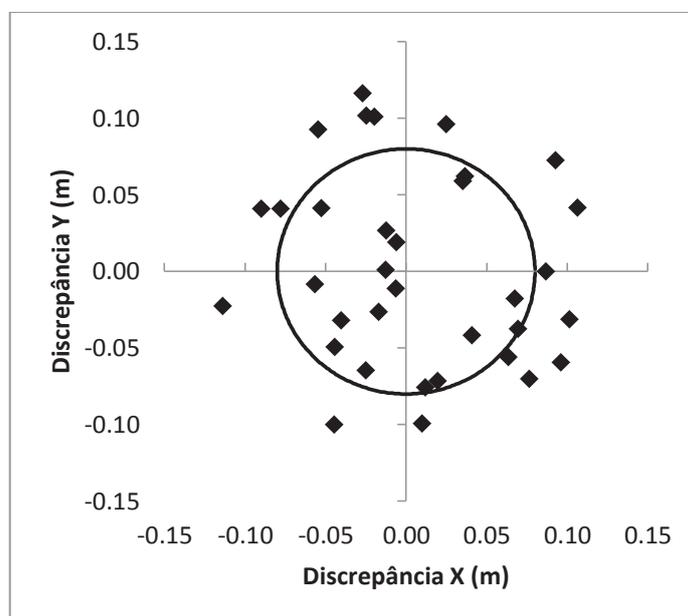
resultantes planimétricas (5,1 cm), é inferior a tolerância planimétrica admissível de 2 GSD. O aumento da exatidão planimétrica demonstrada pela redução na magnitude do EQM, é um reflexo da utilização de faixas de voo cruzadas, percebido já na análise da nuvem de pontos. Uma distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser verificada no GRÁFICO 14.

TABELA 18- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 3,6 | 3,7 | 5,1 |
| Máximo | 7,4 | 8,2 | 8,7 |
| Média | 0,8 | -0,3 | 4,5 |
| Mínimo | -7,4 | -8,2 | 0,0 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,574 | 0,753 | |
| Tendência t | 0,184 | 0,628 | |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 14- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

A tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm), representada pela circunferência mostra que apesar do EQM planimétrico calculado ser aceito dentro da tolerância admissível, verifica-se que 11% das discrepâncias planimétricas não se

encontram dentro do limite planimétrico admissível. Esta percentagem apresenta magnitude semelhante à obtida para as discrepâncias planimétricas que não se enquadraram na tolerância admissível na avaliação da nuvem de pontos (15,8%). Este recobrimento com faixas cruzadas, em relação em relação à tolerância de 8,0 cm, apresenta uma melhora de desempenho de aproximadamente 36% na magnitude do EQM das resultantes planimétricas (5,1 cm).

4.3.3.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%

A exatidão altimétrica, do MDT resultante da processo fotogramétrico SFM, foi verificada com base nas posições planimétricas de 34 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. A TABELA 19 mostra os valores estatísticos obtidos das análises das discrepâncias altimétricas. A condição de normalidade e a inexistência de tendência é comprovada pelo p-valor do teste estatístico correspondente, com o nível de confiança de 95%, ainda que o valor da média indique o contrário. O valor EQM igual a 7,7 cm encontra-se abaixo do limiar estabelecido 2,5 GSD (10 cm). A distribuição das discrepâncias pode ser visualizada no GRÁFICO 15, o qual também mostra a inexistência de tendência. Apesar da magnitude do EQM ser aceita dentro da tolerância altimétrica admissível ao nível de 95% de confiança, 25,7% das discrepâncias ultrapassam a tolerância estabelecida.

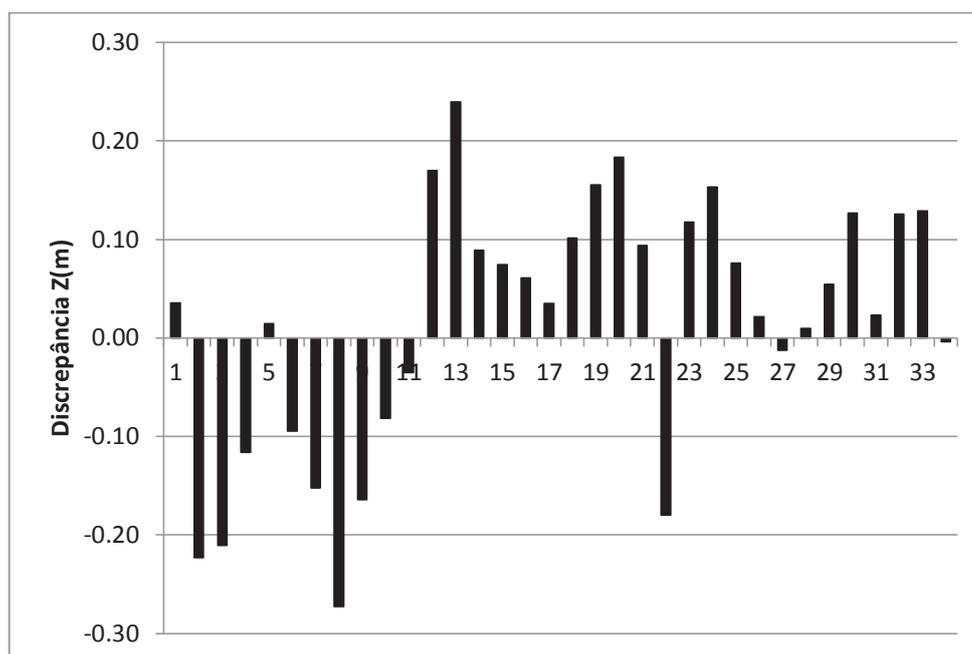
No presente recobrimento, com faixas cruzadas, houve uma melhora na exatidão altimétrica de aproximadamente 50%, em relação aos recobrimentos previamente discutidos.

TABELA 19- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | ΔZ(cm) |
|---------------------|----------------------------------|
| EQM | 7,7 |
| Máximo | 12,6 |
| Média | -1,8 |
| Mínimo | -14,6 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,214 |
| Tendência t | 0,166 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 15- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.3.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR).

Os resultados de uma segunda verificação do MDT SFM, empregando um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado são apresentados na TABELA 20. Dentre os 35 pontos de apoio, previamente empregados na verificação do Ortomosaico, percebeu-se que a discrepância altimétrica de um ponto possuía magnitude muito acima do valor tolerável. Analisando a posição no ortomosaico e no MDT LIDAR, foi constatado que a posição foi modificada por acréscimo de solo (aterramento). Sendo assim a discrepância referente a esta posição foi removida das análises, resultando em 34 pontos de verificação. A média das discrepâncias -6,6cm indica a existência de tendência e uma provável distribuição anormal da amostra. Fato que pode ser comprovado de forma visual no GRÁFICO 16. O p-valor do teste de normalidade com o nível de confiança de 95% permite rejeitar a hipótese de normalidade da amostra analisada. Por conta do não cumprimento do pré-requisito de normalidade, a verificação estatística da tendência por meio do teste t é inviabilizada. Neste caso aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon para a média das discrepâncias tomadas em módulo. Testa-se ao nível de confiança de

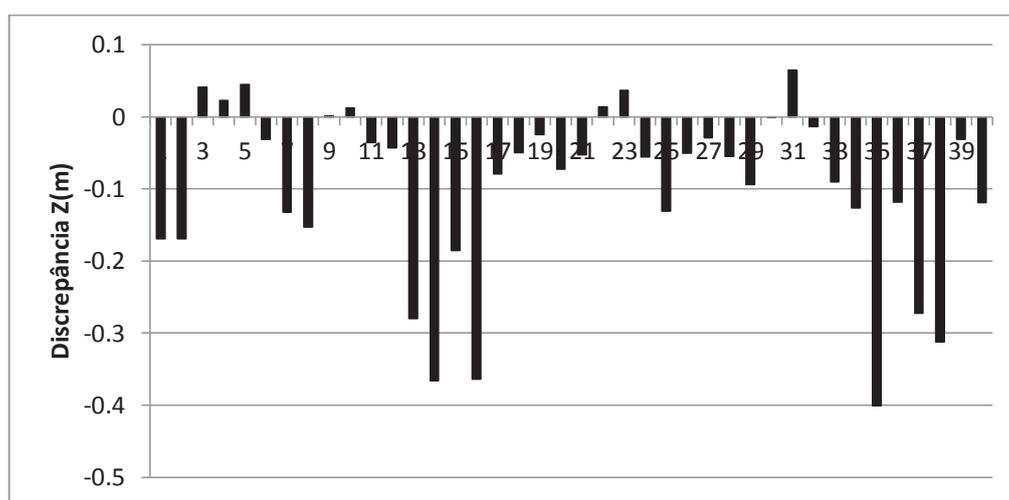
95%, se a média populacional é menor ou igual à tolerância admissível de 10 cm. O resultado do teste de Wilcoxon (0,104) corrobora com a hipótese que a média das discrepâncias encontra-se dentro do limiar estabelecido. Considerando que ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de 10 cm, o valor do EQM das discrepâncias altimétricas, obtido da comparação dos MDTs (12,2 cm) pode ser admitido como dentro da exatidão esperada.

TABELA 20- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|-------------------|-----------------------|
| EQM | 12,2 |
| Máximo | 12,4 |
| Média | -6,6 |
| Mínimo | -35,2 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,039 |
| Teste de Wilcoxon | 0,104 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 16- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.

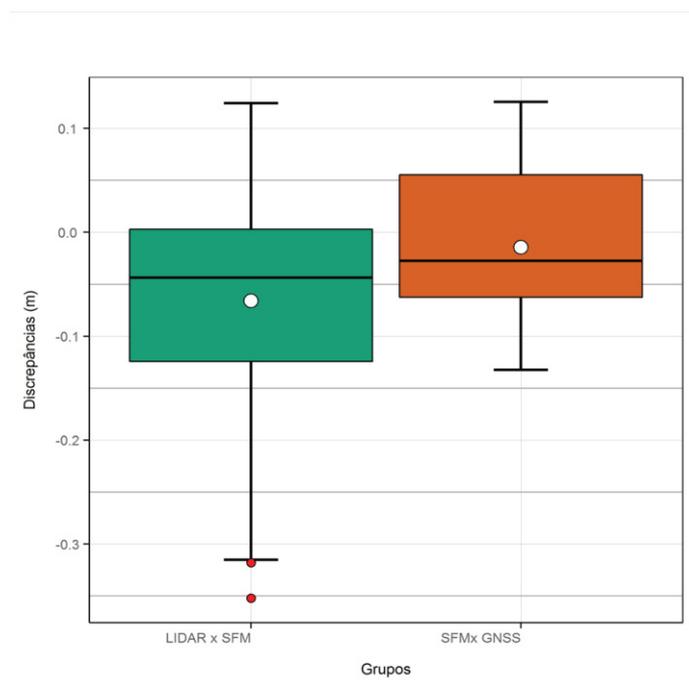


FONTE: O autor (2019).

Um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs pode ser visualizado no GRÁFICO 17. Verifica-se que as discrepâncias resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS é similar as discrepâncias

entre MDT SFM e LIDAR. Todavia a existe uma tendência resultante da comparação entre MDT SFM e LIDAR. Desta forma, pode-se admitir que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 17- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.4 Aerolevantamento a 100 m com fotos Inclínadas. Recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.

As análises que se seguem são resultados do processamento de um bloco contendo 302 imagens inclinadas (aproximadamente 10° em relação a vertical) e faixas de voo cruzadas (aproximadamente Leste/Oeste) a 100 m do solo. O avanço da tecnologia VANT no mapeamento fotogramétrico tem aumentado o interesse pelo uso de imagens inclinadas. Devido à característica geométrica desse tipo de imagem, inúmeras discussões sobre o GSD são verificadas em publicações científicas. Xie *et al.*(2016) apresentam as características geométricas de imagens inclinadas e as dificuldades de trabalho na Fotogrametria. Falam ainda nos esforços realizados no sentido de ponderar formas de distribuir os erros nas imagens já que os pixels se apresentam com escalas e formas distintas (forma trapezoidal). Maiores

detalhes sobre a geometria de fotos inclinadas e os efeitos da distorção perspectiva podem ser verificados em Kraus (2007). Por simplificação, o GSD médio adotado para as análises deste tópico será 4,0 cm.

Na TABELA 21 são apresentados os POI, resultantes da configuração padrão do software Agisoft PhotoScan. Empregando a metodologia da análise da significância dos parâmetros a partir da magnitude do desvio padrão " σ ", discutida anteriormente, verifica-se que todos os parâmetros foram significativos na autocalibração realizada.

TABELA 21- POI determinado na autocalibração no experimento, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|-------------|---------------|
| C | 3,6481 | 0,0013 |
| x_0 | -0,027 | 0,0001 |
| y_0 | 0,0223 | 0,0006 |
| K1 | 1,2619E-03 | 9,065E-06 |
| K2 | -1,4467E-04 | 1,554E-06 |
| K3 | 2,6088E-06 | 7,347E-08 |
| P1 | 5,3159E-05 | 1,847E-06 |
| P2 | -1,6309E-05 | 6,945E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.4.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

Na obtenção da nuvem de pontos, por metodologia SFM, foram empregados para a análise da exatidão 21 pontos de controle e 18 pontos de verificação. Na TABELA 22 apresenta-se o resumo descritivo dos resíduos planimétricos e altimétricos nos 21 pontos de controle empregados para referenciar a nuvem de pontos. Os valores de EQM planimétrico (4,2 cm) e altimétrico (7,7 cm) foram inferiores às tolerâncias estabelecidas (2 GSD para planimetria e 2,5 GSD para altimetria). As magnitudes dos EQM das resultantes planimétricas e EQM altimétrico são em geral 50% menores que os voos na condição vertical, com exceção do voo na condição cruzada.

TABELA 22- Resumo dos resíduos. Experimento fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| EQM | 3,0 | 3,0 | 7,7 | 4,2 |
| Máximo | 5,5 | 4,4 | 8,4 | 9,5 |
| Mínimo | -5,9 | -9,2 | -20,2 | 0,3 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

A TABELA 23 apresenta as métricas e estatísticas empregadas na verificação da exatidão da nuvem de pontos obtida com processamento SFM. Os valores dos EQM planimétrico e altimétrico foram obtidos a partir das discrepâncias tridimensionais em 18 pontos de verificação. As exatidões planimétrica e altimétrica, representadas por valores de EQM das discrepâncias, são similares às reduções nas magnitudes dos EQM dos resíduos nos pontos de apoio (precisões planimétrica e altimétrica). Tanto o valor do EQM da resultante planimétrica quanto da altimetria (exatidões planimétrica e altimétrica) encontra-se inferiores ao valor da tolerância admissível (8 cm para a planimetria e 10 cm para a altimetria). Apesar das médias das discrepâncias tridimensionais indicarem anormalidade e tendência nas amostras, os p-valores dos testes estatísticos de normalidade e de tendência, com um nível de confiança de 95%, comprovam que as amostras possuem distribuição normal e são isentas de tendência.

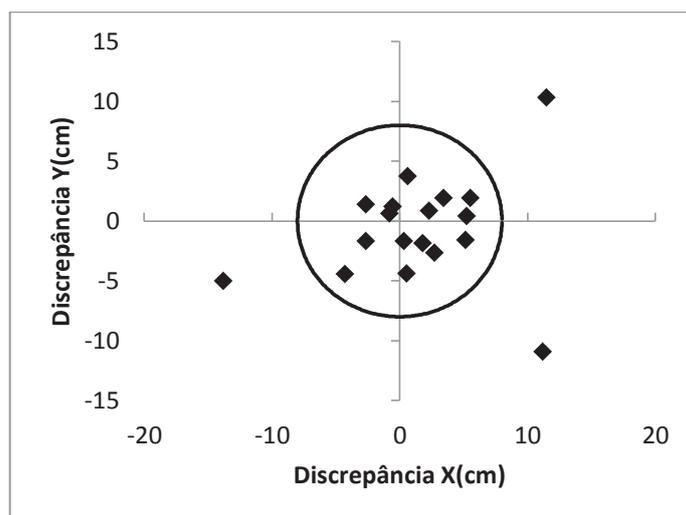
TABELA 23- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | ΔX(cm) | ΔY(cm) | ΔZ(cm) | RP (cm) |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| EQM | 5,7 | 4,3 | 8,4 | 7,2 |
| Máximo | 11,5 | 10,3 | 23,4 | 15,7 |
| Média | 1,4 | -0,7 | 1,0 | 5,5 |
| Mínimo | -13,8 | -10,9 | -12,5 | 1,0 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,219 | 0,255 | 0,391 | |
| Tendência t | 0,306 | 0,516 | 0,628 | |

FONTE: O autor (2019).

A distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser observada no GRÁFICO 18, o qual mostra que três dos 18 valores extrapolaram a tolerância de 8,0 cm (aproximadamente 17%).

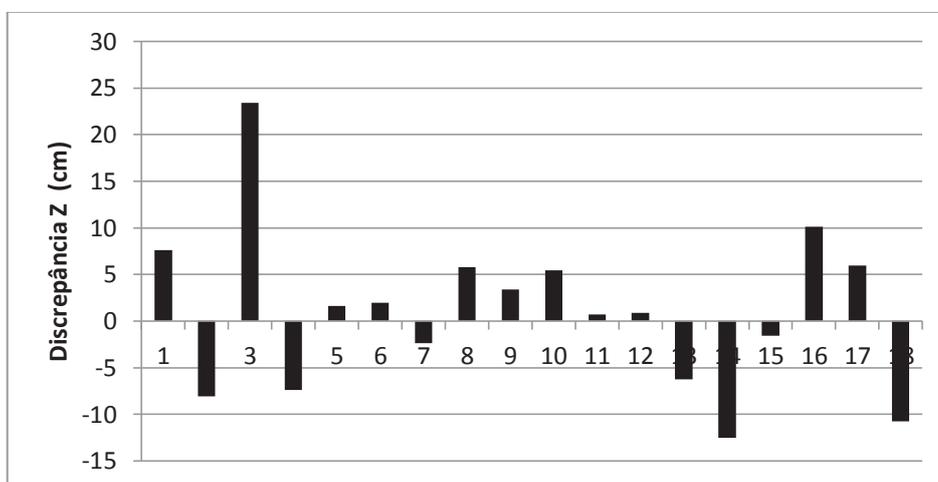
GRÁFICO 18- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Referente à altimetria, apesar da comprovação estatística, é possível visualizar no GRÁFICO 19 um pequeno acúmulo de valores positivos das discrepâncias e uma distribuição normal destes valores. Muito embora o EQM altimétrico seja menor que a tolerância altimétrica admissível ($8,4 \text{ cm} < 10 \text{ cm}$), 22% dos valores extrapolaram a tolerância de 2,5 GSD.

GRÁFICO 19- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Como já feito nos experimentos anteriores, foi realizada a inspeção visual da qualidade da nuvem de pontos na reconstrução tridimensional de objetos. No presente experimento foram detectadas falhas de reconstrução em aproximadamente 3% das árvores e 5% das edificações, conforme assinalado na FIGURA 19. As falhas ocorreram nas mesmas posições dos cenários anteriores (mesmas edificações e região vegetada), apesar de uma expressiva redução do problema.

A menor quantidade de luz, devido à ocorrência de nuvens no dia do aerolevanteamento, associada com a inclinação da câmera favoreceram de certa forma a diminuição de reflexão especular presente nos telhados. Isso diminuiu a homogeneidade das superfícies permitindo que o algoritmo de detecção automática de pontos tivesse maior sucesso.

Apesar da melhora, as falhas de reconstrução detectadas neste experimento e assinaladas FIGURA 19, continuaram a coincidir com as regiões de maior insucesso do algoritmo. Consultando com mais contundência a nuvem densa de pontos, verificou-se a existência de regiões com ausência de pontos, tanto no telhado assinalado quanto ao nível do solo próximo das árvores e não nas copas, a menos das que foram assinaladas. Considerando a percentagem de recobrimento longitudinal e lateral do experimento (80% RLO e 75%RLA), descarta-se a falta de recobrimento como a causa de falha do algoritmo em detectar pontos no nível do solo, entre as copas das árvores. Consultando as imagens que compõe o bloco fotogramétrico, foi possível verificar que nas regiões com vegetação densa e que, na nuvem de pontos apresentaram falhas ao nível do solo, eram regiões extremamente sombreadas. Desta forma, pode-se concluir que apesar da diminuição de áreas oclusas, por conta inclinação da câmera, o algoritmo continua tendo dificuldades na medição de pontos homólogos em áreas homogêneas (no caso, áreas sombreadas sem contraste).

FIGURA 19 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Inclinado (RLO 80% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.4.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

Para análise da exatidão planimétrica do Ortomosaico foram empregados 35 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 24- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Imagens inclinadas, RLO 80% e RLA 75%. as métricas e estatísticas obtidas a partir das discrepâncias ΔX e ΔY nos pontos de verificação e empregadas na verificação das exatidões. Para o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$) não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras (p -valor $> 0,05$). A exatidão obtida com base no EQM das resultantes planimétricas (6,5 cm), é inferior a tolerância planimétrica admissível de 2 GSD. Esta magnitude do valor de EQM é um reflexo da melhora na exatidão planimétrica do ortomosaico, produzida pelo uso de imagens inclinadas e igualmente verificada já na análise da nuvem de pontos (item anterior).

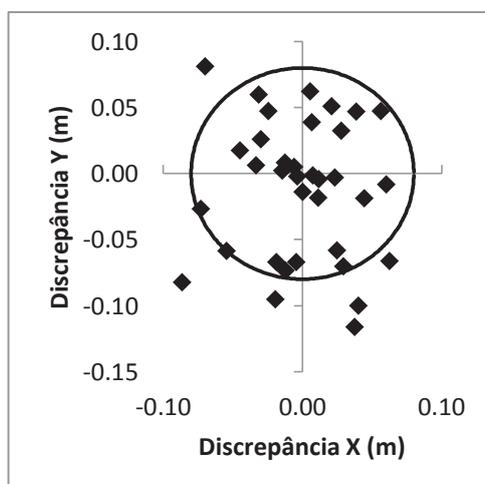
TABELA 24- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Imagens inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 3,7 | 5,3 | 6,5 |
| Máximo | 6,3 | 8,1 | 12,2 |
| Média | -0,1 | -1,2 | 5,6 |
| Mínimo | -8,6 | -11,6 | 0,4 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,659 | 0,217 | |
| Tendência t | 0,923 | 0,182 | |

FONTE: O autor (2019).

A distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser verificada no GRÁFICO 20. Verifica-se que apesar do EQM planimétrico calculado ser aceito dentro da tolerância admissível (8,0 cm, representada pela circunferência), 17% das discrepâncias planimétricas extrapolaram este limite de 2 GSD. Considerando os recobrimentos previamente analisados, verifica-se a existência de semelhança em relação à percentagem de discrepâncias planimétricas reprovadas na avaliação da nuvem de pontos (16,7%). Neste recobrimento com fotos inclinadas, verifica-se que houve melhora da exatidão planimétrica do ortomosaico em comparação aos obtidos a partir de voos verticais com faixas de voo convencionais.

GRÁFICO 20- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, Inclinado, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.4.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos Inclínadas, RLO 80% e RLA 75%.

A exatidão altimétrica do MDT resultante do processo fotogramétrico SFM foi verificada com base nas posições planimétricas dos 34 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. Os valores estatísticos e métricas obtidas das análises das discrepâncias altimétricas em relação às medidas GNSS, são apresentados na TABELA 25. A condição de normalidade é comprovada pelo p-valor do teste estatístico Shapiro Wilk (SW), com o nível de confiança de 95%. Entretanto, a hipótese de inexistência de tendência é rejeitada pelo p-valor do teste estatístico t, ao nível de confiança de 95%. O valor do EQM igual a 7,7 cm, que caracteriza a exatidão altimétrica do MDT, encontra-se abaixo do limiar estabelecido 2,5 GSD (10 cm).

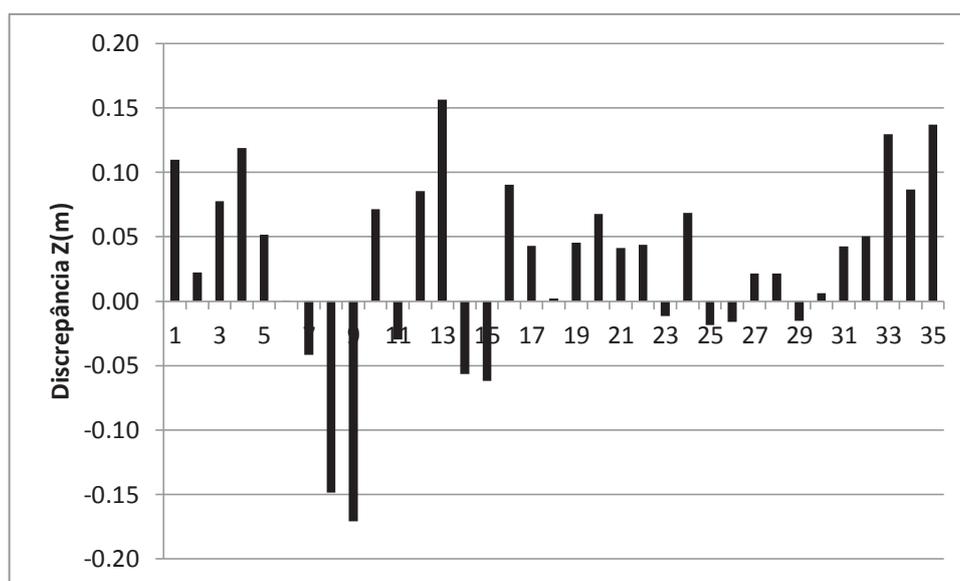
TABELA 25- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos Inclínadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | ΔZ(cm) |
|---------------------|----------------------------------|
| EQM | 7,7 |
| Máximo | 15,7 |
| Média | 2,9 |
| Mínimo | -17,1 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,174 |
| Tendência t | 0,023 |

FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 21 é possível visualizar a distribuição das discrepâncias altimétricas e uma predominância positiva de valores, o que se traduz na presença de uma tendência na amostra. Apesar da magnitude do EQM altimétrico ser aceita dentro da tolerância admissível ao nível de 95% de confiança, 25,7% das discrepâncias ultrapassam o limiar estabelecido.

GRÁFICO 21- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos Inclínadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Apesar de uma pequena tendência, verificada nas discrepâncias altimétricas, o experimento realizado com imagens inclinadas, demonstrou uma melhora de aproximadamente 50% na exatidão altimétrica do MDT obtido por SFM, em relação aos experimentos com fotos verticais previamente discutidos.

4.3.4.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos Inclinadas, RLO 80% e RLA 75% com MDT (LIDAR).

Os resultados de uma segunda verificação do MDT SFM, empregando um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado, são apresentados na TABELA 26. A mesma situação que acarretou na retirada de um ponto de verificação no item 4.3.3.4 se repete neste experimento. Desta forma, as discussões são fundamentadas na utilização de discrepâncias em 34 pontos de verificação. A média das discrepâncias igual a -12,5 cm corrobora com uma provável tendência na amostra além de uma possível anormalidade na distribuição. Fato que pode ser comprovado de forma visual no GRÁFICO 22- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%..

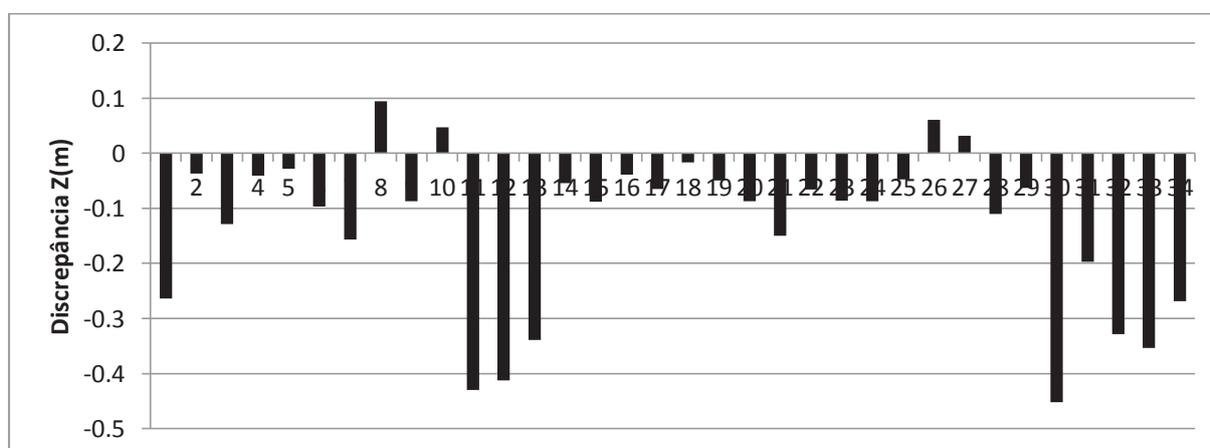
TABELA 26- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|-------------------|-----------------------|
| EQM | 19,2 |
| Máximo | 9,5 |
| Média | -12,5 |
| Mínimo | -45,2 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,004 |
| Teste de Wilcoxon | 0,761 |

FONTE: O autor (2019).

O resultado do teste estatístico com o nível de confiança de 95% permite rejeitar a hipótese de normalidade da amostra. Por conta do não atendimento a condição de normalidade, a aplicação do Teste t é inviabilizada. Sendo assim, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon para a média das discrepâncias, tomadas em módulo. Ao nível de confiança de 95% foi verificado que o EQM altimétrico 19,2 cm encontra-se dentro do intervalo de confiança para a média igual à tolerância altimétrica admissível de 10 cm. Considerando que ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de 10 cm, o valor do EQM das discrepâncias altimétricas (19,2 cm), obtida da comparação dos MDTs, pode ser admitido como dentro da exatidão esperada.

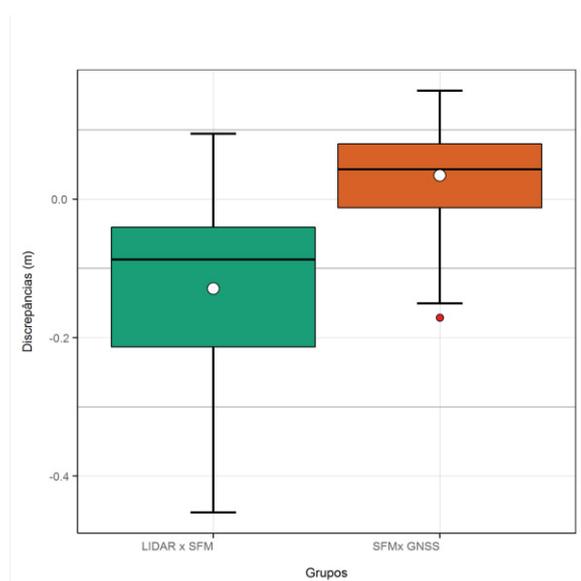
GRÁFICO 22- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs pode ser visualizado no GRÁFICO 23. Verifica-se que as discrepâncias resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS se apresenta com menor dispersão. O mesmo não ocorre as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR. Todavia, apesar de não haver equivalência na altura das caixas, a zona de abrangência dos grupos de discrepâncias (dispersão) permite considerar que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 23- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Inclinado, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.5 Aerolevanteamento a 100 m com fotos Inclinaadas. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.

Este experimento diz respeito ao reprocessamento do bloco anterior (item 4.3.4), porém considerando uma porcentagem de recobrimento longitudinal de 60%, resultando em um bloco com 160 imagens (redução de 48% em relação ao bloco original). O GSD médio adotado para as análises do experimento foi o mesmo do experimento anterior (4,0 cm).

Na TABELA 27 são apresentados os POI, resultantes da autocalibração com a configuração padrão do software Agisoft PhotoScan. Empregando a metodologia da análise da significância dos parâmetros a partir da magnitude do desvio padrão

“ σ ”, discutida anteriormente, verifica-se que somente o parâmetro P2 foi considerado não significativo, pois o desvio padrão é maior que o parâmetro que foi estimado na calibração.

TABELA 27- POI determinado na autocalibração no experimento, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|-------------|---------------|
| C | 3,6268 | 0,003 |
| x_0 | -0,0314 | 0,0003 |
| y_0 | 0,0108 | 0,0014 |
| K1 | 1,4958E-03 | 3,091E-05 |
| K2 | -1,8155E-04 | 5,423E-06 |
| K3 | 4,2005E-06 | 2,649E-07 |
| P1 | 1,3668E-04 | 5,006E-06 |
| P2 | 1,5230E-06 | 2,503E-06 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.5.1.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

O processamento da nuvem de pontos com o SFM empregou 21 pontos de controle e 17 pontos de verificação. A

TABELA 28 apresenta o resumo descritivo dos resíduos em 21 pontos de controle, empregados para referenciar a nuvem de pontos. Verifica-se que os valores de EQM planimétrico (2,5 cm) e altimétrico (3,0 cm) correspondem a menos da metade dos valores das tolerâncias estabelecidas (2 GSD para planimetria e 2,5 GSD para altimetria). As magnitudes dos EQM das resultantes planimétricas e EQM altimétrico são as melhores obtidas até então, ficando próximo apenas do recobrimento vertical com faixas cruzadas (item 4.3.3).

TABELA 28- Resumo dos resíduos. Experimento fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 1,8 | 1,7 | 3,0 | 2,5 |
| Máximo | 2,9 | 3,8 | 1,8 | 4,4 |
| Mínimo | -4,3 | -3,5 | -11,4 | 0,1 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

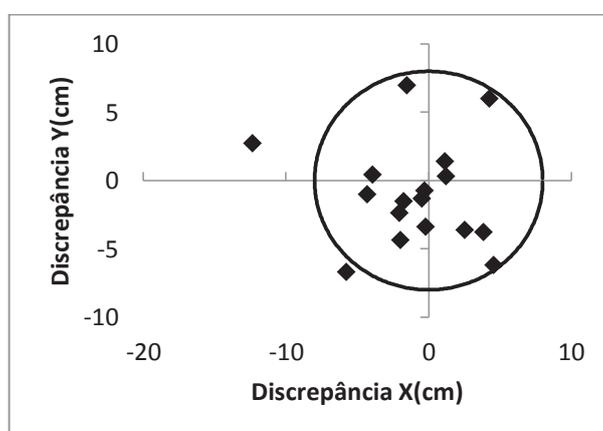
Na TABELA 29, As exatidões planimétrica e altimétrica, representadas por valores de EQM das discrepâncias, também refletiram as reduções nas magnitudes dos EQM dos resíduos nos pontos de apoio (precisões planimétrica e altimétrica). O valor das exatidões planimétrica (5,7 cm) e altimétrica (8,1 cm) são inferiores ao valor da tolerância admissível (8 cm para a planimetria e 10 cm para a altimetria). Os p-valores dos testes estatísticos, com um nível de confiança de 95%, comprovam que se trata de amostras com distribuição normal e isentas de tendência, ainda que as médias das discrepâncias indiquem o contrário. No GRÁFICO 24 é possível visualizar a distribuição das discrepâncias planimétricas e que aproximadamente 12% (2 pontos) extrapolaram a tolerância de 8,0 cm.

TABELA 29- Resumo das discrepâncias. Experimento fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 4,2 | 3,8 | 8,1 | 5,7 |
| Máximo | 4,6 | 7,0 | 12,5 | 12,7 |
| Média | -1,0 | -1,0 | 0,3 | 4,8 |
| Mínimo | -12,4 | -6,7 | -21,0 | 0,8 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,151 | 0,486 | 0,376 | |
| Tendência t | 0,336 | 0,286 | 0,888 | |

FONTE: O autor (2019).

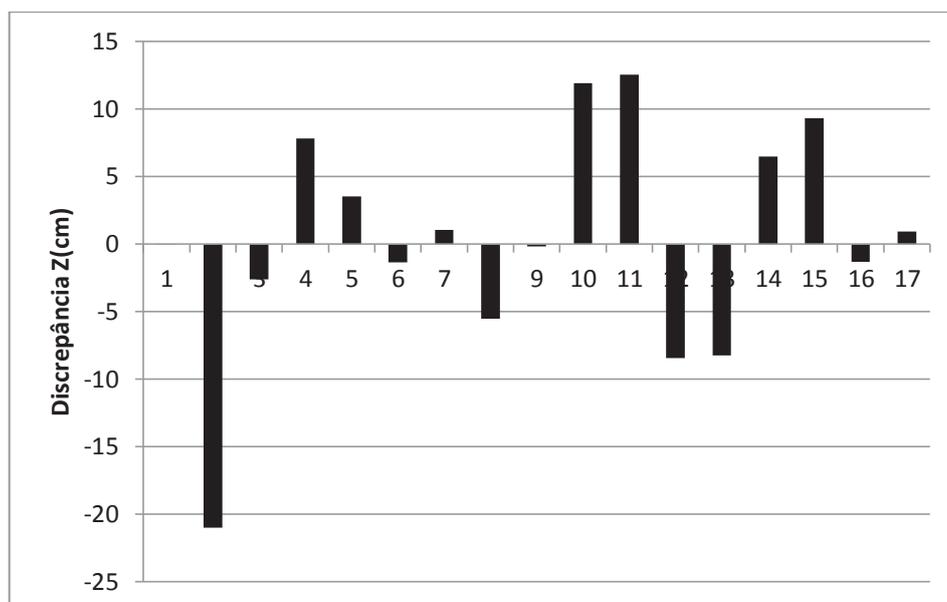
GRÁFICO 24- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 25 é possível visualizar a inexistência de tendência e a distribuição das discrepâncias altimétricas. Apesar do EQM altimétrico menor que a tolerância altimétrica admissível ($5,7 \text{ cm} < 10 \text{ cm}$), 18% dos valores extrapolaram a tolerância admissível.

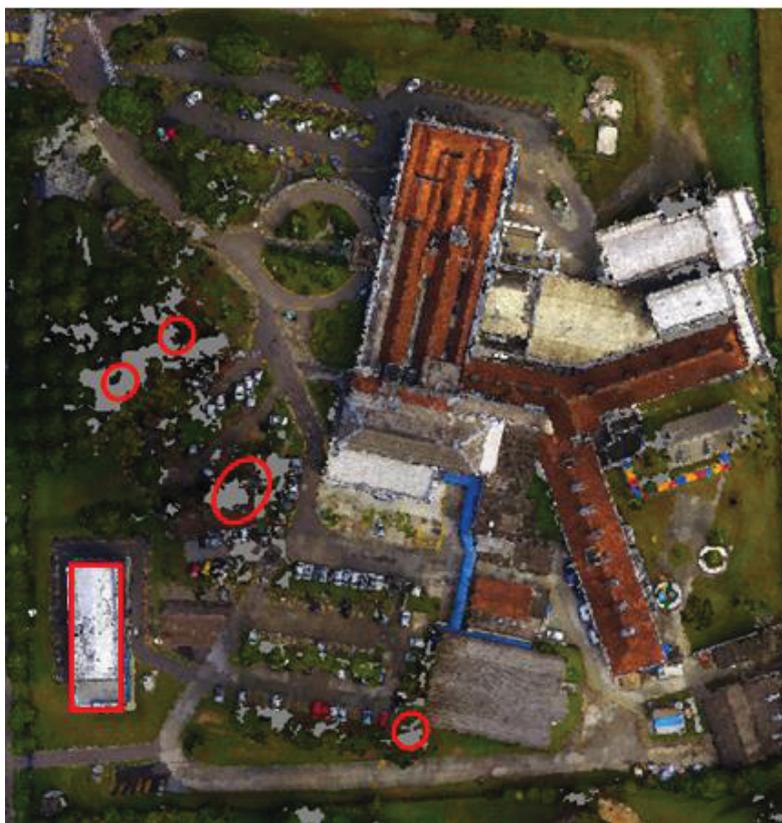
GRÁFICO 25- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Na inspeção visual da qualidade da nuvem de pontos, avaliando-se a reconstrução tridimensional dos objetos, foram detectadas falhas de reconstrução em aproximadamente 6,6% das árvores e 5,2% das edificações (FIGURA 20). As falhas ocorreram nas mesmas posições em todos os recobrimentos previamente discutidos, porém especialmente em relação à FIGURA 19, percebe-se maior ausência de pontos no nível do solo. A causa mais provável desta ocorrência se dá pela diminuição do número de imagens empregada no processamento da nuvem de pontos (redução de aproximadamente 50%).

FIGURA 20 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m Inclinado (RLO 60% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.5.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

Na TABELA 30 são apresentados os resultados da avaliação da exatidão planimétrica do Ortomosaico, baseado nas discrepâncias planimétricas de 32 pontos de verificação. Para o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$) não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de normalidade ou de existência de tendência apenas para as discrepâncias referentes a componente “Y” ($p\text{-valor} > 0,05$). Para a componente “X” a hipótese de normalidade é rejeitada, inviabilizando a realização do Teste t. Neste caso submete-se a amostra ao teste não paramétrico de Wilcoxon ao nível de confiança de 95% para verificar se a mediana populacional encontra-se próxima a zero. O resultado do teste aponta um $p\text{-valor}$ igual a 0,1072, indicando que não há evidências estatísticas para rejeitar a condição de normalidade da amostra. O EQM das resultantes planimétricas (7,5 cm) é aceito como dentro do limiar estabelecido 2GSD (8cm).

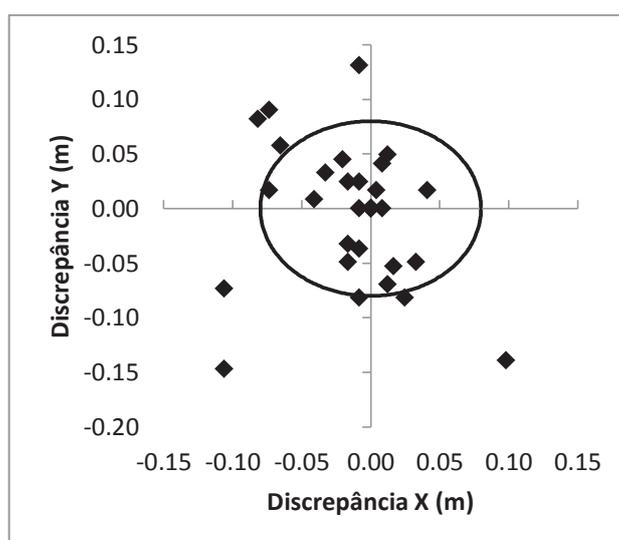
TABELA 30- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 4,4 | 6,1 | 7,5 |
| Máximo | 9,8 | 13,1 | 18,2 |
| Média | -1,4 | -0,6 | 5,8 |
| Mínimo | -10,6 | -14,7 | 0,0 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,021 | 0,515 | |
| Tendência t | | 0,610 | |

FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 26 é possível visualizar a distribuição das discrepâncias planimétricas. O EQM planimétrico calculado é estatisticamente aceito dentro da tolerância admissível (8,0 cm, representada pela circunferência). Quase $\frac{1}{4}$ das discrepâncias planimétricas extrapolaram este limite de 2 GSD. Neste recobrimento com fotos inclinadas, com maior base aérea, percebe-se que apesar da expressiva redução no número de imagens, não houve diferença significativa na magnitude do EQM_{RP} (7,5 cm) em relação ao obtido no experimento anterior na TABELA 24 ($EQM_{RP} = 6,5$ cm).

GRÁFICO 26- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, Inclinado, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.5.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos Inclinaadas, RLO 60% e RLA 75%.

A exatidão altimétrica do MDT, resultante do processo fotogramétrico SFM, foi analisada com base nas posições planimétricas dos mesmos 32 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. Os valores estatísticos e métricas obtidas das análises das discrepâncias altimétricas em relação às medidas GNSS, são apresentados na TABELA 31.

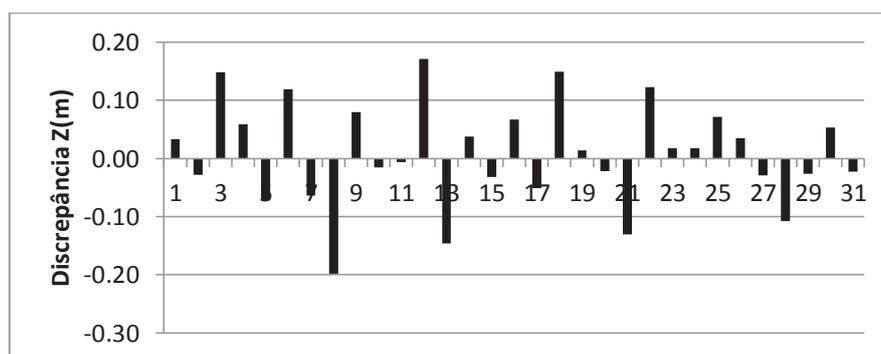
TABELA 31- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|----------------|-----------------------|
| EQM | 8,9 |
| Máximo | 17,1 |
| Média | 1,2 |
| Mínimo | -19,8 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,793 |
| Tendência t | 0,469 |

FONTE: O autor (2019).

. Com o nível de confiança de 95%, tanto a condição de normalidade quanto a inexistência de tendência são comprovadas. O EQM igual a 8,9 cm, que caracteriza a exatidão altimétrica do MDT, encontra-se abaixo do limiar estabelecido 2,5 GSD (10 cm). Apesar disso, 31% das discrepâncias altimétricas ultrapassam a tolerância. A distribuição das discrepâncias altimétricas pode ser visualizada no GRÁFICO 27.

GRÁFICO 27- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.5.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos Inclínadas, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR).

Os resultados da segunda verificação do MDT SFM, com o MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado são apresentados na TABELA 32. Por conta da eliminação de um ponto, as análises são feitas considerando as discrepâncias em 31 pontos de verificação.

TABELA 32- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Inclínado, RLO 60% e RLA 75%.

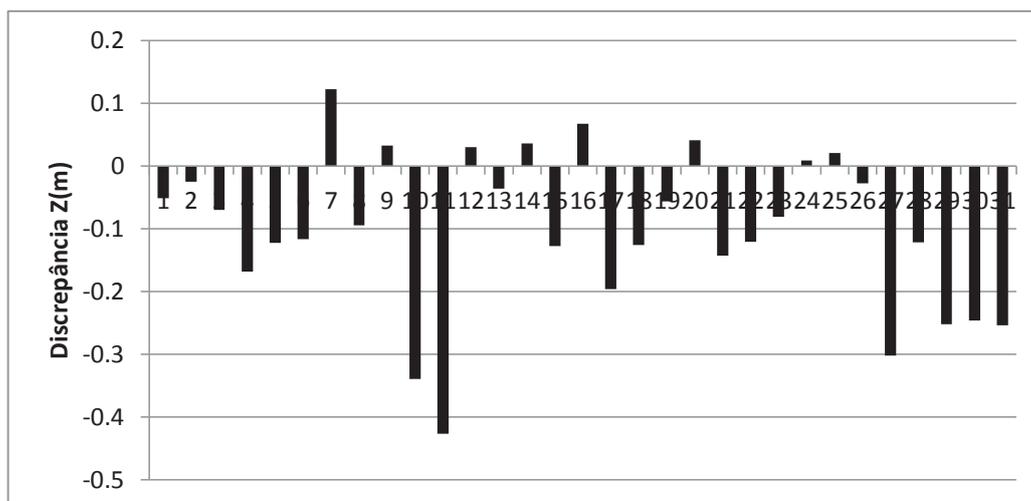
| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 16,1 |
| Máximo | 12,2 |
| Média | -10,1 |
| Mínimo | -42,7 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,390 |
| Teste t | 0,000 |

FONTE: O autor (2019).

A média das discrepâncias igual a -10,1cm indica a existência de tendência nos dados, além de uma provável distribuição anormal da amostra. O resultado do teste SW com o nível de confiança de 95% ($0,390 > 0,05$), comprova a hipótese de normalidade da amostra. Todavia o resultado para o teste t comprova a existência de tendência, que pode, assim como a distribuição das discrepâncias, ser visualizada no GRÁFICO 28.

Considerando que ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de 10 cm, o valor do EQM das discrepâncias altimétricas, obtida da comparação dos MDTs (16,1cm) pode ser admitido como dentro da exatidão esperada.

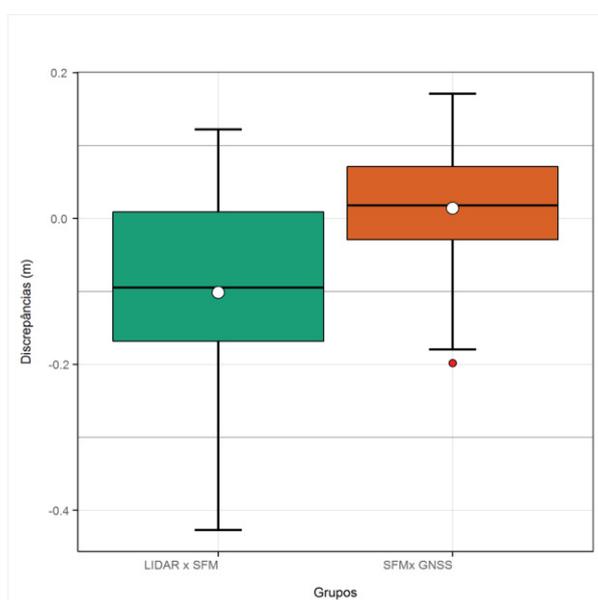
GRÁFICO 28- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 29 mostra um comparativo das discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Verifica-se que as discrepâncias resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS se apresentam com menor dispersão que as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR. Todavia a zona de abrangência da dispersão de dados permite admitir que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 29- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Inclinado, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.6 Aerolevanteamento a 100 m com fotos inclinadas, faixas cruzadas.

Recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.

As análises que se seguem correspondem a um experimento que empregou bloco de 623 imagens inclinadas, tomadas na altura de voo de 100 m, faixas de voo cruzadas com recobrimento longitudinal e lateral de 80% e 75% respectivamente. O GSD admitido é aproximadamente 4,0 cm e os POI, resultantes da autocalibração, são apresentados na TABELA 33. Conforme o critério da magnitude do desvio padrão “ σ ”, todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 33- POI determinado na autocalibração no experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,6463 | 0,0009 |
| x_0 | -0,0272 | 0,0001 |
| y_0 | 0,0215 | 0,0004 |
| K1 | 8,92E-04 | 7,61E-06 |
| K2 | -8,46E-05 | 1,31E-06 |
| K3 | -6,03E-07 | 6,32E-08 |
| P1 | 2,15E-05 | 1,40E-06 |
| P2 | -1,05E-05 | 5,13E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.6.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m – faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

No processamento da nuvem de pontos com o SFM foram utilizados 21 pontos de controle e 17 pontos de verificação. A TABELA 34 mostra a descrição resumida dos resíduos em 21 pontos de controle empregados para referenciar a nuvem de pontos. O EQM planimétrico (6,4 cm) é aceitável para a tolerância estabelecida (2 GSD), já o EQM altimétrico (11,2 cm), apesar de extrapolar a tolerância altimétrica de 2,5 GSD, pode ser aceito como dentro do intervalo de confiança de 95%, para a média do módulo das discrepâncias.

TABELA 34- Resumo dos resíduos. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 3,6 | 5,3 | 11,2 | 6,4 |
| Máximo | 6,7 | 12,5 | 18,0 | 16,1 |
| Mínimo | -9,8 | -16,0 | -34,4 | 0,2 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

A verificação da exatidão da nuvem de pontos (processamento SFM) se deu com a análise das discrepâncias tridimensionais em 17 pontos de verificação. Conforme TABELA 35, verifica-se que o valor do EQM da resultante planimétrica (exatidão planimétrica) é menor que o limiar estabelecido (8 cm). Já o EQM altimétrico (exatidão altimétrica) extrapola o limiar de 10 cm. No geral, os EQM das discrepâncias refletiram as magnitudes das precisões planimétrica e altimétrica (EQM dos resíduos nos pontos de apoio). Aplicando o teste t com um nível de confiança de 95%, para a média do módulo das discrepâncias altimétricas, pode-se aceitar que o EQM altimétrico (13,9 cm) encontra-se dentro do intervalo de confiança da média. Os valores das médias das discrepâncias tridimensionais “ ΔX ”, “ ΔY ” e “ ΔZ ”, diferentes de zero, indicam distribuição anormal e tendência nos resultados obtidos. Entretanto, os p-valores dos testes estatísticos de normalidade e de tendência, com um nível de confiança de 95%, comprovam que apenas as componentes planimétricas possuem uma distribuição normal e estão isentas de tendência (p-valor > 0,05). Já a componente altimétrica, apesar de ter a condição de normalidade comprovada estatisticamente, possui tendência (p-valor < 0,05).

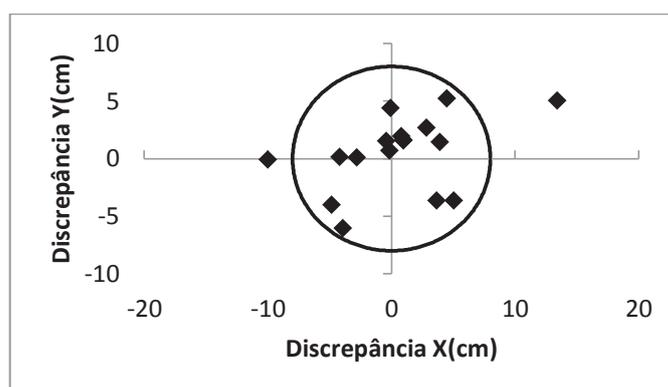
TABELA 35- Resumo das discrepâncias. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | ΔX (cm) | ΔY (cm) | ΔZ (cm) | RP (cm) |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| EQM | 5,0 | 3,2 | 13,9 | 5,9 |
| Máximo | 13,4 | 5,2 | 31,5 | 14,3 |
| Média | 0,6 | 0,5 | 10,3 | 4,9 |
| Mínimo | -10,0 | -6,1 | -5,1 | 0,7 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,498 | 0,208 | 0,720 | |
| Tendência t | 0,657 | 0,530 | 0,000 | |

FONTE: O autor (2019).

A distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser observada no GRÁFICO 30, o qual demonstra que apenas 12% das discrepâncias extrapolaram a tolerância de 8,0 cm.

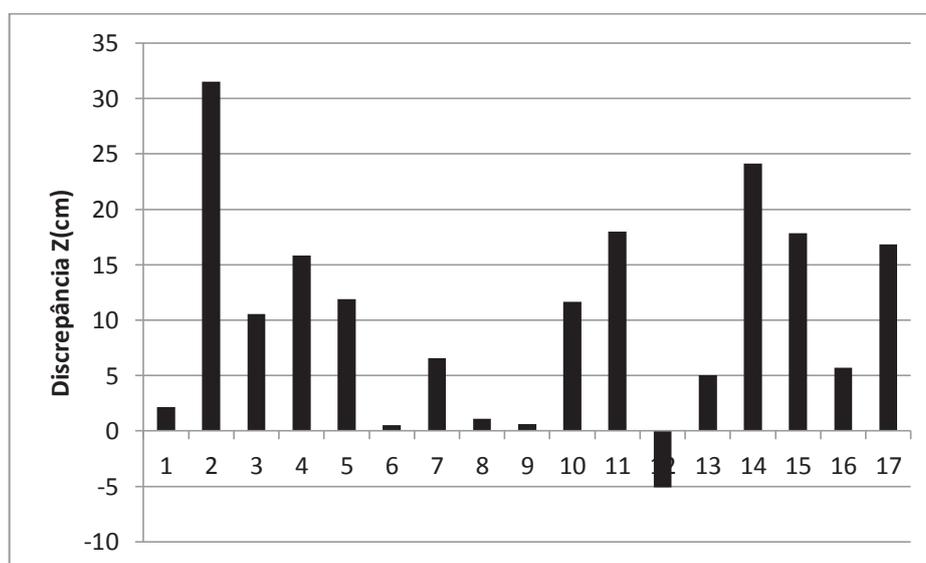
GRÁFICO 30- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Através do GRÁFICO 31 é possível verificar que a distribuição das discrepâncias altimétricas são majoritariamente positivas, caracterizando uma tendência na amostra e que aproximadamente 53% dos valores extrapolaram a tolerância de 2,5 GSD (10 cm).

GRÁFICO 31- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

A mesma inspeção visual da qualidade da nuvem de pontos na reconstrução tridimensional dos objetos, já descrita, foi aplicada para este conjunto de dados. Considerando a amostra de 60 árvores e 19 edificações na FIGURA 21 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m, Inclinado, faixas cruzadas (RLO 80% e RLA 75%). constatou-se que houve 100% de acerto na reconstrução dos objetos mencionados. Entretanto as falhas, ao nível de solo, na região densamente arborizada permaneceram. É possível concluir que, neste caso, o uso combinado de faixas cruzadas e a inclinação da câmera contribuíram positivamente para o sucesso da reconstrução tridimensional dos objetos. Mesmo assim, os “vazios” ao nível de solo na região arborizada permaneceram. Uma provável razão para isso é a incapacidade do algoritmo detectar pontos em regiões sombreadas (deficiência de contraste), mesmo que o uso de fotos inclinadas diminua áreas de oclusão.

Consultando os resultados dos recobrimentos previamente discutidos, verificou-se uma característica comum para aqueles com pior resultado em altimetria: uma maior ocorrência de imagens com efeito arrasto (“*motion blur*”). De acordo com Wierzbicki; Kedzierski e Fryskowska (2015), no estágio de aquisição das imagens, os parâmetros de exposição da câmera (velocidade do obturador e valor de abertura) e condições climáticas têm um impacto considerável na qualidade final da imagem. Outros fatores que determinam a precisão geométrica são os efeitos de desfoque e ângulo de inclinação da imagem. Estes últimos são causados principalmente pela instabilidade da plataforma aérea, que durante o voo pode ser perturbada pelas vibrações do motor, turbulências e fluxos súbitos de vento. Os autores afirmam ainda que tais fatores podem contribuir com até de 25% na degradação da qualidade de produtos finais. Diversas investigações apontam para o mesmo problema e maneiras de mitigar tais influências: Koik e Ibrahim (2013), Sieberth; Wackrow e Chandler (2015), Sieberth; Wackrow e Chandler (2016), Gomes *et al.* (2016) e Teo e Zhan, (2016).

FIGURA 21 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m, Inclinado, faixas cruzadas (RLO 80% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.6.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%

A TABELA 36 mostra o resumo descritivo das discrepâncias ΔX e ΔY de 37 pontos de verificação, permitindo uma inferência sobre a exatidão planimétrica do Ortomosaico. Para o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$) não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese de normalidade ou de existência de tendência para a amostra ΔX (p -valor $> 0,05$). Para a amostra ΔY , apesar de comprovação da normalidade da amostra, constata-se a existência de uma pequena tendência ($0,016 < 0,05$). Analisando a exatidão planimétrica obtida com base no valor do EQM das resultantes planimétricas (7,7 cm), percebe-se que este é inferior a tolerância planimétrica admissível de 2 GSD. Entretanto, verifica-se que 38% das discrepâncias planimétricas não se encontram dentro do limite planimétrico admissível (GRÁFICO 32).

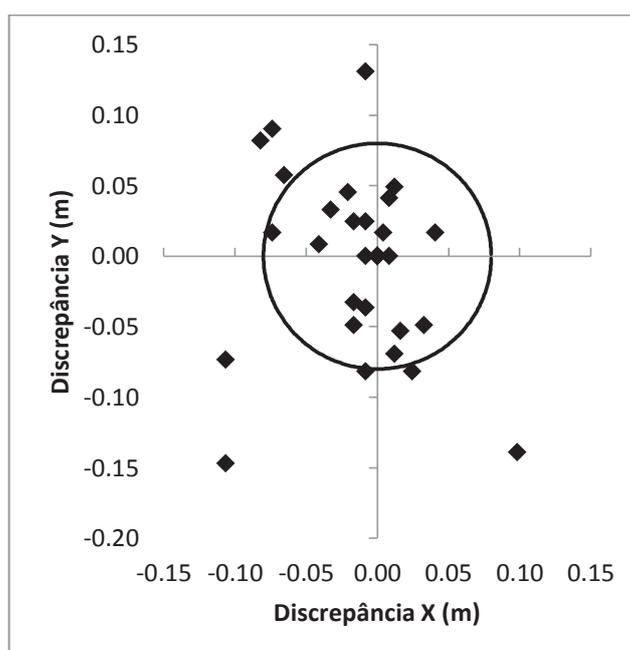
TABELA 36- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 5,9 | 5,0 | 7,7 |
| Máximo | 12,1 | 8,3 | 14,6 |
| Média | -0,6 | -2,0 | 7,0 |
| Mínimo | -11,6 | -11,1 | 1,3 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,734 | 0,518 | |
| Tendência t | 0,529 | 0,016 | |

FONTE: O autor (2019).

Considerando as discrepâncias planimétricas que não se enquadraram na avaliação da nuvem de pontos (12%), verifica-se que houve uma degradação da qualidade planimétrica do ortomosaico em relação à nuvem de pontos. Esta piora pode ser atribuída à quantidade de imagens com efeito “arrasto”, que dificultam dentre outros, a medida manual dos pontos de verificação.

GRÁFICO 32- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.6.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%

O MDT resultante do processo fotogramétrico SFM teve sua exatidão altimétrica verificada com base nas posições planimétricas de 37 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. Na TABELA 37- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%. pode ser verificado que tanto a condição de normalidade quanto a inexistência de tendência são comprovadas pelo p-valor do teste estatístico correspondente, com o nível de confiança de 95%, ainda que o valor da média indique o contrário. O valor EQM igual a 15,2 cm extrapola o limiar estabelecido 2,5 GSD (10 cm). Todavia, aplicando o teste t para o módulo das discrepâncias, também a um nível de confiança 95%, tem-se que o EQM pode ser aceito como dentro do intervalo de confiança admitindo uma média amostral igual à tolerância de 10 cm.

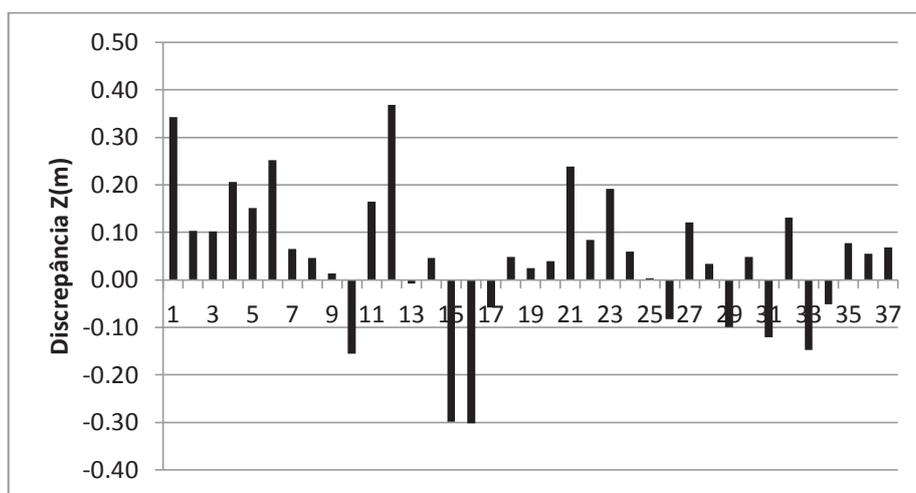
TABELA 37- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 15,2 |
| Máximo | 36,9 |
| Média | 4.8 |
| Mínimo | -30,2 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,353 |
| Tendência t | 0,056 |

FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 33 é possível visualizar a distribuição das discrepâncias altimétricas e ainda que o EQM seja aceito dentro da tolerância altimétrica admissível ao nível de confiança de 95%, percebe-se que aproximadamente 53% ultrapassam o limiar de 10 cm.

GRÁFICO 33- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Considerando os dados empregados fica evidenciado a piora na qualidade altimétrica do produto analisado, em comparação aos obtidos nos recobrimentos previamente discutidos. O emprego de faixas cruzadas não trouxe benefícios relevantes além da evidenciada melhora visual da nuvem de pontos.

4.3.6.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 80% e RLA 75% com MDT (LIDAR).

Uma segunda verificação do MDT SFM, em relação a um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado foi realizada e um resumo é apresentado na TABELA 38- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.. Dentre os pontos inicialmente disponíveis, previamente empregados na verificação do Ortomosaico, um deles foi classificado como *outlier*. Sendo assim, foram empregados os 36 pontos de verificação restantes. O valor da média das discrepâncias igual a -14,1 cm, indica a existência de tendência e uma provável distribuição anormal da amostra. A hipótese de normalidade dos dados é comprovada pelo resultado do teste estatístico a um nível de confiança de 95% porém a hipótese de inexistência de tendência, sob o mesmo critério, é rejeitada. Uma visualização das discrepâncias e da tendência negativa nos dados pode ser feita no no GRÁFICO 34.

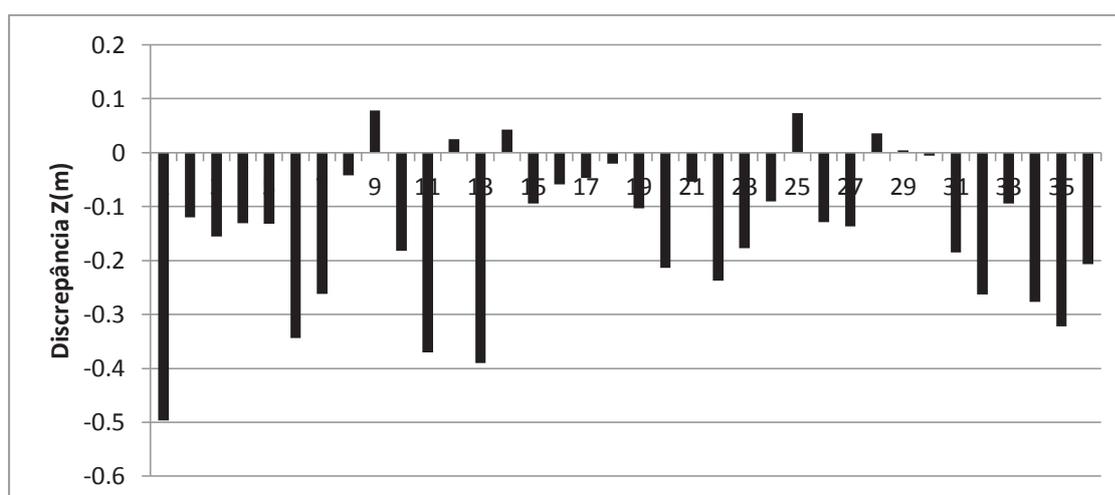
TABELA 38- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|-----------------|-----------------------|
| EQM | 19,6 |
| Máximo | 7,8 |
| Média | -14,1 |
| Mínimo | -49,7 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,476 |
| Teste tendência | 0,000 |

FONTE: O autor (2019).

Submetendo a média das discrepâncias, tomadas em módulo, e determinando o intervalo de confiança a 95% para a média igual a tolerância altimétrica de 10cm, tem-se que o valor do EQM das discrepâncias altimétricas, muito embora no limite, é aceito como dentro do intervalo de confiança ($11,4 \text{ cm} \leq \text{EQM} \leq 19,6 \text{ cm}$). Considerando que ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de 10 cm, o valor do EQM das discrepâncias altimétrica, obtida da comparação dos MDTs (19,6 cm) pode ser admitido como dentro da exatidão esperada.

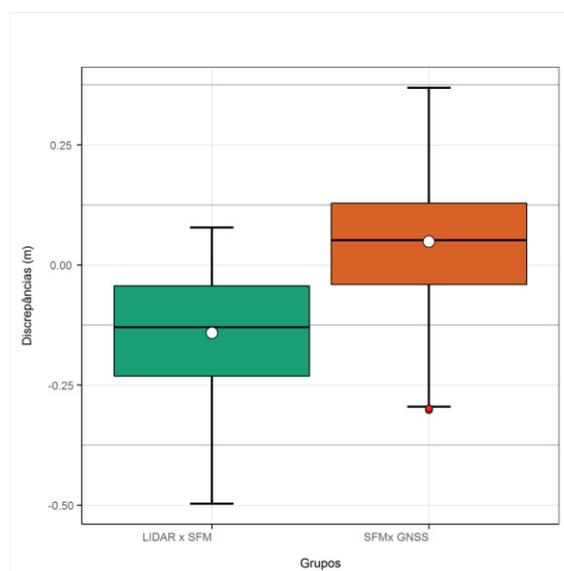
GRÁFICO 34- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, fotos inclinadas RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 35 é possível visualizar o comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Verifica-se que a abrangência da distribuição das discrepâncias resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS se sobrepõe as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR. Desta forma, pode admitir que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões, apesar da tendência nos resultados da comparação LIDARxSFM.

GRÁFICO 35- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.7 Aerolevanteamento a 100 m com fotos inclinadas, faixas cruzadas.

Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.

Neste item são apresentados e discutidos os resultados do reprocessamento do bloco do item 4.3.6 porém, considerando um recobrimento longitudinal de 60%. Esta alteração implica diretamente na relação base altura e por consequência, na geometria da interseção dos raios que definem a posição dos pontos. Outra consequência diz respeito à redução do número de imagens sendo processadas (originalmente 623 imagens e atualmente 330 imagens). O GSD médio considerado é o mesmo (4,0 cm). Os POI resultantes da autocalibração são apresentados na TABELA 39. De acordo com a magnitude do desvio padrão “ σ ”, o parâmetro “P2” não foi significativo.

TABELA 39- POI determinados na autocalibração no experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,6497 | 0,0013 |
| x_0 | -0,0297 | 0,0001 |
| y_0 | 0,0211 | 0,0006 |
| K1 | 1,15E-03 | 1,23E-05 |
| K2 | -1,29E-04 | 2,15E-06 |
| K3 | 1,83E-06 | 1,05E-07 |
| P1 | 1,16E-04 | 2,06E-06 |
| P2 | 8,79E-06 | 1,16E-06 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.7.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 100 m – faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

Na TABELA 40 é apresentado o resumo descritivo dos resíduos nos 21 pontos de controle empregados para referenciar a nuvem de pontos. Os valores de EQM planimétrico (4,0 cm) e altimétrico (4,3 cm) foram melhores que no experimento anterior com 80%RLO (6,4 cm e 11,2 cm respectivamente). Notoriamente, para o experimento em análise, a alteração na relação base/altura promoveu um aumento das precisões, principalmente em altimetria.

TABELA 40- Resumo dos resíduos. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 2,0 | 3,5 | 4,3 | 4,0 |
| Máximo | 2,7 | 4,6 | 7,6 | 13,0 |
| Mínimo | -4,5 | -12,9 | -8,8 | 0,1 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

A análise das discrepâncias tridimensionais nos 17 pontos de verificação fornecem indícios da exatidão da nuvem de pontos obtida na etapa de processamento SFM. Conforme apresentado na TABELA 41, as exatidões planimétrica e altimétrica, representadas pelos valores de EQM das discrepâncias, refletiram mais uma vez, as baixas magnitudes das precisões planimétrica e

altimétrica obtidas no referenciamento da nuvem de pontos (EQM dos resíduos nos pontos de controle).

TABELA 41- Resumo das discrepâncias. Experimento faixas cruzadas, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

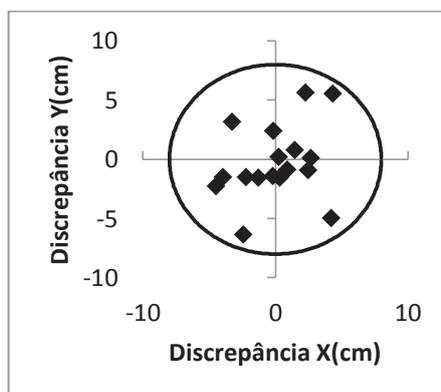
| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 2,6 | 3,1 | 6,5 | 4,1 |
| Máximo | 4,3 | 5,6 | 14,4 | 7,0 |
| Média | 0,1 | -0,3 | 3,3 | 3,5 |
| Mínimo | -4,5 | -6,4 | -7,6 | 0,3 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,717 | 0,256 | 0,326 | |
| Tendência t | 0,917 | 0,674 | 0,028 | |

FONTE: O autor (2019).

Verifica-se que o tanto o valor do EQM da resultante planimétrica quanto da altimétrica (exatidões planimétrica e altimétrica) encontra-se próximos à metade dos valores das tolerâncias admissíveis. Os p-valores dos testes estatísticos de normalidade e de tendência, com um nível de confiança de 95%, comprovam que as discrepâncias planimétricas analisadas possuem distribuição normal e são isentas de tendência. Já a altimetria, apesar da expressiva melhora em relação ao experimento anterior (RLO 80%), continua com tendência.

A distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser observada no GRÁFICO 36. Neste gráfico é possível verificar que nenhum dos valores extrapolou a tolerância 8,0 cm.

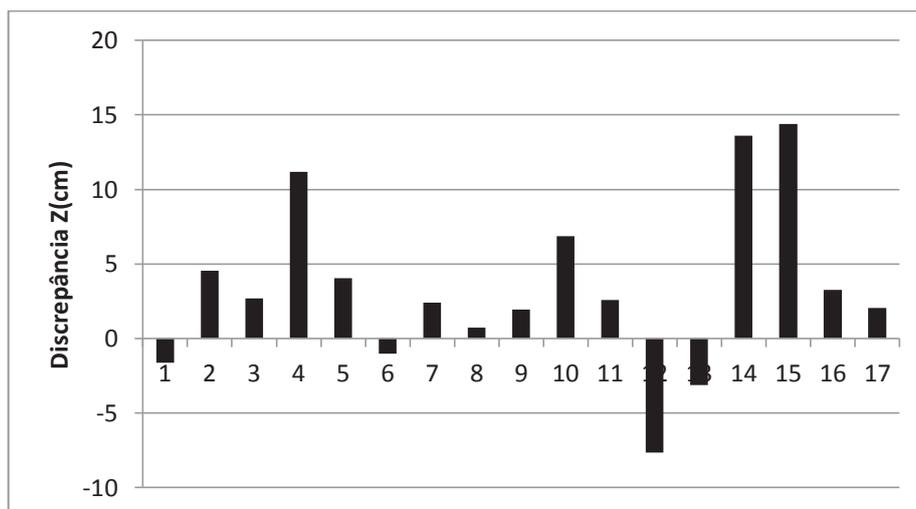
GRÁFICO 36- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 37 é possível verificar visualmente a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação e a tendência na amostra. Apesar do valor do EQM ser menor que a tolerância altimétrica admissível ($6,5 \text{ cm} < 10 \text{ cm}$), 17% dos valores extrapolaram a tolerância de 2,5 GSD .

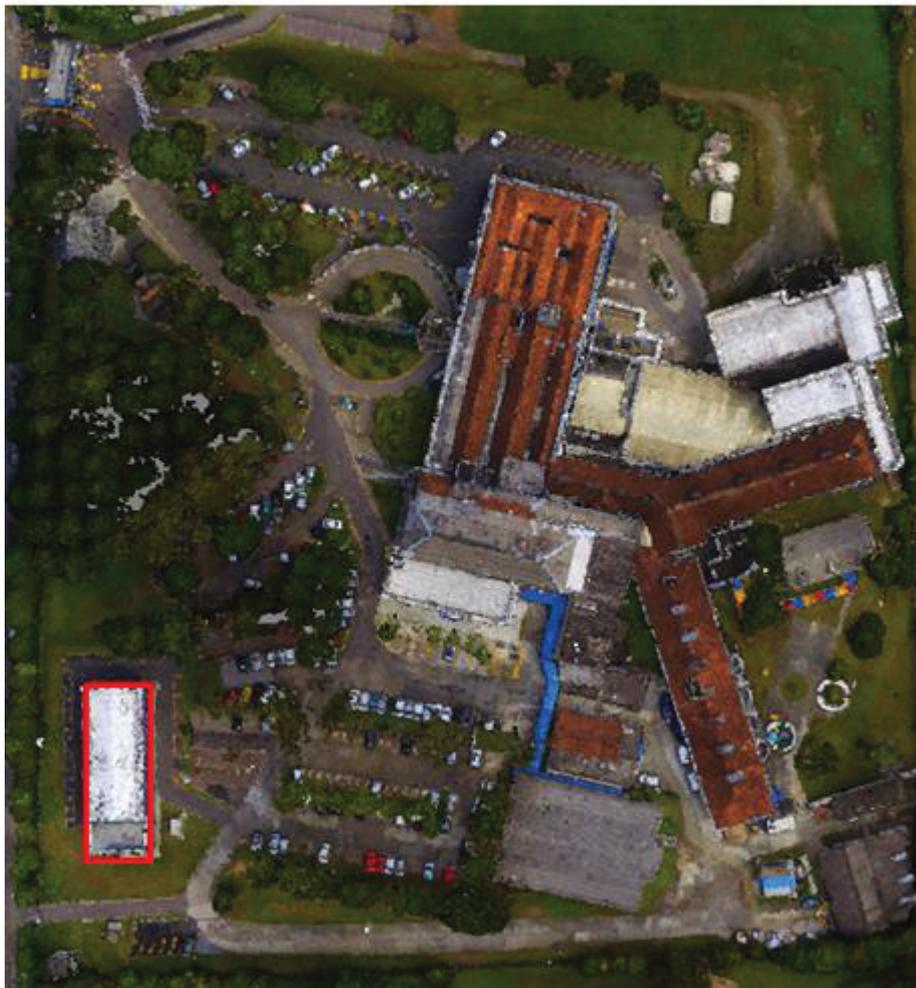
GRÁFICO 37- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, fotos inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

A qualidade da nuvem de pontos na reconstrução tridimensional dos objetos é verificada por meio de inspeção visual. A FIGURA 22 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m, inclinado, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 75%). mostra que apenas 5,26% das edificações apresentaram falhas de reconstrução. Ocorrências envolvendo as árvores não foram identificadas. Entretanto, em comparação ao recobrimento anterior, nota-se que houve um pequeno aumento de vazios de pontos no nível do solo, na área mais densamente vegetada. Este fenômeno pode ser explicado pela utilização de menor número de imagens no experimento.

FIGURA 22 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 100 m, inclinado, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.7.2 Análise do Ortomosaico - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%

Para análise da exatidão planimétrica do Ortomosaico, foram empregados 35 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 42 as métricas e estatísticas das discrepâncias ΔX e ΔY . De acordo com o nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não são rejeitadas as hipóteses de normalidade e de existência de tendência na componente "Y" (p -valor $> 0,05$). Porém, para a componente "X" a rejeição da hipótese de normalidade ($0,01 < 0,05$) impede a detecção de tendência por meio do Teste t. Neste caso é aplicado o teste não paramétrico de Wilcoxon. Com um nível de confiança de 95%, é verificada a proximidade da mediana em relação ao valor zero. O p -valor obtido comprova a inexistência de tendência na

amostra ($0,064 > 0,05$). Já o valor obtido para o EQM das resultantes planimétricas, foi inferior à tolerância planimétrica admissível de 2 GSD ($6,4 \text{ cm} < 8,0 \text{ cm}$).

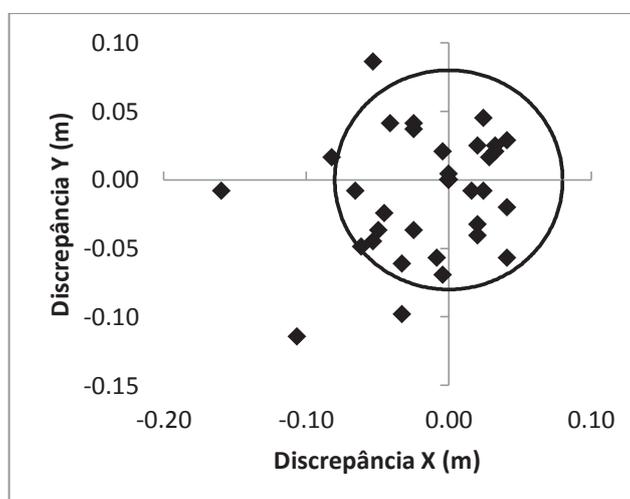
TABELA 42- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico, faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 4,7 | 4,4 | 6,4 |
| Máximo | 4,1 | 8,6 | 16,0 |
| Média | -1,5 | -1,1 | 5,3 |
| Mínimo | -16,0 | -11,5 | 0,0 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,010 | 0,794 | |
| Tendência t | | 0,152 | |

FONTE: O autor (2019).

Uma distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser verificada no GRÁFICO 38. A tolerância planimétrica de 2 GSD ($8,0 \text{ cm}$), representada pela circunferência mostra que apesar do EQM planimétrico calculado ser aceito dentro da tolerância admissível, verifica-se que 14% das discrepâncias planimétricas não se encontram dentro do limite planimétrico admissível. Esta percentagem de reprovação junto à tolerância foi inexplicavelmente maior que a obtida na avaliação da exatidão planimétrica da nuvem de pontos (0%).

GRÁFICO 38- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico, fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.7.3 Análise do MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%

O MDT resultante do processo fotogramétrico SFM teve sua exatidão altimétrica verificada com base nas posições planimétricas de 34 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico.

A TABELA 43- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%. mostra os valores estatísticos obtidos das análises das discrepâncias altimétricas. A condição de normalidade e a inexistência de tendência é comprovada pelo p-valor do teste estatístico correspondente, com o nível de confiança de 95%, ainda que o valor da média indique o contrário. O valor EQM igual a 7,3 cm encontra-se abaixo do limiar estabelecido 2,5 GSD (10 cm).

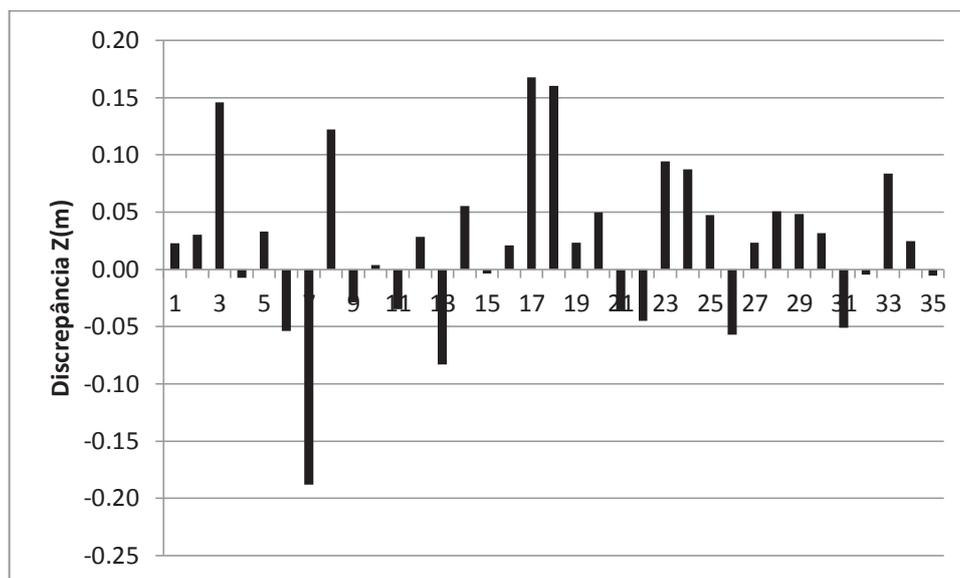
TABELA 43- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | ΔZ(cm) |
|---------------------|----------------------------------|
| EQM | 7,3 |
| Máximo | 16,8 |
| Média | 2,2 |
| Mínimo | -18,8 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,253 |
| Tendência t | 0,082 |

FONTE: O autor (2019).

A distribuição das discrepâncias pode ser visualizada no GRÁFICO 39, o qual também mostra a inexistência de tendência. Apesar da magnitude do EQM ser aceita dentro da tolerância altimétrica admissível, 37% das discrepâncias ultrapassam a tolerância estabelecida.

GRÁFICO 39- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

O presente recobrimento, com faixas cruzadas, fotos inclinadas e RLO de 60%, resultou em uma melhora na exatidão altimétrica de 52% em relação ao experimento anterior, cuja diferença é apenas um RLO igual a 80% (menor aero base). Pode-se concluir que a relação base/altura do presente recobrimento contribuiu para a melhora da exatidão altimétrica.

4.3.7.4 Comparativo MDT - voo 100 m - fotos inclinadas, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 75% com MDT (LIDAR).

A verificação do MDT SFM com o MDT LIDAR foi realizada e as métricas e estatísticas, derivadas das análises das discrepâncias altimétricas de 34 pontos de verificação são apresentados na TABELA 44. O valor da média das discrepâncias altimétricas igual a -12,0 cm mostra a existência de tendência e uma provável distribuição anormal da amostra. O p-valor do teste de normalidade com o nível de confiança de 95% comprova a hipótese de normalidade, porém, a existência de tendência é comprovada pelo p-valor do Teste t igual à zero. Fato que pode também ser visualizado no GRÁFICO 40. O valor do EQM altimétrico extrapola o limiar de 2,5 GSD. Entretanto, realizando o Teste t com as discrepâncias tomadas em módulo, e determinando o intervalo de confiança de 95% admitindo a média igual à tolerância

altimétrica de 10 cm, tem-se que o EQM das discrepâncias altimétricas é aceito no intervalo de significância ($0,09 \leq EQM \leq 17,2$ cm).

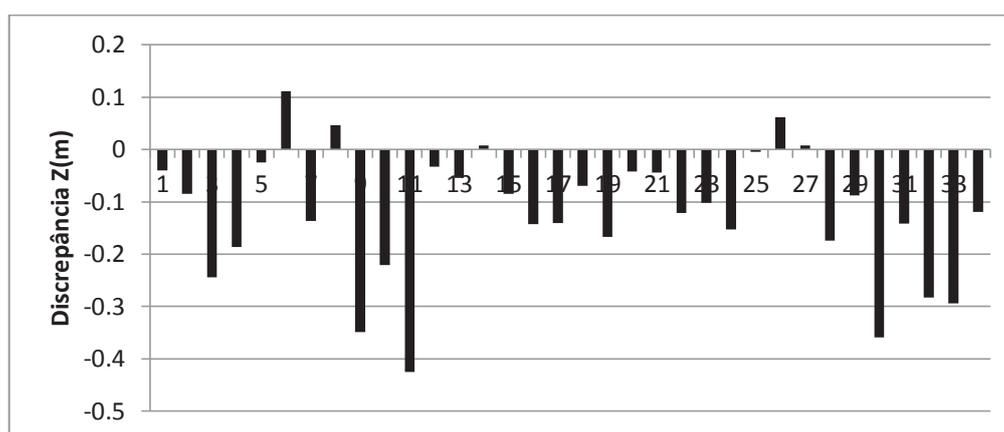
Considerando que ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de 10 cm, o valor do EQM das discrepâncias altimétrica, obtida da comparação dos MDTs (17,1 cm) pode ser admitido como dentro da exatidão esperada.

TABELA 44- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|----------------|-----------------------|
| EQM | 17,1 |
| Máximo | 11,1 |
| Média | -12,0 |
| Mínimo | -42,4 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,438 |
| Teste t | 0,000 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 40- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%.

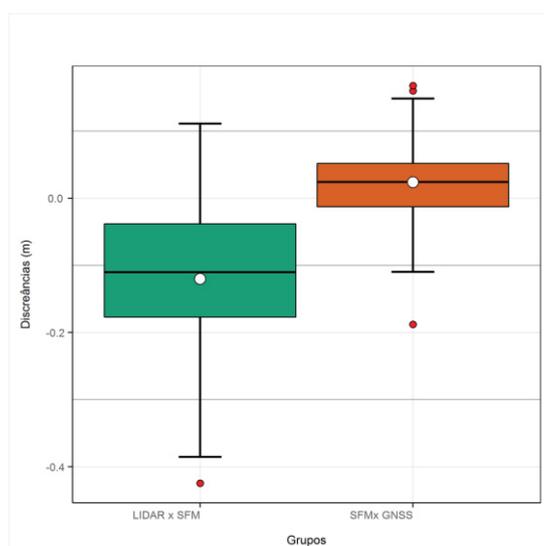


FONTE: O autor (2019).

Um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs pode ser visualizado no GRÁFICO 41. Verifica-se que há uma sobreposição na dispersão das discrepâncias altimétricas resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS e da análise do MDT SFM com o MDT LIDAR. Percebe-se no

primeiro gráfico (à direita) que as discrepâncias altimétricas encontram-se mais concentradas em torno da média (2,3 cm) enquanto o segundo gráfico (à esquerda), as discrepâncias estão mais dispersas com uma média negativa, indicando a tendência já discutida anteriormente. Todavia pode-se admitir que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 41- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Faixas cruzadas, inclinado, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.8 Aerolevantamento composto³: bloco a 100 m com fotos verticais (RLO 60% e 75% RLA) + bloco a 100 m com fotos inclinadas (RLO 60% e 75% RLA).

Neste item discutem-se os resultados de um experimento que empregou um bloco composto por dois conjuntos de imagens tomados à mesma altitude (aproximadamente 100 m) e com o mesmo recobrimento (RLO de 60% e RLA de 75%). Porém, um conjunto é composto por fotos verticais ($\pm 4^\circ$) enquanto o outro conjunto, faixas de voo cruzadas em relação ao primeiro, é composto por fotos inclinadas ($\pm 10^\circ$). O bloco fotogramétrico resultou em 291 imagens que, apesar do emprego de fotos inclinadas, para fins de análises será admitido o GSD da condição vertical (4,0 cm). A orientação do bloco foi feita levando-se em conta a condição padrão do software Agisoft PhotoScan na determinação dos POI por meio da

³ O termo “composto” será usado para designar faixas de voo cruzadas, com características distintas.

autocalibração. A TABELA 45 mostra os POI obtidos e, segundo o critério da magnitude do desvio padrão “ σ ”, todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 45- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos verticais e inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|----------------|------------|---------------|
| C | 3,6293 | 0,0002 |
| X _o | -0,0228 | 0,0000 |
| Y _o | 0,0079 | 0,0001 |
| K1 | 1,13E-03 | 3,84E-06 |
| K2 | -1,22E-04 | 6,45E-07 |
| K3 | 1,40E-06 | 3,15E-08 |
| P1 | -2,07E-05 | 6,38E-07 |
| P2 | 4,76E-05 | 7,56E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.8.1 Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%).

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 20 pontos de controle e 17 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 46 um resumo descritivo dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z em 21 pontos de controle, empregados para referenciar cartograficamente a nuvem de pontos. É possível verificar que o valor do EQM da resultante planimétrica (2,5 cm) não ultrapassa o limiar estabelecido (2 GSD = 8 cm). Para o caso da precisão altimétrica (EQM Z), as mesmas considerações discutidas para a planimetria são aplicadas de forma que a magnitude obtida também é aceita dentro do limiar altimétrico estabelecido (2,5 GSD = 10 cm).

TABELA 46- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 1,8 | 1,6 | 4,1 | 2,5 |
| Máximo | 3,7 | 3,1 | 4,4 | 4,6 |
| Mínimo | -4,5 | -3,0 | -8,9 | 0,4 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos são analisadas as discrepâncias tridimensionais em 20 pontos de verificação. Na TABELA 47, as exatidões planimétrica e altimétrica, obtidas com valores de EQM das discrepâncias, indicam magnitudes similares aos EQM determinados a partir dos resíduos nos pontos de apoio (precisões). O valor da média das discrepâncias tridimensionais “ ΔX ”, diferente de zero, indica possível não normalidade e tendência nas amostras. Porém, o p-valor do teste estatístico de normalidade Shapiro-Wilk (SW), com um nível de confiança de 95%, comprova que a amostra possui distribuição normal (p-valor > 0,05). Já a inexistência de tendência é comprovada pela magnitude do p-valor do teste t, com o nível de confiança de 95%. No caso das componentes “ ΔY ” e “ ΔZ ”, o p-valor do teste estatístico SW indica uma rejeição na hipótese de normalidade da amostra (p-valor < 0,05). Neste caso se aplica o teste não paramétrico de Wilcoxon com um nível de confiança de 95% para a média das amostras. O p-valor da componente “ ΔY ” igual a 0,853 e da componente “ ΔZ ” igual a 0,817, indica que as médias encontram-se dentro dos intervalos de confiança. O EQM das resultantes planimétricas (RP) encontra-se próximo a metade do limiar estabelecido (8 cm), portanto, é plenamente aceito.

TABELA 47- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

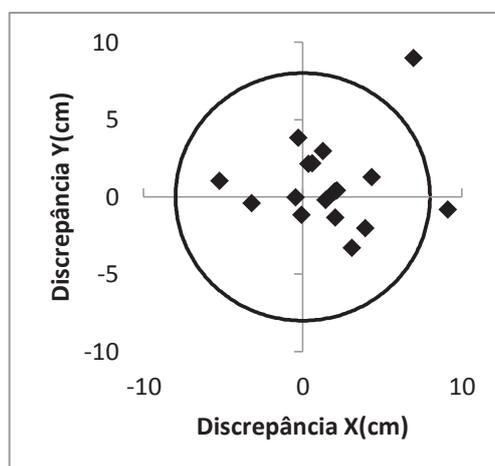
| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|---|----------------|
| EQM | 3,7 | 2,8 | 4,7 | 4,6 |
| Máximo | 9,1 | 9,0 | 15,1 | 11,4 |
| Média | 1,7 | 0,8 | 1,1 | 3,8 |
| Mínimo | -5,2 | -3,3 | -5,4 | 0,4 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,712 | 0,048 | 0,017 | |
| Tendência t | 0,061 | | | |

FONTE: O autor (2019).

Uma análise visual da distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser feita no GRÁFICO 42. A circunferência representa a tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Apesar o EQM planimétrico calculado (4,6 cm) ser aceito dentro da

tolerância admissível, verifica-se que duas discrepâncias extrapolaram o limite planimétrico admissível (12% dos valores).

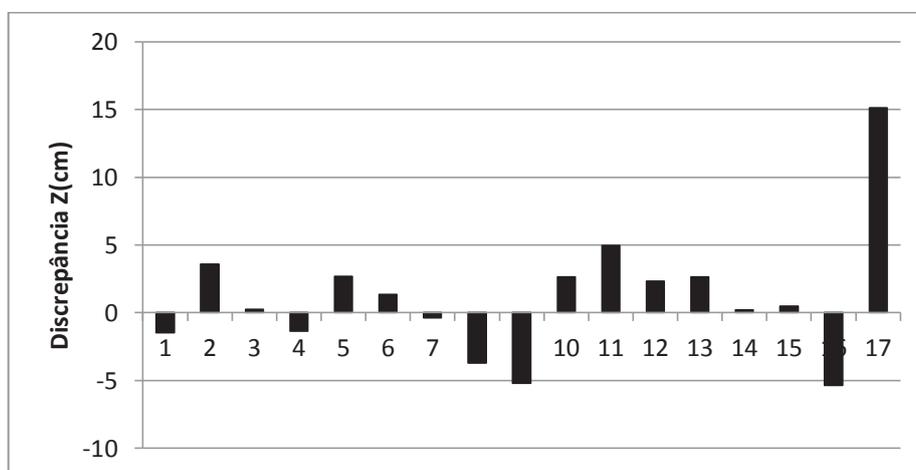
GRÁFICO 42- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 43 visualiza-se a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Constata-se que somente uma discrepância altimétrica extrapola a tolerância estabelecida (10 cm) refletindo em uma proporção de 6% em relação ao número total de discrepâncias.

GRÁFICO 43- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

O resultado da análise visual da qualidade da nuvem de pontos, quanto à reconstrução tridimensional de objetos, identificando falhas na reconstrução e a textura dos objetos reconstruídos em uma sub-região da área de estudo, pode ser visualizado na FIGURA 23. É possível identificar a existência de falhas de reconstrução de aproximadamente 10% das árvores (assinaladas na figura) enquanto que para as edificações não se percebe falhas de reconstrução. Uma segunda observação é que a nuvem de pontos apresentou uma textura com maior incidência de ruídos do tipo “salt and pepper”. Muito provavelmente causada pelo uso de imagens tomadas com inclinações distintas (fotos verticais e inclinadas). Isso de alguma maneira dificultou no processo de medição de pontos homólogos. Pode-se descartar a hipótese de falhas de recobrimento uma vez que foram empregadas faixas de voo com geometria cruzada.

FIGURA 23 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.8.2 Análise do Ortomosaico - Bloco composto- a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%).

Para análise da exatidão planimétrica deste produto foram empregados 41 pontos de verificação. Nestes pontos, foram calculadas as discrepâncias ΔX , ΔY e posteriormente as métricas e estatísticas para cada componente. A TABELA 48 mostra um resumo dos resultados obtidos e as estatísticas realizadas. De acordo com os valores obtidos e ao nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras (p -valor $> 0,05$). Adotando o valor de 2 GSD para a exatidão planimétrica admissível (8 cm) o EQM das resultantes planimétricas (6,3 cm) é aceito dentro do limiar estabelecido.

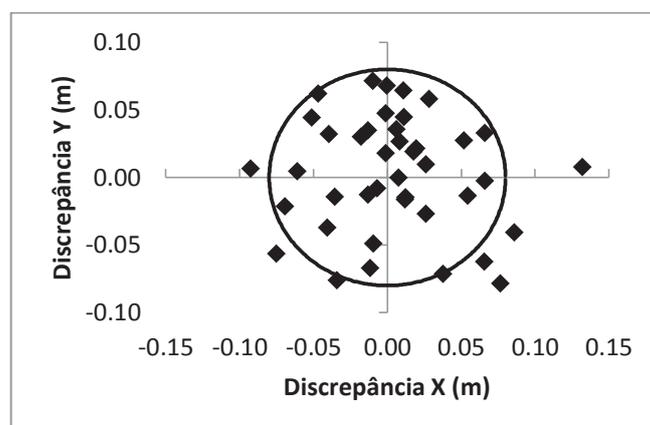
TABELA 48- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|----------------|
| EQM | 4,6 | 4,2 | 6,3 |
| Máximo | 13,2 | 7,1 | 13,2 |
| Média | 0,5 | 0,2 | 5,6 |
| Mínimo | -9,3 | -7,9 | 0,8 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,815 | 0,181 | |
| Tendência t | 0,516 | 0,743 | |

FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 44 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas em relação a uma circunferência de raio igual à tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Apesar da admissão do EQM das resultantes planimétricas dentro do limiar estabelecido, verifica-se que 19,5% das discrepâncias extrapolam este limiar. Esta percentagem é próxima da que foi obtida na avaliação da nuvem de pontos (12%), apesar de ter sido empregado um maior número de pontos de verificação na avaliação do Ortomosaico.

GRÁFICO 44- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.8.3 Análise do MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%).

A verificação da exatidão altimétrica do MDT resultante da filtragem da nuvem de pontos, obtida pelo processo fotogramétrico SFM, foi realizada com base nas posições planimétricas de 41 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. A TABELA 49 mostra as métricas e estatísticas obtidas a partir do cálculo das discrepâncias altimétricas. Tanto a hipótese de normalidade quanto de inexistência de tendência nos dados são comprovados, ao nível de confiança de 95%, pelos p-valores obtidos ($p\text{-valor} > 0,05$). Diante da limiar de 2,5 GSD (10 cm) constata-se que o EQM das discrepâncias altimétricas encontra-se abaixo do limite máximo tolerável. No GRÁFICO 45 é apresentado a distribuição das discrepâncias altimétricas, podendo ser constatado a inexistência de tendência na amostra. Apesar do EQM das discrepâncias (exatidão altimétrica) ser aceito dentro da tolerância altimétrica admissível (10 cm), dois valores extrapolaram o limiar estabelecido. Sendo assim, 5% das discrepâncias altimétricas são superiores à tolerância altimétrica estabelecida.

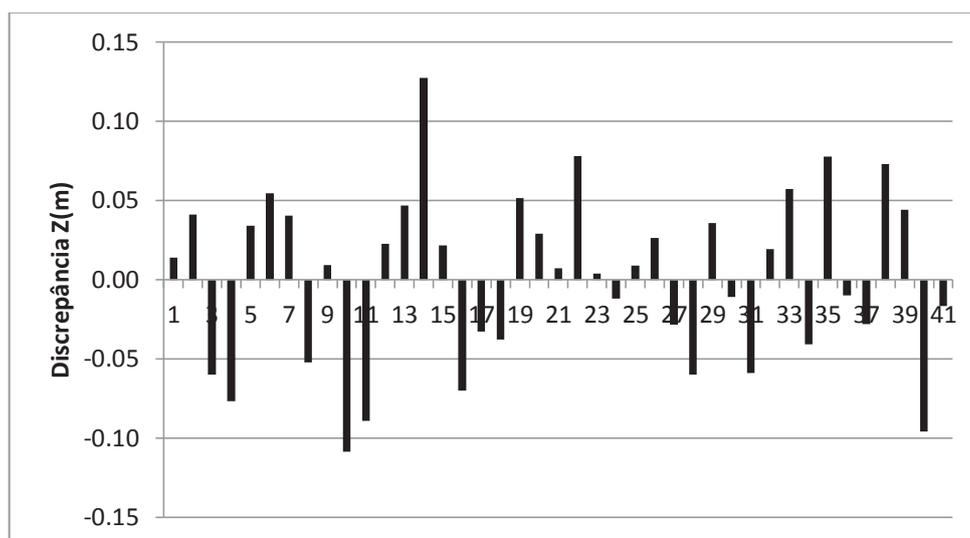
Comparando com os resultados previamente obtidos, pode-se considerar que o presente recobrimento, com a combinação de voos na condição vertical e inclinada, ofereceu a maior exatidão altimétrica para o produto MDT.

TABELA 49- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|----------------|-----------------------|
| EQM | 5,3 |
| Máximo | 12,7 |
| Média | 0,1 |
| Mínimo | -10,9 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,803 |
| Tendência t | 0,918 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 45- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.8.4 Comparativo MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 60% e RLA 75%) com MDT (LIDAR).

Os resultados da segunda verificação do MDT, com base em um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado, são apresentados na TABELA 50. O EQM das discrepâncias apresentou valor de 15,2 cm. Valor este que pode ser admitido se considerado as imprecisões de ambos os MDTs (± 10 cm).

Analisando a média das discrepâncias, verifica-se um valor negativo diferente de zero, indicando uma provável distribuição anormal da amostra. O p-valor

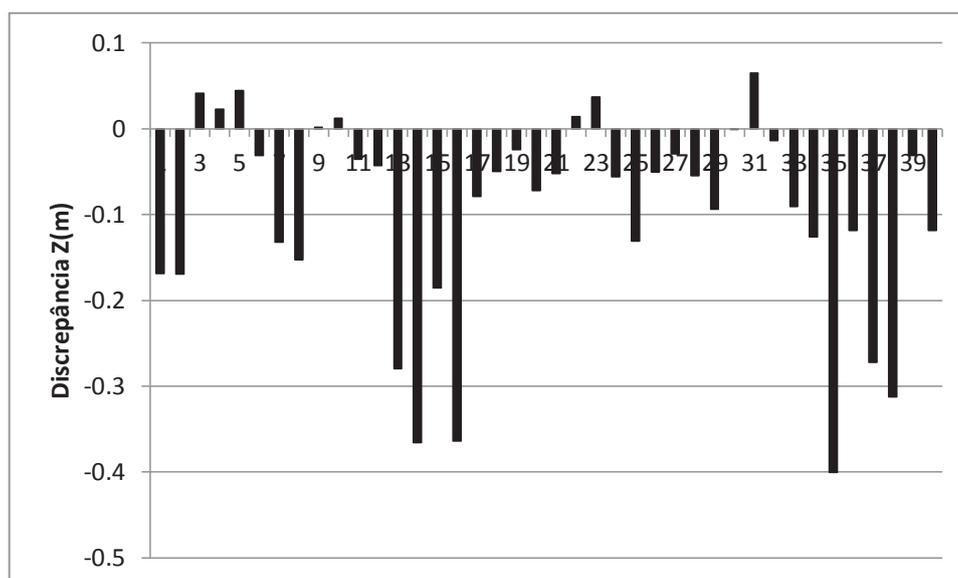
do teste SW, com o nível de confiança de 95%, comprova estatisticamente que o conjunto de discrepâncias não possui uma distribuição normal. Neste caso se aplica o teste não paramétrico de Wilcoxon para comprovar se o valor da média das discrepâncias, tomadas em módulo, é menor ou igual à tolerância admissível, no caso, a imprecisão do MDT ($\pm 10\text{cm}$). Com o nível de confiança de 95% obtém-se para o teste de Wilcoxon um p-valor igual a 0,221 comprovando, portanto, a aceitabilidade do valor da média. Uma visualização da distribuição das discrepâncias bem como uma tendência negativa, pode ser verificada no GRÁFICO 46.

TABELA 50- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 15,2 |
| Máximo | 6,5 |
| Média | -9,7 |
| Mínimo | -40,0 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,001 |
| Teste de tendência | |

FONTE: O autor (2019).

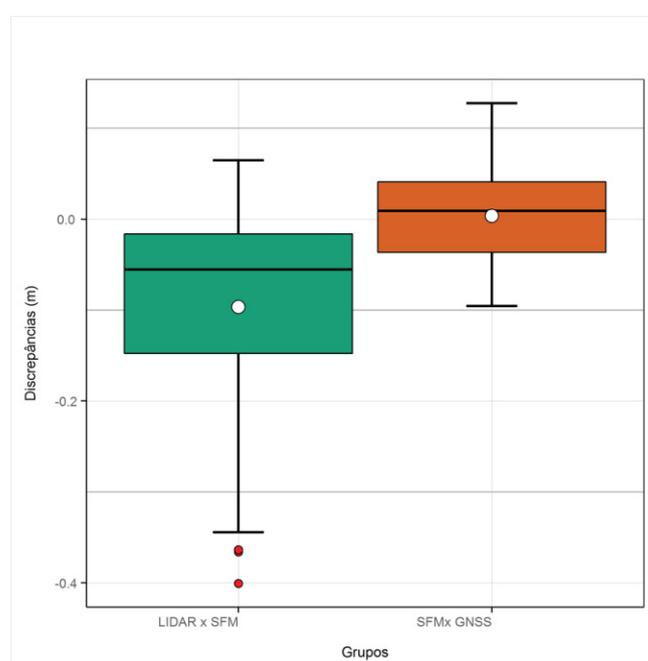
GRÁFICO 46- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 47 mostra um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Verifica-se que a discrepância resultante da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS (a esquerda) apresenta parcialmente grau de similaridade com as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR (a direita), apesar de uma tendência nas discrepâncias da comparação entre MDT SFM e LIDAR. Desta forma, considerando as imprecisões dos MDTs, é possível aceitar que ambos os MDTs possuem exatidões similares, porém, o MDT obtido por técnica fotogramétrica é melhor por apresentar menor grau de dispersão.

GRÁFICO 47- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 60% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.9 Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos verticais (RLO 80% e 75% RLA) + bloco a 100 m com fotos inclinadas (RLO 80% e 75% RLA).

Neste experimento são apresentados e discutidos os resultados de um experimento com características semelhantes o discutido no item 4.3.8 Excetuando-se um RLO de 80%, que no experimento prévio era RLO 60%, as características inerentes à geometria do recobrimento são rigorosamente as mesmas. Esta maior sobreposição entre imagens, em relação ao bloco anteriormente discutido, promoveu um aumento no número de imagens de aproximadamente 49%, resultando em um

total de 569 imagens. Para fins de análise, também será considerado um GSD médio igual 4,0 cm. Na TABELA 51 são apresentados os POI, resultantes da autocalibração empregando a configuração padrão de do software Agisoft PhotoScan. Segundo o critério da magnitude do desvio padrão “ σ ”, todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 51- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos verticais e inclinadas a 100 m, RLO 80% e RLA 75%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,628 | 0,0002 |
| x_0 | -0,0218 | 0,0000 |
| y_0 | 0,0082 | 0,0001 |
| K1 | 1,18E-03 | 2,28E-06 |
| K2 | -1,30E-04 | 3,74E-07 |
| K3 | 1,86E-06 | 1,78E-08 |
| P1 | -7,9E-05 | 3,57E-07 |
| P2 | 7,73E-05 | 3,88E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.9.1 Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%).

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 21 pontos de controle e 19 pontos de verificação. Na TABELA 52 é apresentado um resumo descritivo dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z nos 21 pontos de controle, empregados para referenciar cartograficamente a nuvem de pontos. Nota-se que tanto a precisão planimétrica (3,9 cm) quanto a altimétrica (5,6 cm) encontram-se próximo a metade das tolerâncias admissíveis, 2 GSD e 2,5 GSD respectivamente (8 cm e 10 cm).

TABELA 52- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 2,4 | 3,1 | 5,6 | 3,9 |
| Máximo | 4,8 | 4,7 | 6,0 | 9,8 |
| Mínimo | -4,9 | -9,7 | -13,4 | 0,5 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos são analisadas as discrepâncias tridimensionais em 19 pontos de verificação. Na TABELA 53, as exatidões planimétrica e altimétrica, obtidas com valores de EQM das discrepâncias, indicam magnitudes similares aos EQM determinados a partir dos resíduos nos pontos de apoio (precisões). Os p-valores dos testes estatísticos de normalidade e tendência, com um nível de confiança de 95%, comprovam estatisticamente que as componentes “ ΔX ” e “ ΔZ ” possuem distribuições normais e são isentas de tendência, apesar do valor da média, diferente de zero, sugerir o contrário. Já no caso da componente “ ΔY ”, o p-valor comprova estatisticamente a condição de normalidade (p-valor > 0,05), porém há tendência (p-valor < 0,05). O EQM das resultantes planimétricas (RP) é inferior ao limiar estabelecido (8 cm), portanto é plenamente aceito.

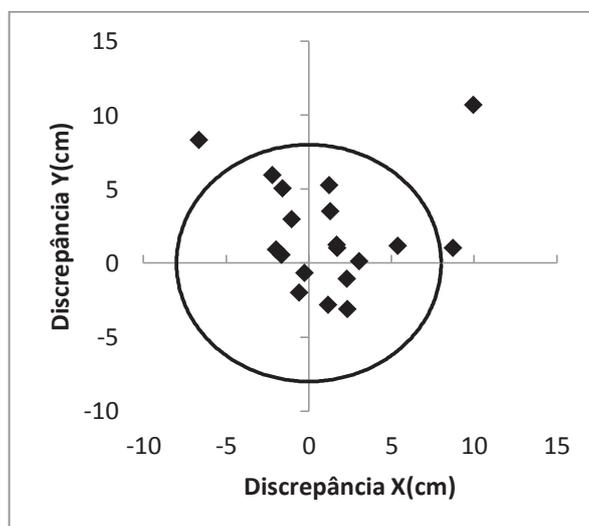
TABELA 53- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|---|----------------|
| EQM | 3,9 | 4,1 | 6,0 | 5,7 |
| Máximo | 10,0 | 10,7 | 15,9 | 14,6 |
| Média | 1,2 | 2,0 | 0,7 | 4,6 |
| Mínimo | -6,6 | -3,1 | -8,9 | 0,7 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,197 | 0,241 | 0,595 | |
| Tendência t | 0,189 | 0,029 | 0,612 | |

FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 48 apresenta-se a dispersão das discrepâncias planimétricas diante da tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). É possível constatar que apesar o EQM planimétrico calculado (5,7 cm) ser aceito dentro da tolerância admissível, verifica-se que três valores (15,8% das discrepâncias), extrapolaram o limite planimétrico admissível.

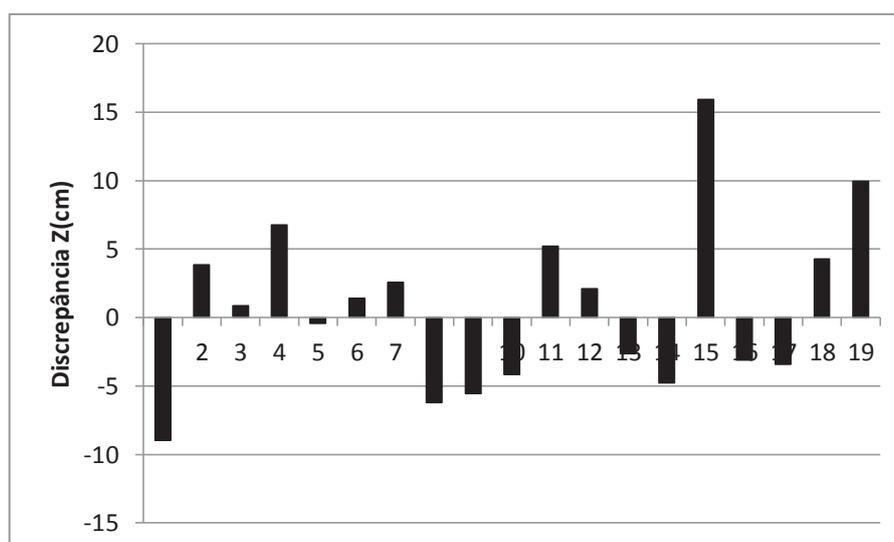
GRÁFICO 48- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Já no GRÁFICO 49, é possível visualizar a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Constata-se que apesar da magnitude do EQM encontrar-se abaixo do limiar estabelecido (10 cm), um único valor extrapola a tolerância estabelecida, representando um total de 5,3% das discrepâncias.

GRÁFICO 49- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

A FIGURA 24 a seguir permite a avaliação visual da qualidade da nuvem de pontos, quanto à reconstrução tridimensional de objetos. De maneira geral não se percebe falhas na reconstrução das edificações ou das árvores existentes na cena. É possível identificar, entretanto a existência de falhas de reconstrução ao nível de solo na região sombreada. Problema este já identificado e discutido em recobrimentos previamente analisados. As regiões sombreadas (homogênea e sem contraste) dificultam o algoritmo de detecção automática de pontos e conseqüentemente o adensamento de pontos nestas regiões. Por consequência, visualmente nota-se a presença de falhas na superfície reconstruída. Apesar do expressivo aumento no número de imagens empregadas no processamento, por conta da maior sobreposição, a nuvem densa de pontos continuou apresentando ruídos do tipo “salt and pepper”. Sendo assim, mais uma vez pode-se descartar uma eventual contribuição da quantidade de imagens empregadas e atribuir estes ruídos ao uso conjunto de imagens tomadas com inclinações distintas (fotos verticais e inclinadas).

FIGURA 24 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.9.2 Análise do Ortomosaico - Bloco composto- a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%).

Para análise da exatidão planimétrica deste produto foram empregados 40 pontos de verificação. A TABELA 54 mostra um resumo dos resultados obtidos e as estatísticas realizadas para as discrepâncias ΔX e ΔY . De acordo com os p-valores obtidos, ao nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras (p-valor $> 0,05$). Considerando 8 cm como limiar para a exatidão planimétrica admissível, nota-se que o EQM das resultantes planimétricas (8,3 cm) extrapola ligeiramente este limiar. Porém, se aplicado o teste de Wilcoxon para a média das resultantes planimétricas, com um nível de confiança de 95%, constata-se que a magnitude do EQM encontra-se dentro do intervalo de confiança da média. Portanto o EQM das resultantes planimétricas é estaticamente aceito dentro do limiar estabelecido.

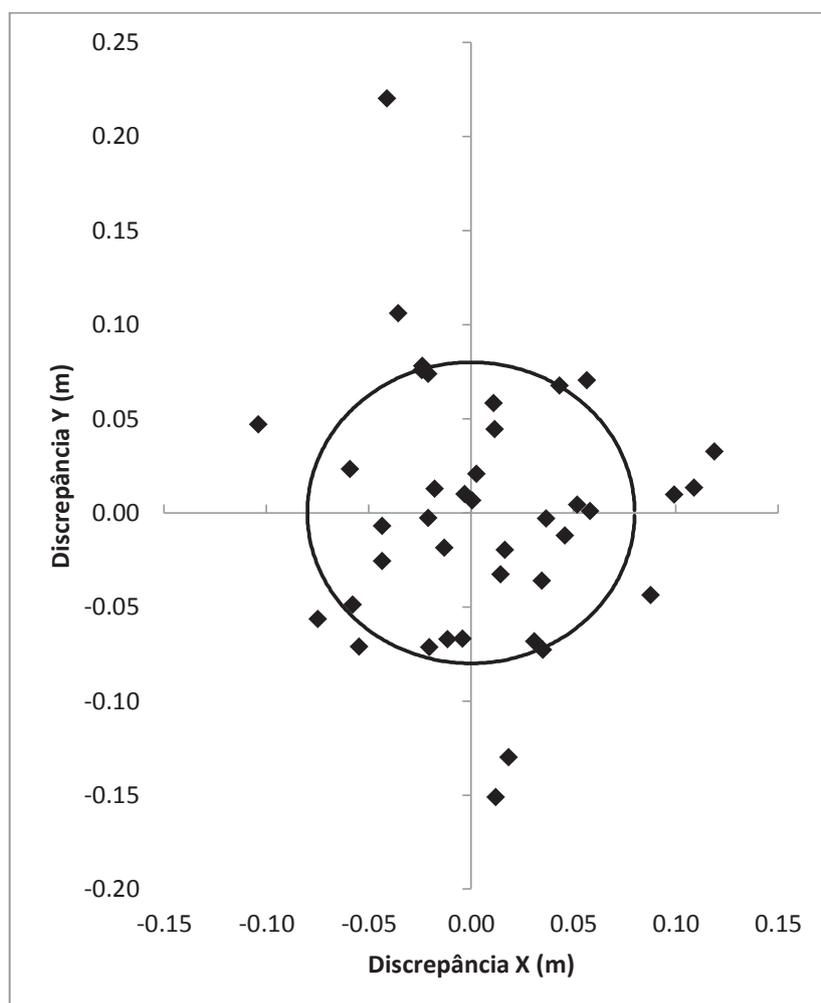
TABELA 54- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|----------------|
| EQM | 5,0 | 6,7 | 8,3 |
| Máximo | 11,9 | 22,0 | 22,4 |
| Média | 0,5 | -0,1 | 7,2 |
| Mínimo | -10,4 | -15,1 | 0,7 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,820 | 0,170 | |
| Tendência t | 0,492 | 0,933 | |

FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 50 é possível visualizar, no contexto da tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm), a distribuição das discrepâncias planimétricas. Apesar da admissão do EQM das resultantes planimétricas dentro do limiar estabelecido verifica-se que 35% das discrepâncias extrapolam este limiar. Observa-se que esta percentagem é próxima do dobro da que foi obtida na avaliação da nuvem de pontos (15,8%). Não é possível afirmar, entretanto sobre as causas desta variação. Uma hipótese provável para justificar esta variação pode estar relacionada com eventuais erros de medida nos mosaicos, relacionados à qualidade visual dos mesmos. Investigações dedicadas são necessárias.

GRÁFICO 50- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.9.3 Análise do MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%).

A verificação da exatidão altimétrica do MDT resultante da filtragem da nuvem de pontos, foi realizada com base nas posições planimétricas de 40 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. A TABELA 55 mostra as métricas e estatísticas obtidas a partir do cálculo das discrepâncias altimétricas. Tanto a hipótese de normalidade quanto de inexistência de tendência nos dados são comprovados pelos p-valores obtidos ao nível de confiança de 95% ($p\text{-valor} > 0,05$). Diante da limiar de 2,5 GSD (10 cm) constata-se que o EQM das discrepâncias altimétricas encontra-se abaixo do limite máximo tolerável. No GRÁFICO 51 é apresentado a distribuição das discrepâncias altimétricas, podendo ser visualizado a inexistência de tendência na amostra. Apesar do EQM das discrepâncias (exatidão

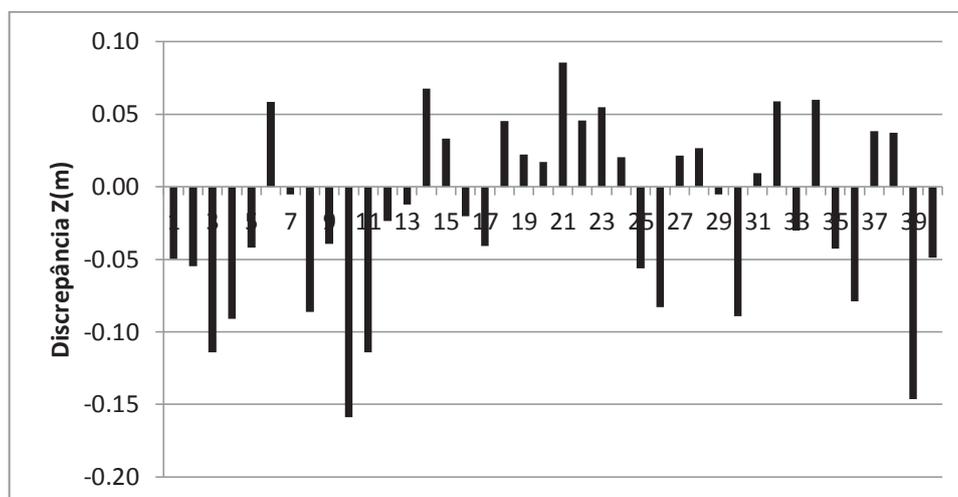
altimétrica) ser aceito dentro da tolerância altimétrica admissível (10 cm), 10% das discrepâncias altimétricas são superiores a tolerância altimétrica estabelecida.

TABELA 55- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 6,4 |
| Máximo | 8,5 |
| Média | -1,8 |
| Mínimo | -15,9 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,226 |
| Tendência t | 0,071 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 51- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Comparando com o resultado do recobrimento previamente discutido, pode-se considerar, apesar da sutil piora (10,25%), que a exatidão obtida é equivalente a anterior.

4.3.9.4 Comparativo MDT - Bloco composto - a 100 m - fotos verticais e inclinadas (RLO 80% e RLA 75%) com MDT (LIDAR).

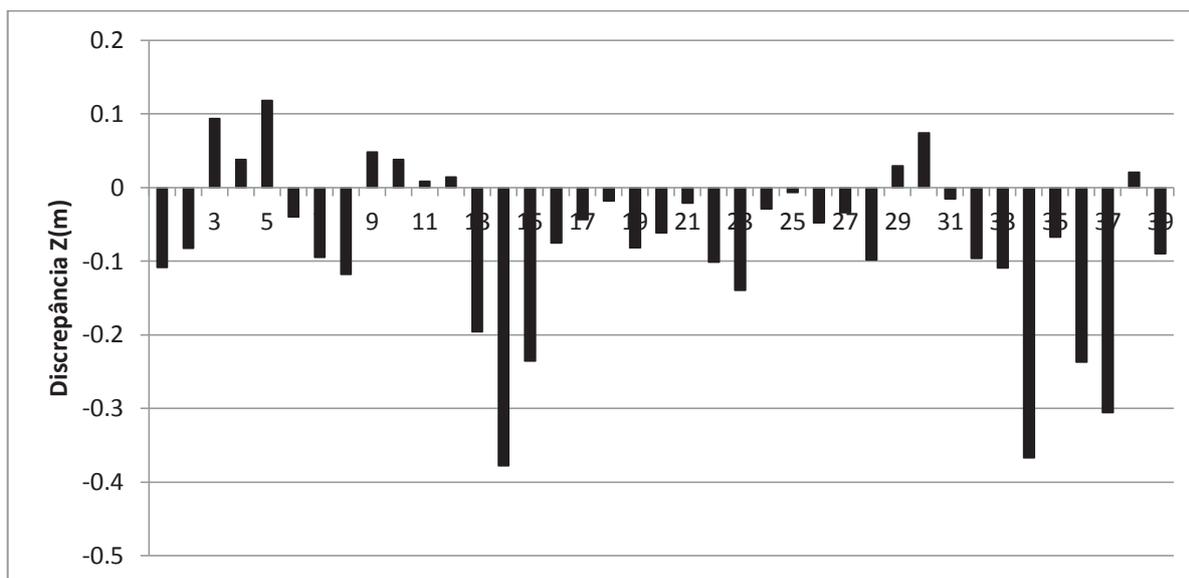
Na TABELA 56 são apresentados os resultados da segunda verificação do MDT, com base em um MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado. O EQM das discrepâncias altimétricas apresentou valor de 13,4 cm. Valor este aproximadamente 11,8 % melhor que o obtido na comparação do recobrimento anteriormente discutido. Conclui-se portanto que a aparente degradação da exatidão altimétrica, mencionada no item anterior, cuja percentagem é 10,25%, promoveu uma redução na diferença entre os dois modelos de elevação (MDT SFM e MDT LIDAR). Considerando as precisões do MDT fotogramétrico SFM ($\sigma \pm 10$ cm) e do MDT LIDAR ($\sigma \pm 10$ cm) o EQM igual a 13,4 cm é perfeitamente aceitável. Apesar da aceitação da magnitude do EQM, a média negativa e diferente de zero, sugere uma provável distribuição anormal e provável tendência na amostra. O p-valor do teste SW, com o nível de confiança de 95%, comprova estatisticamente que o conjunto de discrepâncias não possui uma distribuição normal. Aplica-se então o teste não paramétrico de Wilcoxon para comprovar se o valor da média dos valores absolutos das discrepâncias, é menor ou igual a tolerância admissível (± 10 cm). Com o nível de confiança de 95% obtém-se para o teste de Wilcoxon um p-valor igual a 0,131 comprovando, portanto a aceitabilidade do valor da média. Uma visualização da distribuição das discrepâncias bem como uma tendência negativa, pode ser verificada no GRÁFICO 52.

TABELA 56- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 13,4 |
| Máximo | 11,8 |
| Média | -7,2 |
| Mínimo | -37,8 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,001 |
| Teste de tendência | |

FONTE: O autor (2019).

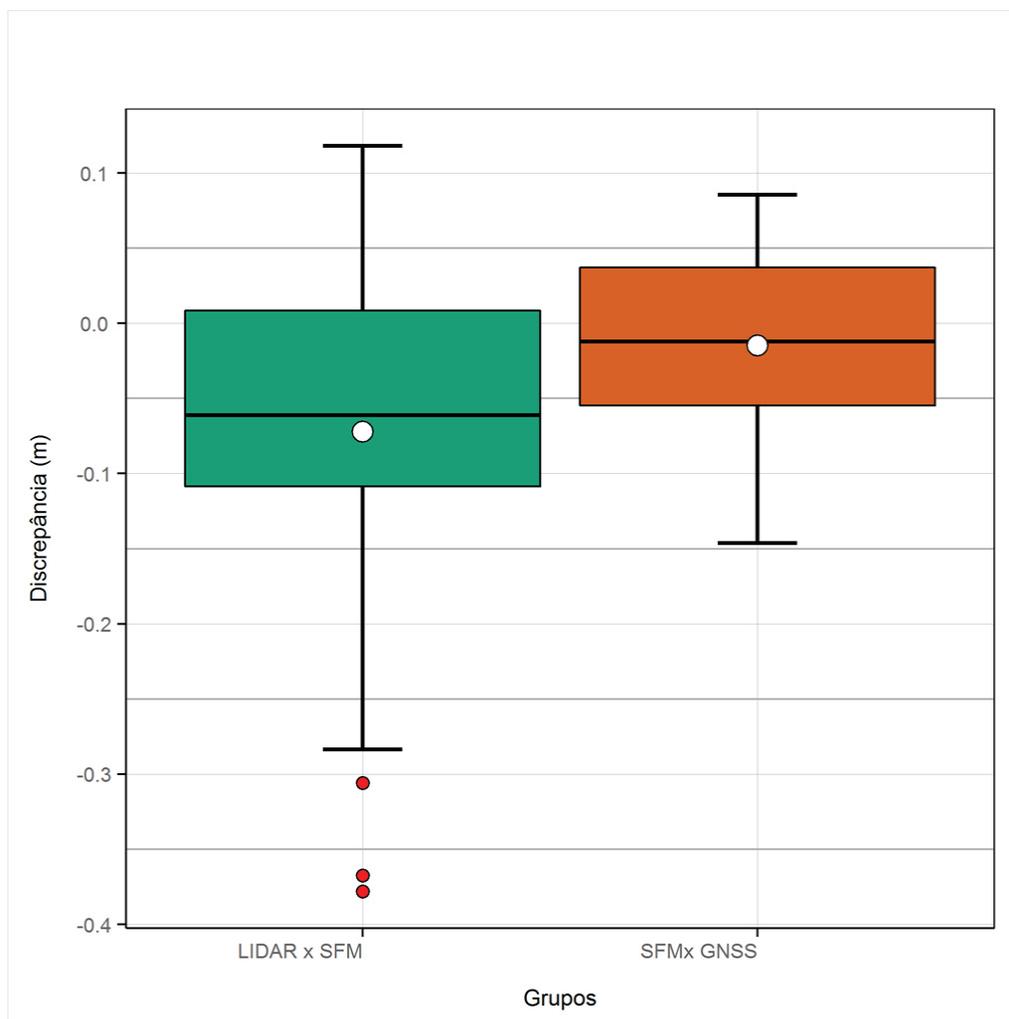
GRÁFICO 52- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

NO GRÁFICO 53 é possível visualizar um comparativo das discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Considerando o resultado obtido no recobrimento anteriormente discutido (GRÁFICO 47), verifica-se que a discrepância resultante da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS (a esquerda) apresenta grau de similaridade com as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR (a direita), apesar de uma tendência nas discrepâncias da comparação entre MDT SFM e LIDAR. Isso ilustra perfeitamente a já mencionada redução na diferença entre os dois modelos de elevação. Desta forma, é possível novamente aceitar que ambos os MDTs possuem exatidões similares, dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 53- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos verticais e inclinadas, RLO 80% e RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.10 Aerolevantamento a 200 m com fotos verticais. Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%.

Neste tópico apresenta-se e discute-se os resultados obtidos do experimento empregando um recobrimento aéreo realizado na altura de voo igual a 200 m e câmera orientada verticalmente em relação ao solo ($\pm 4^\circ$). No processamento do bloco fotogramétrico são consideradas 48 imagens e a condição padrão do software Agisoft PhotoScan para a determinação dos POI por meio de autocalibração. A TABELA 57 mostra os resultados obtidos com a autocalibração e as respectivas precisões (σ). Com base nos valores de “ σ ”, admite-se que todos os parâmetros são significativos.

TABELA 57- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,6547 | 0,0019 |
| x_0 | -0,0274 | 0,0002 |
| y_0 | 0,0095 | 0,0003 |
| K1 | 1,23E-03 | 8,60E-06 |
| K2 | -1,33E-04 | 1,45E-06 |
| K3 | 1,76E-06 | 6,60E-08 |
| P1 | -1,57E-05 | 1,22E-06 |
| P2 | 5,42E-05 | 1,68E-06 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.10.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 200 m - fotos verticais RLO 60% e RLA 60%.

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 21 pontos de controle e 18 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 58 o resumo descritivo dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z em 21 pontos de controle, empregados para referenciar cartograficamente a nuvem de pontos. Os valores de EQM da resultante planimétrica (6,4 cm) e EQM altimétrico são inferiores aos respectivos limites estabelecidos para as tolerâncias planimétricas e altimétricas na altura de voo do recobrimento (16 cm em planimetria e 20 cm para altimetria).

TABELA 58- Resumo dos resíduos. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 3,6 | 5,2 | 5,5 | 6,4 |
| Máximo | 8,1 | 16,5 | 10,2 | 16,6 |
| Mínimo | -7,1 | -8,5 | -11,3 | 1,1 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos são analisadas as discrepâncias tridimensionais em 18 pontos de verificação. Na TABELA 59 verificam-se as exatidões planimétrica (6,8 cm) e altimétrica (6,9 cm), obtidas com os valores de EQM das discrepâncias. As magnitudes das exatidões foram similares aos valores de EQM planimétrico e altimétrico determinados a partir dos resíduos nos

pontos de apoio (precisões). O p-valor dos testes estatísticos de cada componente cartesiana comprova com um nível de confiança de 95%, que as discrepâncias possuem distribuição normal e estão isentas de tendência, apesar dos valores das médias, diferentes de zero, indicarem o contrário. Tanto o EQM das resultantes planimétricas (6,8 cm) quanto o EQM altimétrico (6,9 cm) são inferiores às tolerâncias planimétricas e altimétricas estabelecidas. Considerando o primeiro experimento descrito no item 4.3.1, as principais diferenças em relação a este experimento são a mudança na altura de voo e uma redução de 15% na sobreposição entre faixas (RLA). Verifica-se que houve para a nuvem de pontos, uma melhora nas exatidões planimétrica e altimétrica de aproximadamente 31% e 34% respectivamente. Com isso é possível afirmar que a geometria do recobrimento exerce forte influência no potencial de obtenção das exatidões planimétricas e altimétricas.

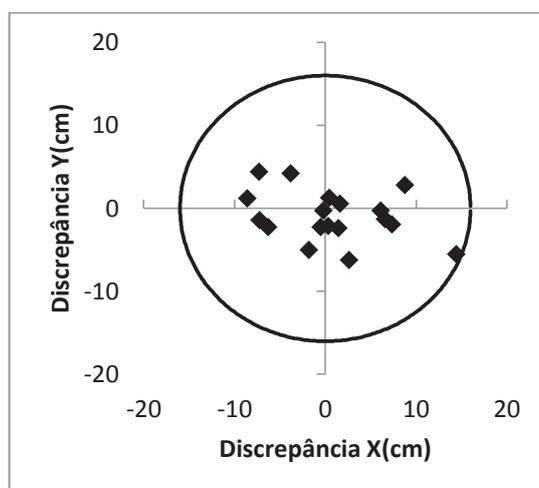
TABELA 59- Resumo das discrepâncias. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|---|----------------|
| EQM | 6,1 | 3,1 | 6,9 | 6,8 |
| Máximo | 14,5 | 4,4 | 13,0 | 15,5 |
| Média | 0,8 | -1,0 | 2,3 | 5,8 |
| Mínimo | -8,6 | -6,3 | -6,3 | 0,3 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,669 | 0,388 | 0,077 | |
| Tendência t | 0,593 | 0,201 | 0,171 | |

FONTE: O autor (2019).

Uma análise visual da distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser feita por meio do GRÁFICO 54. A circunferência representa a tolerância planimétrica de 2 GSD (16,0 cm) e como pode ser visto, nenhum valor ultrapassou este limiar.

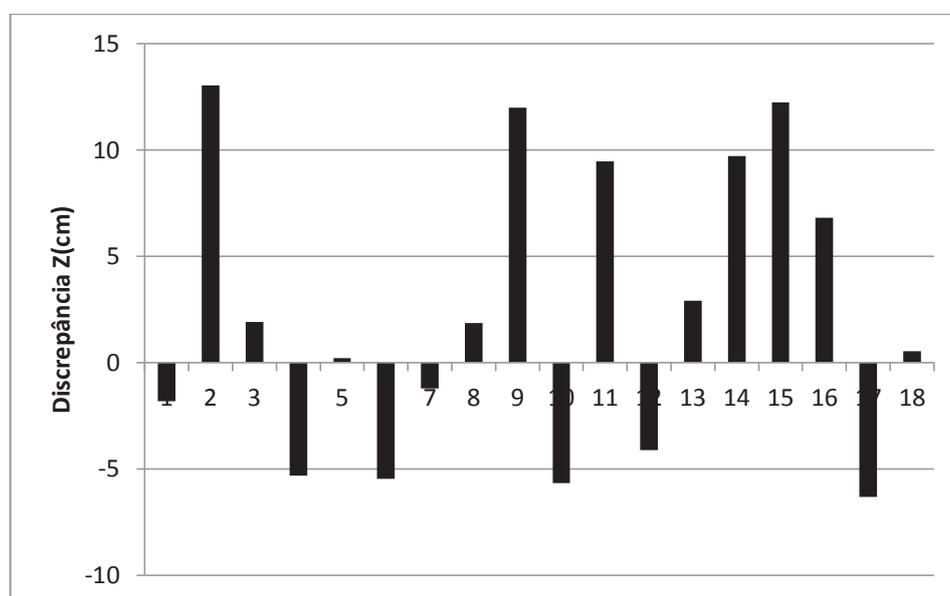
GRÁFICO 54- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 55 visualiza-se a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Constata-se que nenhum valor de discrepância ultrapassa a tolerância admissível (20 cm) e no geral, encontram-se semelhantes aos valores obtidos no recobrimento equivalente, a 100 m.

GRÁFICO 55- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.

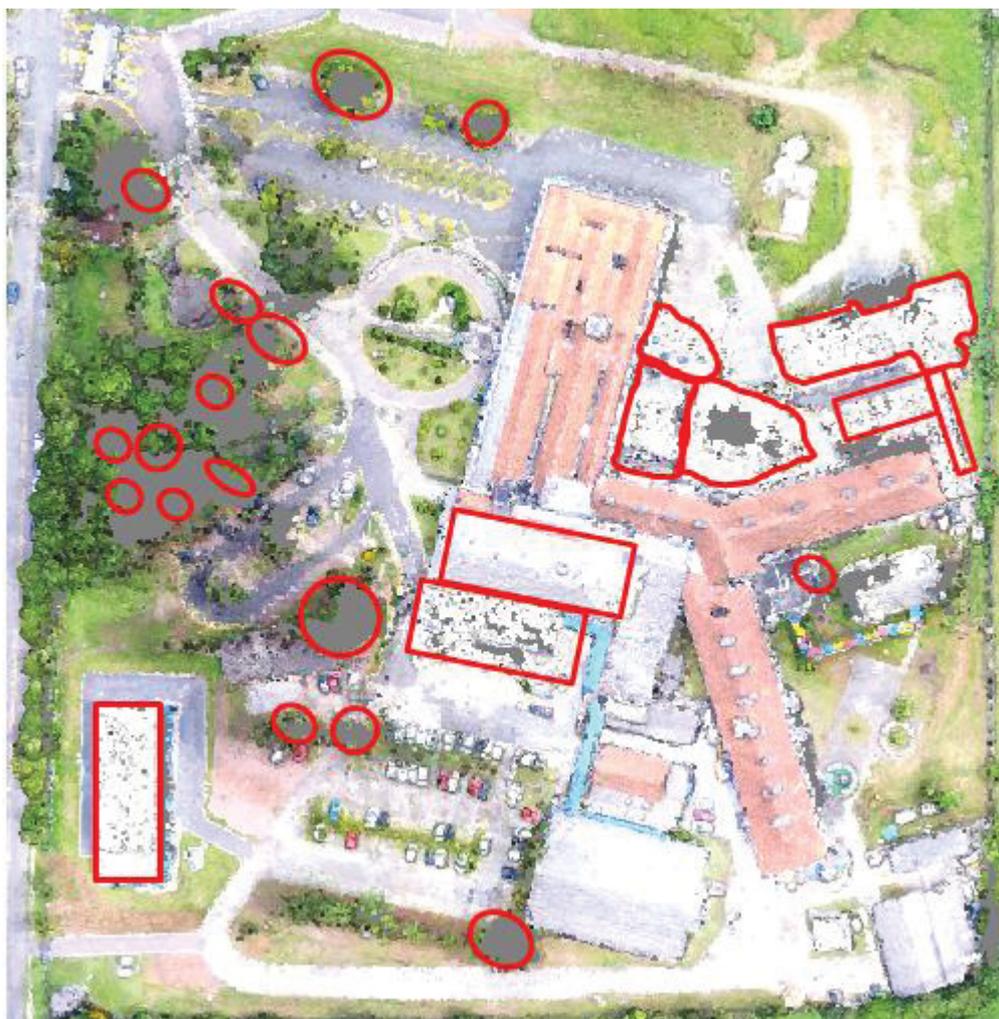


FONTE: O autor (2019).

A inspeção visual da nuvem densa, de uma sub-região da área de estudo (FIGURA 25), revela que houve 26% de falha na reconstrução das árvores do cenário considerado e 42% de falha da reconstrução de edifícios. No caso das

árvores, a causa provável do fenômeno está associada a menor quantidade de imagens empregada no processamento do bloco (60% RLO e 60% RLA). Isso diminui a possibilidade de estabelecimento de pontos homólogos e em muitos casos, a exatidão da interseção (menor número de raios definindo o ponto). Para o caso das edificações, uma parcela do problema pode ser atribuída ao número reduzido de imagens e existentes e ao dificuldade do algoritmo na medição de pontos homólogos em áreas homogêneas das imagens. Dada à característica física dos telhados e a posição do sol na hora do recobrimento aéreo, houve um alto índice de reflexão especular nos telhados, ocasionando deficiência no preenchimento por pontos ou determinações inconsistentes com o plano da superfície (descontinuidade).

FIGURA 25 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 200 m Vertical (RLO 60% e RLA 60%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.10.2 Análise do Ortomosaico - voo 200 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%

Para análise da exatidão planimétrica deste produto foram empregados 31 pontos de verificação. A TABELA 60 mostra por meio de métricas e estatísticas, um resumo das discrepâncias ΔX e ΔY . De acordo com os p-valores obtidos para a componente "X", ao nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência (p-valor > 0,05). De acordo com o mesmo critério, a componente "Y" apresenta uma distribuição normal, porém com tendência. Adotando o valor de 2 GSD para a tolerância planimétrica e aplicando o Test t com 95% de confiança, o EQM das resultantes planimétricas (9,0 cm) é estatisticamente aceito dentro do intervalo de confiança da média ($6,6 \text{ cm} \leq \text{EQM} \leq 9,4 \text{ cm}$) e da tolerância planimétrica estabelecida (2 GSD = 16 cm).

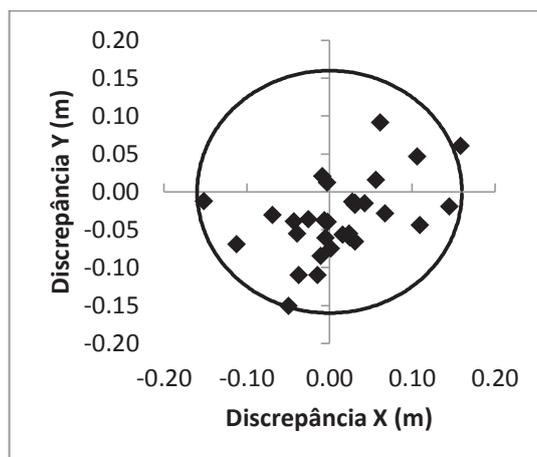
TABELA 60- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|----------------|
| EQM | 6,6 | 6,0 | 9,0 |
| Máximo | 15,9 | 9,1 | 17,0 |
| Média | 1,2 | -3,4 | 7,9 |
| Mínimo | -15,2 | -15,1 | 1,2 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,540 | 0,689 | |
| Tendência t | 0,334 | 0,001 | |

FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 56- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas em relação a uma circunferência de raio igual à tolerância planimétrica de 2 GSD (16,0 cm). Ainda que se admita o EQM da resultante planimétrica como dentro do limiar estabelecido, ao nível de confiança de 95%, verifica-se que 3% das discrepâncias extrapolam este limiar. Apesar do emprego de um maior número de pontos de verificação, a percentagem de discrepâncias planimétricas que não se enquadra à tolerância planimétrica é similar ao valor obtido na avaliação da nuvem de pontos (0%).

GRÁFICO 56- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Experimento a 200 m, fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.10.3 Análise do MDT - voo 200 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%

A verificação da exatidão altimétrica do MDT resultante da filtragem da nuvem de pontos, obtida pelo processo fotogramétrico SFM, foi realizada com base nas posições planimétricas dos 31 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico.

Na TABELA 61 encontram-se os resultados obtidos a partir dos cálculos das discrepâncias altimétricas. A média das discrepâncias, diferente de zero, sugere não normalidade dos dados e provável tendência. Contudo, os testes estatísticos aplicados ao nível de confiança de 95% comprovam as hipóteses de normalidade e de inexistência de tendência ($p\text{-valor} > 0,05$). O valor do EQM das altimétrico possui uma magnitude inferior à tolerância estabelecida ($9,2 \text{ cm} < 16 \text{ cm}$). Mesmo assim, nem todas as discrepâncias se enquadram nesse limiar (3%).

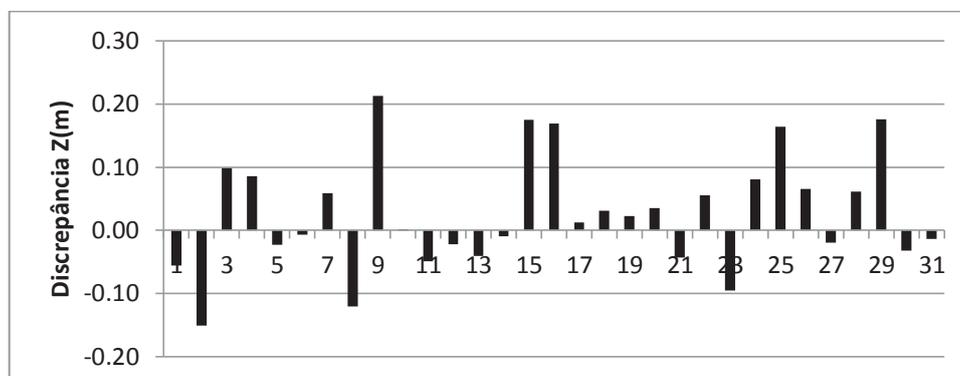
TABELA 61- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 9,2 |
| Máximo | 21,3 |
| Média | 2,7 |
| Mínimo | -15,1 |
| Estatísticas | ($p\text{-valor}$) Z |
| Normalidade SW | 0,414 |
| Tendência t | 0,107 |

FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 57 é apresentada a distribuição das discrepâncias altimétricas, podendo ser constatado que apenas uma única discrepância extrapolou a tolerância estabelecida.

GRÁFICO 57- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.10.4 Comparativo MDT - voo 200 m - fotos verticais, RLO 60% e RLA 60% com MDT (LIDAR).

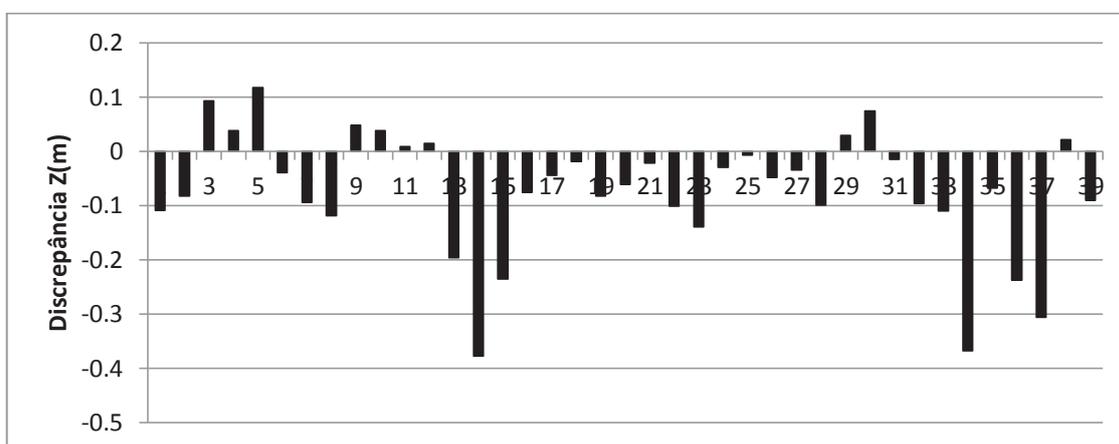
A segunda verificação foi realizada empregando o mesmo conjunto de pontos que foi utilizado na verificação anterior com excessão de um ponto que foi removido (*outlier*). Na TABELA 62- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%. são apresentados os valores das métricas e estatísticas obtidas a partir das discrepâncias altimétricas entre MDT fotogramétrico SFM com o MDT LIDAR. O EQM das discrepâncias (15,8 cm) pode ser admitido como dentro da exatidão esperada, considerando as imprecisões do MDT fotogramétrico SFM ($\sigma \pm 20$ cm) e do MDT LIDAR ($\sigma \pm 10$ cm). Analisando a média das discrepâncias, verifica-se um valor negativo diferente de zero, indicando uma provável distribuição anormal e tendência na amostra. A condição de normalidade é comprovada pelo teste estatístico de SW (p -valor $> 0,05$), porém a hipótese de inexistência de existência de tendência é rejeitada pelo p -valor do Teste t (p -valor $< 0,05$), ambos a um nível de confiança de 95%. Uma visualização da distribuição das discrepâncias altimétricas bem como uma tendência negativa, pode ser verificada no GRÁFICO 58.

TABELA 62- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 15,8 |
| Máximo | 5,0 |
| Média | -11,7 |
| Mínimo | -39,1 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,079 |
| Teste de tendência | 0,000 |

FONTE: O autor (2019).

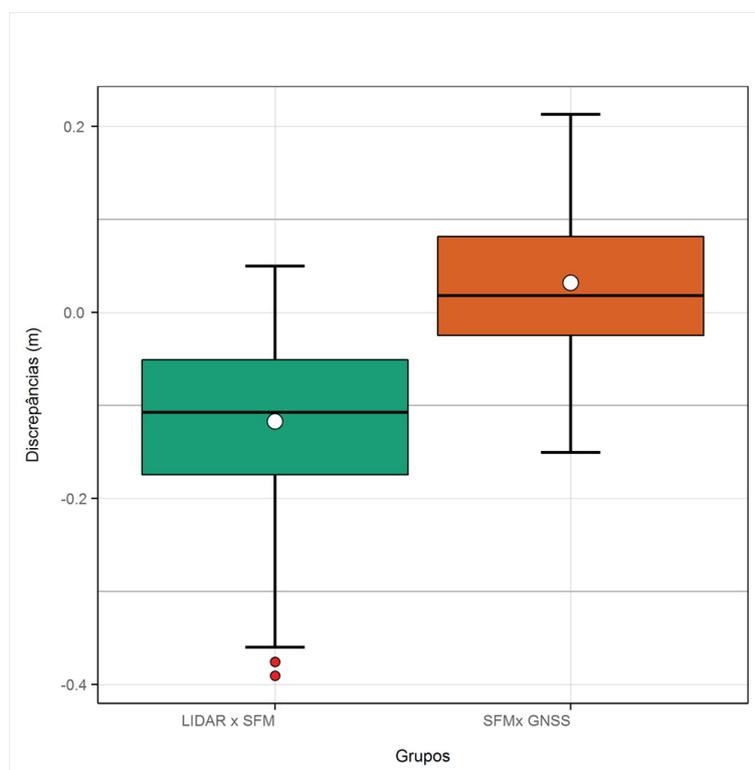
GRÁFICO 58- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 59 mostra um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Verifica-se que o mesmo comportamento já observado nos experimentos anteriores se repete. Aceita-se portanto que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 59- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.11 Aerolevantamento a 200 m com fotos verticais, faixas cruzadas.

Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%.

Neste experimento discute-se um reprocessamento do bloco anterior, adicionando-se faixas de voo cruzadas com as mesmas características geométricas (RLO60% e RLA60%). Este novo bloco possui um total de 96 imagens verticais ($\pm 4^\circ$) tomadas na altura de voo de 200 m. A TABELA 63 mostra os resultados da autocalibração e as respectivas precisões (σ). Com base nos valores de " σ ", admite-se que todos os parâmetros são significativos. Observando os recobrimentos previamente discutidos e seus respectivos POI, percebe-se uma correlação entre o número de imagens no bloco e a magnitude da distância focal. Há uma tendência na diminuição da magnitude do parâmetro "C" à medida que se aumenta o número de imagens no processamento.

TABELA 63- POI determinado na autocalibração no experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,6476 | 0,0013 |
| x_0 | -0,0245 | 0,0001 |
| y_0 | 0,0123 | 0,0002 |
| K1 | 1,15E-03 | 8,41E-06 |
| K2 | -1,31E-04 | 1,43E-06 |
| K3 | 2,07E-06 | 6,78E-08 |
| P1 | 1,14E-05 | 1,46E-06 |
| P2 | -1,05E-05 | 7,04E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.11.1 Análise da nuvem densa de pontos - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 21 pontos de controle e 18 pontos de verificação. Apresenta-se na TABELA 64 o resumo descritivo dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z em 21 pontos de controle, empregados para referenciar cartograficamente a nuvem de pontos. Os valores de EQM da resultante planimétrica (6,4 cm) e EQM altimétrico são inferiores às respectivas tolerâncias planimétrica e altimétrica, estabelecidas para a altura de voo do recobrimento (16 cm em planimetria e 20 cm para altimetria).

TABELA 64- Resumo dos resíduos. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 3,7 | 4,1 | 4,8 | 5,5 |
| Máximo | 11,0 | 13,5 | 9,2 | 13,5 |
| Mínimo | -6,9 | -5,3 | -10,6 | 0,7 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos foram analisadas as discrepâncias tridimensionais em 18 pontos de verificação. Os mesmos do recobrimento anteriormente discutidos. Na TABELA 65, as exatidões planimétrica e altimétrica, representadas pelos valores de EQM, indicam magnitudes similares aos

EQM determinados a partir dos resíduos nos pontos de apoio (precisões), porém ligeiramente melhores. O p-valor dos testes estatísticos com um nível de confiança de 95% comprova que todos os conjuntos de discrepâncias analisadas possuem uma distribuição normal e não apresentam tendência, apesar dos valores das médias, diferentes de zero, indicarem o contrário.

TABELA 65 - Resumo das discrepâncias. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.

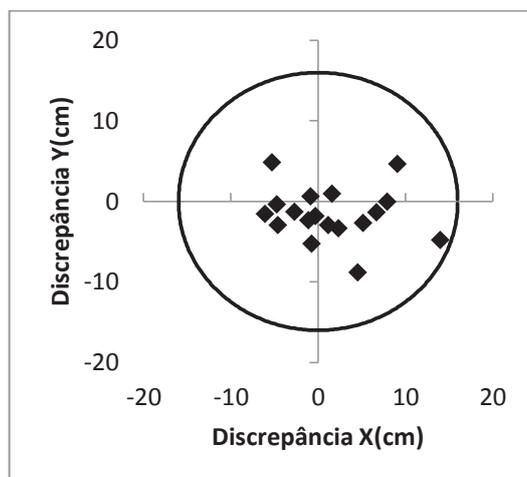
| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|---|----------------|
| EQM | 5,6 | 3,6 | 5,4 | 6,6 |
| Máximo | 14,0 | 4,8 | 11,1 | 14,8 |
| Média | 1,5 | -1,6 | 2,3 | 5,7 |
| Mínimo | -6,1 | -8,9 | -5,3 | 1,0 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,485 | 0,493 | 0,532 | |
| Tendência t | 0,283 | 0,050 | 0,068 | |

FONTE: O autor (2019).

O EQM das resultantes planimétricas (6,6 cm) e o EQM altimétrico (5,9 cm) são inferiores às tolerâncias planimétrica e altimétrica estabelecidas. Considerando a que a principal diferença entre este experimento e o anterior seja o número de imagens empregadas no processamento, verifica-se a existência de melhoras nas exatidões, porém não significativas. A melhora mais significativa foi em altimetria (12%).

Uma análise visual da distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser feita por meio do GRÁFICO 60. Verifica-se que nenhuma discrepância ultrapassou o limiar planimétrica de 2 GSD (16,0 cm), definido pela circunferência.

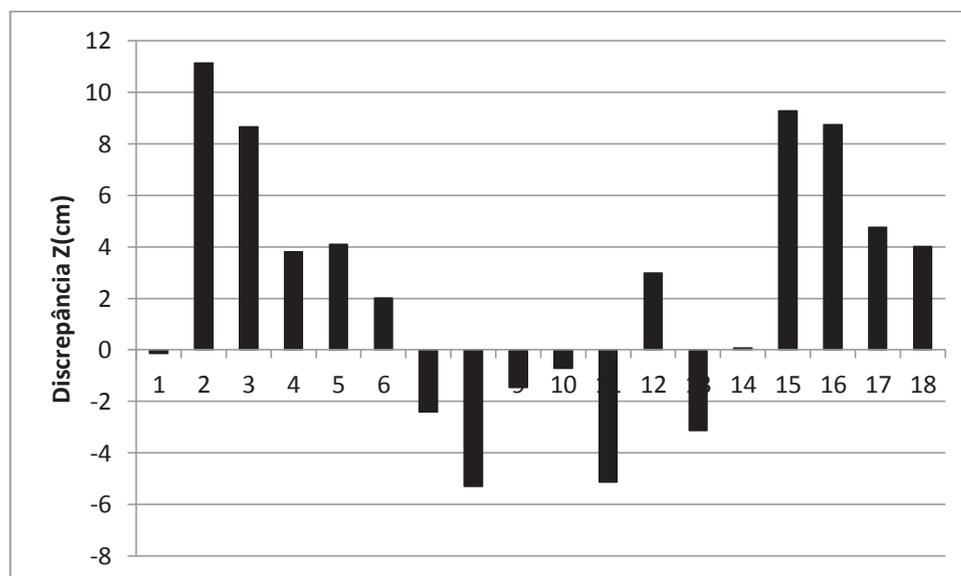
GRÁFICO 60- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 61 permite uma visualização da distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. É possível verificar que nenhum valor de discrepância ultrapassa a tolerância admissível (20 cm).

GRÁFICO 61- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.

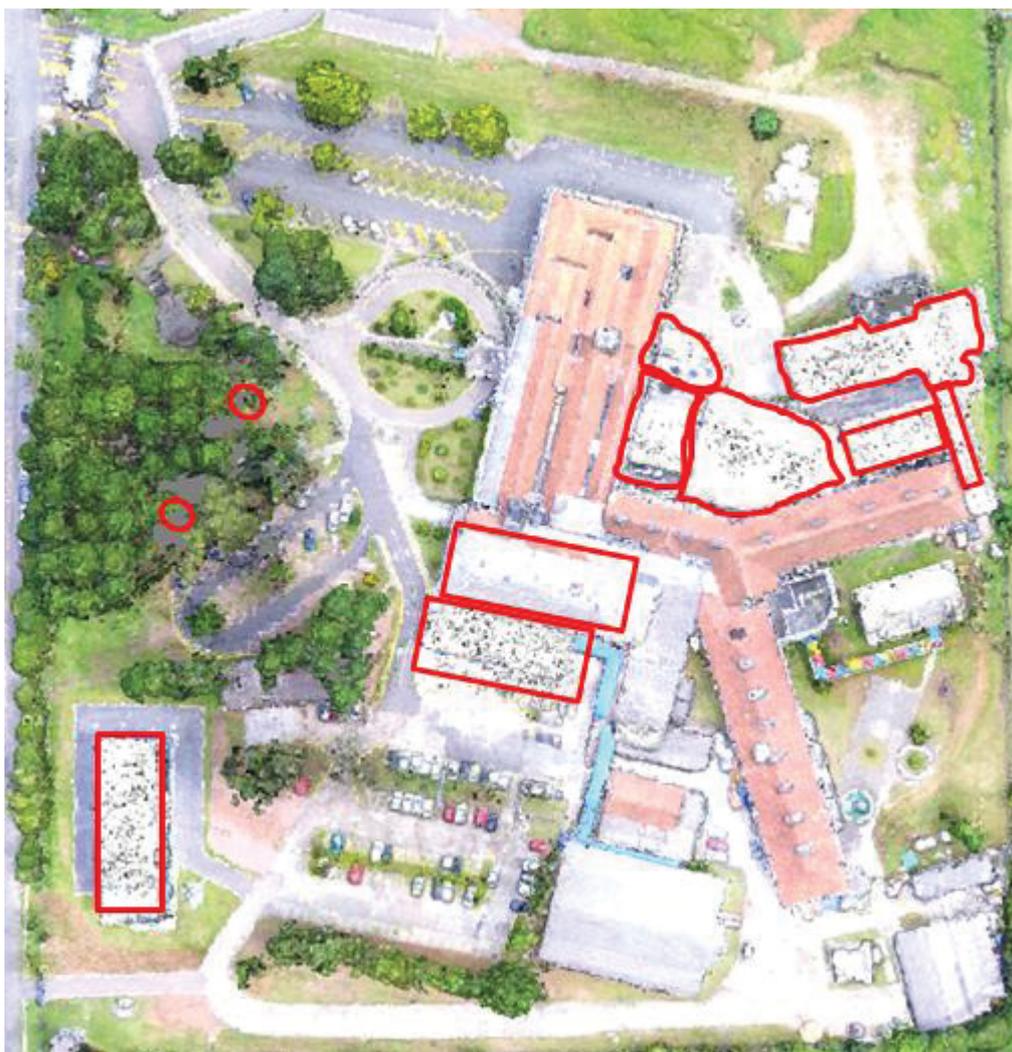


FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 26 é possível visualizar uma sub-região da área de estudo que mostra 3% de falhas na reconstrução de árvores e 42% de falha da reconstrução de

edifícios. Comparando com o recobrimento anterior (número de imagens 50% menor) percebe-se que a alteração mais significativa foi na classe vegetação que antes representava 26% de falha. A menor quantidade de imagens disponível para a geração da nuvem densa, apontada como causa provável das falhas, foi sanada com a adição de faixas cruzadas. Entretanto, para o caso das edificações o problema persistiu. Isso corrobora com a conclusão sobre a falha da reconstrução das edificações serem atribuídas a dificuldade do algoritmo na medição de pontos homólogos em áreas homogêneas das imagens. O alto índice de reflexão especular nos telhados promoveu falhas de preenchimento ou determinação inconsistente com o plano da superfície (descontinuidade).

FIGURA 26 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento 200 m Vertical, faixas cruzadas (RLO 60% e RLA 60%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.11.2 Análise do Ortomosaico - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60%.

Para análise da exatidão planimétrica do ortomosaico foram empregados 36 pontos de verificação. A TABELA 66 mostra por meio de métricas e estatísticas, o resumo das discrepâncias ΔX e ΔY . De acordo com os valores obtidos, ao nível de significância de 95% ($\alpha=0,05$), a única hipótese rejeitada é a inexistência de tendência na componente “Y” (p -valor $< 0,05$). Adotando o valor de 2 GSD para a tolerância planimétrica e aplicando o Test t com 95% de confiança, o EQM das resultantes planimétricas (9,3 cm) é estatisticamente aceito dentro do intervalo de confiança da média ($7,3 \text{ cm} \leq \text{EQM} \leq 9,8 \text{ cm}$) e do limiar planimétrico estabelecido ($\text{EQM} \geq 16 \text{ cm}$).

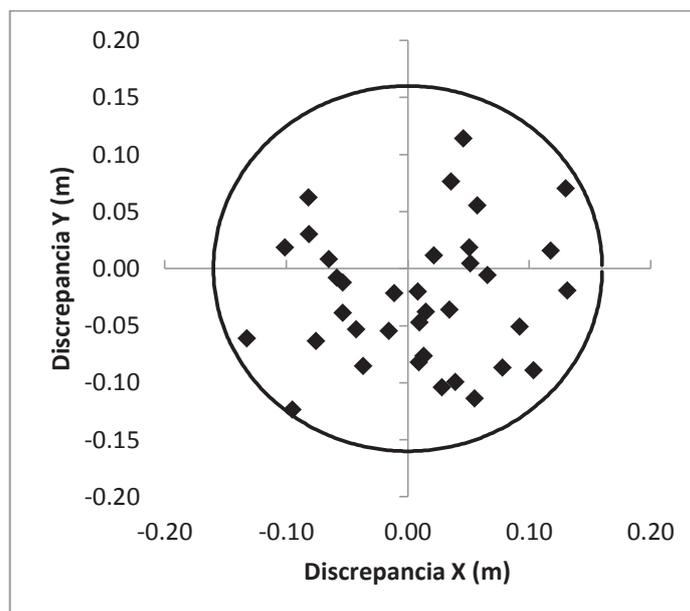
TABELA 66- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|----------------|
| EQM | 6,9 | 6,3 | 9,3 |
| Máximo | 13,2 | 11,4 | 15,6 |
| Média | 0,8 | -2,5 | 8,6 |
| Mínimo | -13,2 | -12,4 | 2,2 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,527 | 0,644 | |
| Tendência t | 0,480 | 0,013 | |

FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 62 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas em relação à tolerância planimétrica de 2 GSD (16,0 cm). É possível notar que nenhum valor extrapola a tolerância planimétrica estabelecida. A equivalência na percentagem de reprovação de pontos que ultrapassam o limiar estabelecido, na nuvem de pontos e no ortomosaico, também é observada aqui.

GRÁFICO 62- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Experimento fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.11.3 Análise do MDT - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%

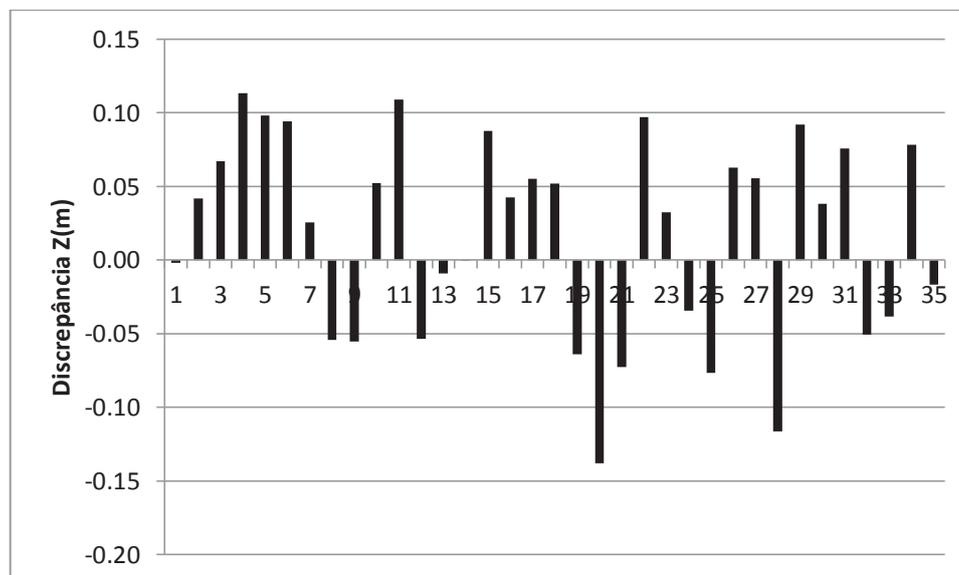
A verificação da exatidão altimétrica do MDT resultante da filtragem da nuvem de pontos, obtida pelo processo fotogramétrico SFM, foi realizada com base nas posições planimétricas dos 36 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. Na TABELA 67 encontram-se os resultados obtidos a partir do cálculo das discrepâncias altimétricas. Verificando as hipóteses de normalidade e de inexistência de tendência ao nível de confiança de 95%, constata-se que todas as hipóteses são aceitas ($p\text{-valor} > 0,05$). O valor do EQM das discrepâncias possui uma magnitude inferior à tolerância altimétrica estabelecido ($7,0 \text{ cm} < 16 \text{ cm}$) e nenhum valor extrapola este limiar. Comparando-se o valor do EQM altimétrico com os valores previamente obtidos em outros experimentos, constata-se que o presente valor foi o melhor resultado obtido até o momento. A relação base/altura em conjunto com o maior número de imagens (faixas cruzadas), contribuiu com o aumento da exatidão altimétrica do experimento. No GRÁFICO 63 é possível visualizar a distribuição das discrepância altimétricas obtidas.

TABELA 67- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|----------------|-----------------------|
| EQM | 7,0 |
| Máximo | 11,3 |
| Média | 1,4 |
| Mínimo | -13,8 |
| Estatísticas | (p-valor) Z |
| Normalidade SW | 0,051 |
| Tendência t | 0,225 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 63- Discrepâncias altimétricas MDT. Fotos verticais, faixas cruzadas. RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.11.4 Comparativo MDT - voo 200 m - fotos verticais, faixas cruzadas, RLO 60% e RLA 60% com MDT (LIDAR)

A segunda verificação foi realizada empregando o mesmo conjunto de pontos que foi utilizado na verificação anterior com excessão de um ponto que foi removido (*outlier*). Na TABELA 68 são apresentados os valores das métricas e estatísticas obtidas a partir das discrepâncias entre o MDT fotogramétrico SFM e MDT LIDAR. O EQM das discrepâncias, apresentou valor de 13,6 cm. Valor este que

pode ser admitido como dentro da exatidão esperada, considerando as imprecisões do MDT fotogramétrico SFM ($\sigma \pm 20$ cm) e do MDT LIDAR ($\sigma \pm 10$ cm). Analisando a média das discrepâncias, verifica-se a ocorrência de um valor negativo diferente de zero, indicando uma provável distribuição anormal da amostra. A condição de normalidade é comprovada pelo teste estatístico de SW, porém a inexistência de existência de tendência não é comprovada pelo p-valor do teste t. Em ambos os testes considerou-se um nível de confiança de 95%.

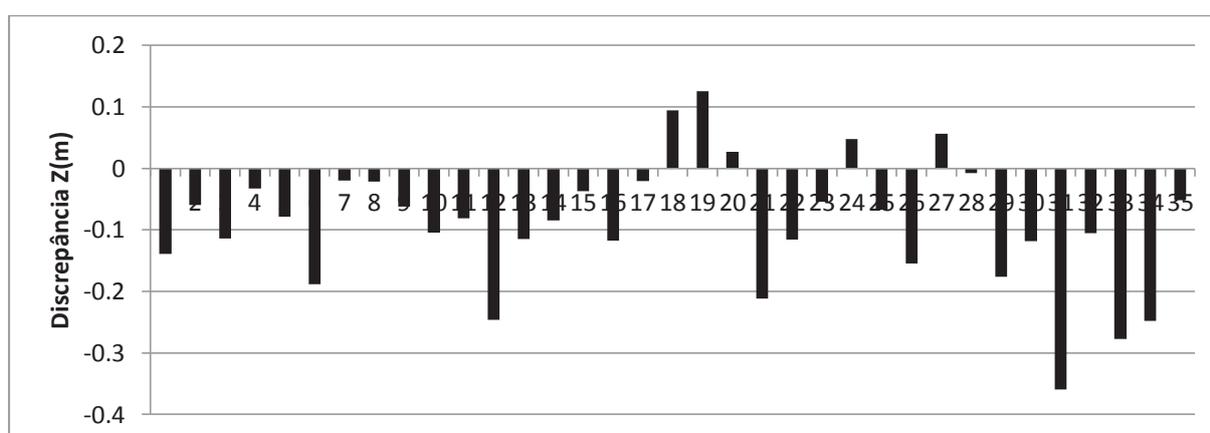
A visualização da distribuição das discrepâncias bem como a tendência negativa, pode ser feita no GRÁFICO 64.

TABELA 68- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 13,6 |
| Máximo | 12,6 |
| Média | -8,9 |
| Mínimo | -35,9 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,779 |
| Teste de tendência | 0,000 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 64- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. RLO 60% e RLA 60%.

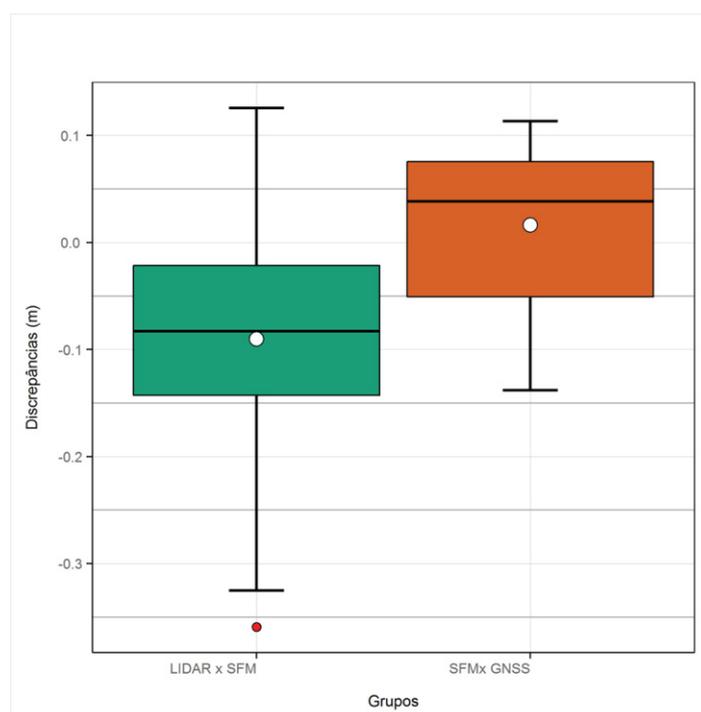


FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 65 mostra o comparativo das discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Considerando os experimentos anteriores e as precisões

altimétricas de cada conjunto analisado, verifica-se a mesma relação entre ambas as fontes de dados. Desta forma, aceita-se que os MDTs possuem exatidões similares dentro de suas imprecisões.

GRÁFICO 65- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.12 Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos verticais (RLO 80% e 75% RLA) + bloco a 200 m com fotos verticais (RLO 60% e 60% RLA).

Além dos recobrimentos com as características geométricas previamente apresentadas e discutidas, decidiu-se investigar uma condição de recobrimento geralmente empregada em procedimentos de calibração aérea. Recobrimentos com distintas alturas de voo têm como principal objetivo a quebra de dependência linear (correlação) entre POI e alguns POE (ANDRADE, 2003 e JACOBSEN, 2004). Neste experimento serão apresentados e discutidos os resultados obtidos do processamento de um bloco de 296 imagens verticais ($\pm 4^\circ$), tomadas com faixas de voo cruzadas em altitudes distintas. Neste bloco fotogramétrico, um conjunto de imagens foi tomado com altura de voo próxima de 100 m, recobrimento longitudinal de 80% e recobrimento lateral de 75% enquanto outro conjunto de imagens foi

tomado com altura de voo de 200 m e ambos os recobrimentos com 60% de sobreposição (longitudinal e lateral). Apesar do emprego de duas alturas de voo distintas, será considerado para fins de análises, um GSD de 4,0 cm. A orientação do bloco foi feita empregando a condição padrão de POI para autocalibração no software Agisoft PhotoScan. A TABELA 69 mostra os POI obtidos e que, segundo o critério da magnitude do desvio padrão " σ ", todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 69- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,628 | 0,0002 |
| x_0 | -0,0218 | 0,0000 |
| y_0 | 0,0082 | 0,0001 |
| K1 | 1,18E-03 | 2,28E-06 |
| K2 | -1,30E-04 | 3,74E-07 |
| K3 | 1,86E-06 | 1,78E-08 |
| P1 | -7,9E-05 | 3,57E-07 |
| P2 | 7,73E-05 | 3,88E-07 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.12.1 Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%).

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 21 pontos de controle e 18 pontos de verificação. Na TABELA 70 são apresentados os resultados obtidos da análise dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z nos 21 pontos de controle empregados no referenciamento cartográfico. Verifica-se que tanto o valor do EQM da resultante planimétrica (10,5 cm) quanto o EQM altimétrico (13,2 cm), ultrapassam as respectivas tolerâncias (2 GSD = 8 cm e 2,5 GSD = 10 cm). Uma provável causa desta imprecisão pode estar relacionada à presença de erros ou falhas do PhotoScan em trabalhar com imagens com uma grande variação em escala. Considerando que os dois recobrimentos a 200 m, previamente discutidos, apresentaram valores de EQM inferiores a 8 cm, pode-se descartar como fonte de erro no presente experimento, o processo de medida manual dos pontos de controle.

TABELA 70- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 6,9 | 8,0 | 13,2 | 10,5 |
| Máximo | 14,4 | 11,8 | 23,6 | 16,9 |
| Mínimo | -11,4 | -12,7 | -28,6 | 0,9 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos foram analisadas as discrepâncias tridimensionais em 18 pontos de verificação. Na TABELA 71, as exatidões planimétrica (RP) e altimétrica, obtidas com valores de EQM das discrepâncias tridimensionais, indicam magnitudes similares aos EQM determinados a partir dos resíduos tridimensionais nos pontos de apoio (precisões). O valor da média das discrepâncias das componentes “ ΔX ” e “ ΔY ”, diferentes de zero, sugerem possível não normalidade e tendência nas amostras. Porém, os p-valores dos testes estatísticos de normalidade Shapiro-Wilk (SW) e tendência (t), com um nível de confiança de 95%, comprovam estatisticamente que ambas as componentes apresentam distribuição normal e são isentas de tendência (p-valor > 0,05).

TABELA 71- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

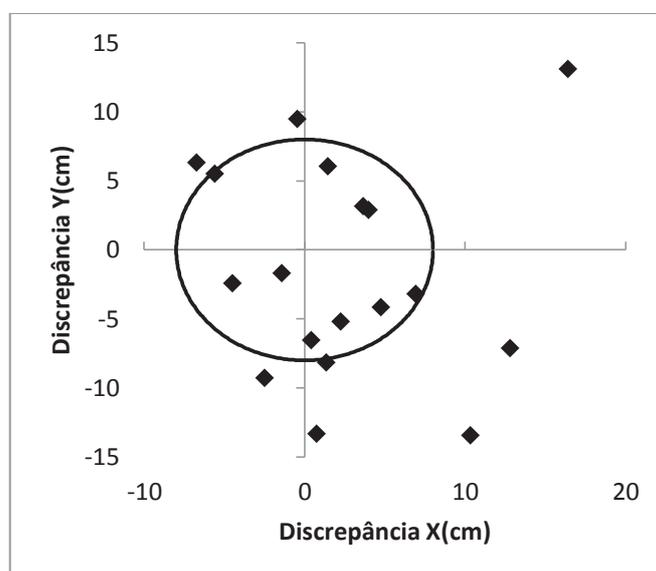
| Métricas | ΔX (cm) | ΔY (cm) | ΔZ (cm) | RP (cm) |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| EQM | 6,5 | 7,7 | 10,5 | 10,0 |
| Máximo | 16,4 | 13,1 | 16,3 | 21,0 |
| Média | 2,4 | -1,6 | -0,2 | 8,9 |
| Mínimo | -6,7 | -13,5 | -18,9 | 2,2 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,468 | 0,693 | 0,163 | |
| Tendência t | 0,113 | 0,396 | 0,938 | |

FONTE: O autor (2019).

O mesmo se aplica para a componente “ ΔZ ”. Porém, no caso altimétrico o valor do EQM extrapola a tolerância estabelecida (10,5 cm > 10 cm). Aplicando o Teste t para o módulo das discrepâncias altimétricas, tem-se com 95% de confiança que o EQM altimétrico encontra-se dentro do intervalo e confiança da média da

amostra ($4,3 \text{ cm} \leq \text{EQM}_{\Delta z} \leq 11,4 \text{ cm}$). O EQM das resultantes planimétricas (RP) também extrapola o limiar estabelecido ($10 \text{ cm} > 8 \text{ cm}$). Aplicando o teste de Wilcoxon, com 95% de confiança, aceita-se estatisticamente o EQM planimétrico obtido como dentro do intervalo de confiança da média da amostra ($7,9 \text{ cm} \leq \text{EQM}_{\text{RP}} \leq 11,3 \text{ cm}$). Uma análise visual da distribuição das discrepâncias planimétricas pode ser feita no GRÁFICO 66. A circunferência representa a tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Apesar o EQM planimétrico calculado (10 cm) ser aceito dentro da tolerância admissível, verifica-se que 44% das discrepâncias, extrapolaram o limite planimétrico admissível. Notoriamente obteve-se um índice de reprovação significativo. Como apontado anteriormente, prováveis falhas no algoritmo de medida automática de pontos homólogos, diante de imagens com variação significativa de escalas, pode ser a causa principal dessa imprecisão observada.

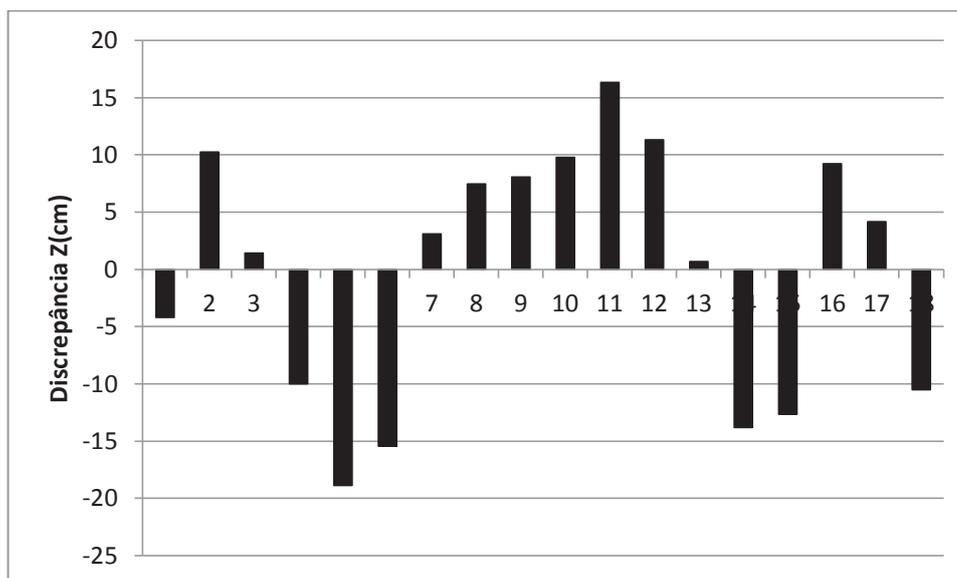
GRÁFICO 66- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 67 visualiza-se a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Verifica-se que apesar do valor do EQM altimétrico ser admitido estatisticamente como próximo à tolerância altimétrica estabelecida ($10,5 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}$), 44 % das discrepâncias extrapolaram este limiar.

GRÁFICO 67- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 27 pode-se visualizar a sub-região da nuvem de pontos, selecionada para verificar visualmente a qualidade da reconstrução dos objetos na cena. Nota-se que não houve falhas na reconstrução na classe árvore. Contudo, conforme assinalado na FIGURA 27, foi identificado que aproximadamente 21% das edificações apresentaram falhas de reconstrução. Provavelmente o material que compõe estes telhados favorece a ocorrência de reflexão especular. Conforme mencionado em discussões anteriores, esta característica dos telhados dificulta o algoritmo na detecção automática de pontos e posteriormente, no correto adensamento.

FIGURA 27 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m e 200 m, fotos verticais, (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.12.2 Análise do Ortomosaico - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%).

Para análise da exatidão planimétrica deste produto foram empregados 28 pontos de verificação. Nestes pontos, foram calculadas as discrepâncias ΔX , ΔY e posteriormente as métricas e estatísticas para cada componente. A TABELA 72-Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%. mostra um resumo dos resultados obtidos e as estatísticas realizadas. De acordo com os valores obtidos e ao nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras ($p\text{-valor} > 0,05$). Adotando o valor de 2 GSD para a exatidão planimétrica admissível (8 cm) o EQM das resultantes planimétricas (9,7 cm) extrapola este valor. Porém, o EQM planimétrico pode ser aceito já que se

encontra estatisticamente dentro do intervalo de confiança para a média, mediante teste t, com um nível de confiança de 95% ($0,948 > 0,05$).

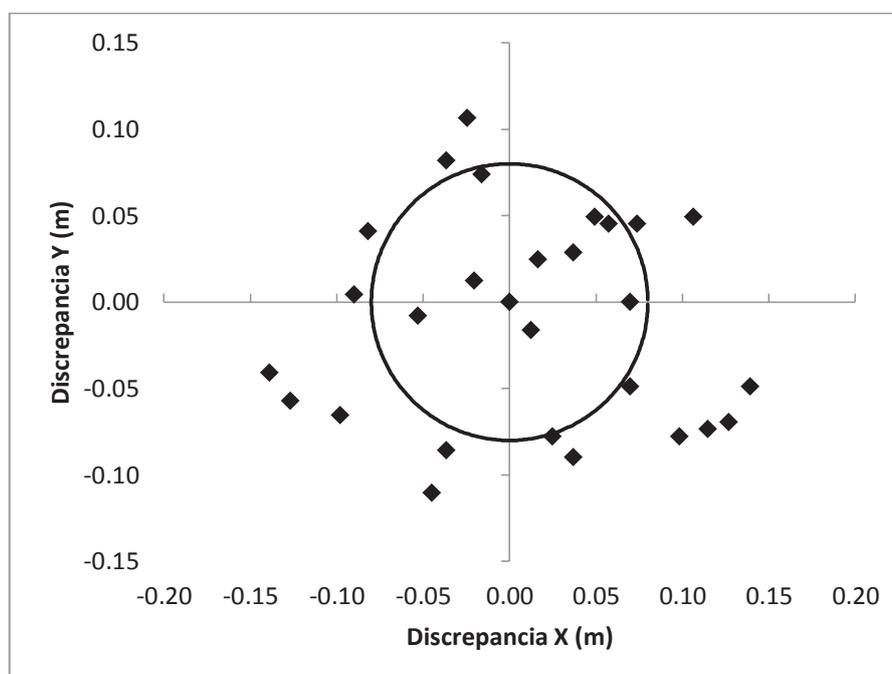
TABELA 72- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| EQM | 7,6 | 6,0 | 9,7 |
| Máximo | 13,9 | 10,6 | 14,8 |
| Média | 0,9 | -1,1 | 8,9 |
| Mínimo | -13,9 | -11,0 | 0,0 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,740 | 0,267 | |
| Tendência t | 0,526 | 0,334 | |

FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 68 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas em relação a uma circunferência de raio igual à tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm).

GRÁFICO 68- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

Apesar da admissão do EQM das resultantes planimétricas dentro do limiar estabelecido, verifica-se que uma expressiva percentagem das discrepâncias extrapola este limiar (64%). Esta percentagem é ainda maior que a obtida na avaliação da nuvem de pontos (44%). Isso ressalta que, apesar do emprego de um maior número de pontos de verificação e da semelhança entre os EQM planimétricos obtidos na TABELA 71 e TABELA 72, a incerteza associada à exatidão do Ortomosaico é maior.

4.3.12.3 Análise do MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%).

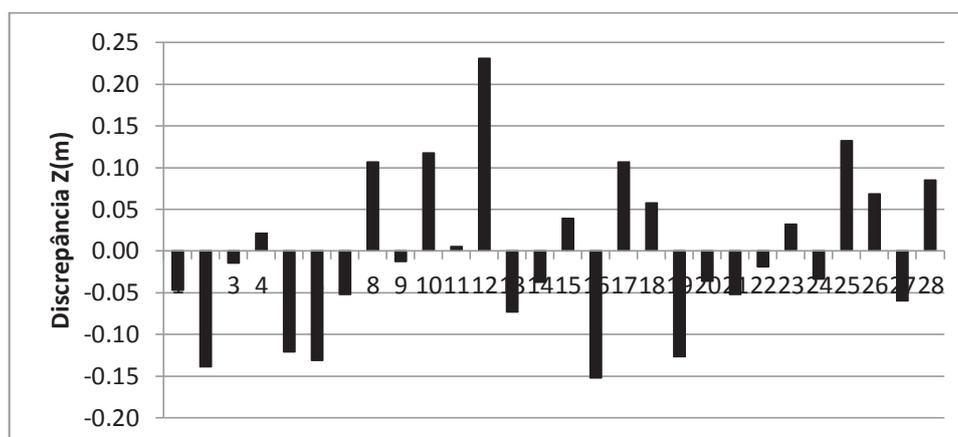
A verificação da exatidão altimétrica do MDT resultante da filtragem da nuvem de pontos, obtida pelo processo fotogramétrico SFM, foi realizada com base nas posições planimétricas dos 28 pontos de verificação, medidas no Ortomosaico. A TABELA 73 mostra as métricas e estatísticas obtidas a partir dos cálculos e análises das discrepâncias altimétricas. Tanto a hipótese de normalidade quanto de inexistência de tendência nos dados, são comprovadas pelos p-valores obtidos ao nível de confiança de 95% (p-valor > 0,05). Considerando a tolerância de 2,5 GSD (10 cm) verifica-se que o valor do EQM das discrepâncias altimétricas encontra-se abaixo do limite máximo tolerável. No GRÁFICO 69 é apresentado a distribuição das discrepâncias altimétricas, podendo ser constatado a inexistência de tendência na amostra. Apesar do valor do EQM das discrepâncias (exatidão altimétrica) ser aceito dentro da tolerância altimétrica admissível (10 cm), 35% das discrepâncias extrapolaram o limiar estabelecido.

TABELA 73- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | ΔZ(cm) |
|---------------------|----------------------------------|
| EQM | 9,2 |
| Máximo | 23,1 |
| Média | -0,4 |
| Mínimo | -15,2 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,504 |
| Tendência t | 0,840 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 69- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

Comparando com os resultados previamente obtidos, pode-se considerar que o presente recobrimento, ofereceu resultados semelhantes aos obtidos com os recobrimentos a 200 m. Considerando que o recobrimento do presente experimento utiliza praticamente seis vezes mais imagens que o recobrimento com faixas de voo simples (item 4.3.10), pode-se afirmar que para fins de extração de geoinformação, não houve vantagens em empregar dados coletados com alturas de voos distintas.

4.3.12.4 Comparativo MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%) com MDT (LIDAR).

Os resultados da segunda verificação do MDT, com o MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado, são apresentados na TABELA 74. O valor do EQM das discrepâncias altimétricas (15,0 cm) pode ser admitido como aceitável se considerado as precisões de cada MDT. Analisando a média das discrepâncias altimétricas, verifica-se um valor negativo diferente de zero, indicando uma provável distribuição anormal da amostra. O p-valor do teste SW, com o nível de confiança de 95%, muito embora no limite, permite aceitar que o conjunto de discrepâncias possui uma distribuição normal. Porém, de acordo com o mesmo critério, comprova-se estatisticamente a existência de tendência na amostra, conforme indicava a média negativa diferente de zero. Uma visualização da distribuição das discrepâncias altimétricas bem como a tendência negativa, pode ser feita no GRÁFICO 70.

O GRÁFICO 71 mostra a comparação das discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Assim como os resultados obtidos no item 4.3.9.4, verifica-se

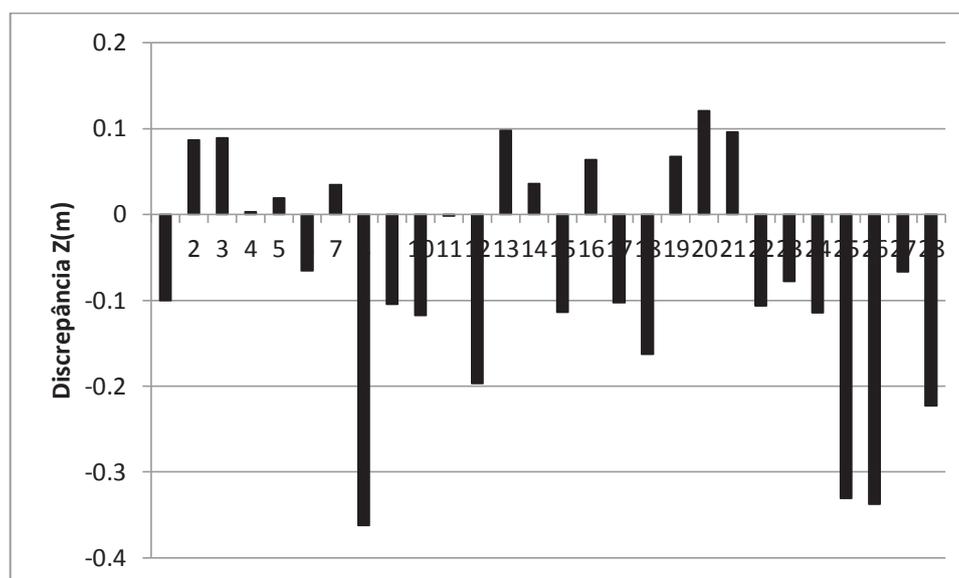
que as discrepâncias resultantes da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS (a esquerda) apresentam forte grau de similaridade com as discrepâncias entre MDT SFM e LIDAR (a direita). Nota-se também a recorrente tendência nas discrepâncias da comparação entre MDT SFM e LIDAR. Provavelmente existe uma variável sistemática presente no MDT lidar. Desta forma, considerando as imprecisões dos MDTs, aceita-se que ambos os MDTs possuem exatidões similares.

TABELA 74- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|--------------------|-----------------------|
| EQM | 15,0 |
| Máximo | 12,0 |
| Média | -6,7 |
| Mínimo | -36,2 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,050 |
| Teste de tendência | 0,015 |

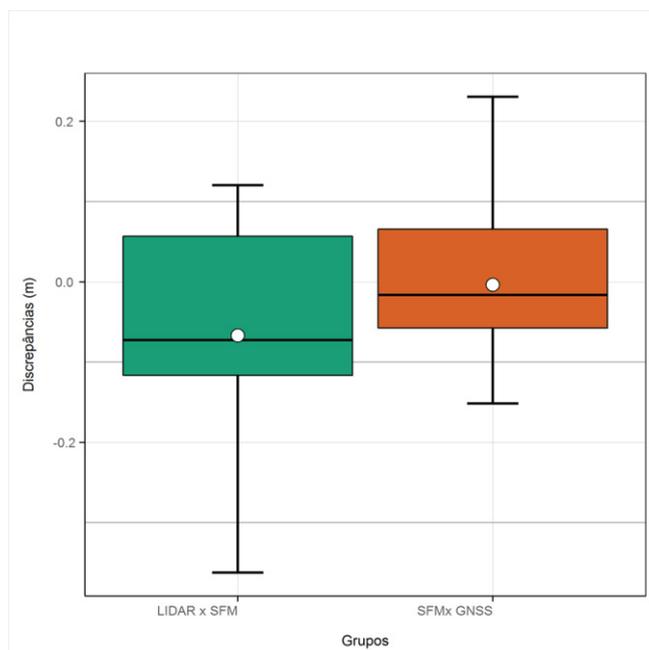
FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 70- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 71- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos verticais a 100 m, RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.13 Aerolevantamento composto: bloco a 100 m com fotos inclinadas (RLO 60% e 75% RLA) + bloco a 200 m com fotos verticais (RLO 60% e 60% RLA).

No experimento anterior foi investigada a utilização de um recobrimento com duas alturas de voo que considerou apenas fotos tomadas na vertical. No presente experimento também se considera faixas de voo cruzadas e altitudes distintas, porém, diferentemente do recobrimento anterior, combina-se o uso de imagens inclinadas e verticais. Um primeiro conjunto de imagens foi tomado com altura de voo de aproximadamente 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 60% e recobrimento lateral de 75%. Já o segundo conjunto, se mantém tal qual no experimento anterior (com altura de voo de aproximadamente 200 m, fotos verticais, recobrimento longitudinal de 60% e recobrimento lateral também de 60%). O bloco fotogramétrico composto resultou em 208 imagens que também foram analisadas considerado um GSD de 4,0 cm. A orientação do bloco foi feita empregando a condição padrão de POI para autocalibração no software Agisoft PhotoScan. ATABELA 75 mostra os POI obtidos e que, segundo o critério da magnitude do desvio padrão " σ ", todos os parâmetros foram significativos.

TABELA 75- POI determinado na autocalibração no experimento bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Parâmetro | Valor (mm) | σ (mm) |
|-----------|------------|---------------|
| C | 3,640 | 0,0011 |
| x_0 | -0,0258 | 0,0002 |
| y_0 | 0,0191 | 0,0005 |
| K1 | 1,53E-03 | 1,45E-05 |
| K2 | -1,90E-04 | 2,54E-06 |
| K3 | 4,70E-06 | 1,26E-07 |
| P1 | 6,36E-05 | 2,73E-06 |
| P2 | -1,19E-05 | 1,10E-06 |

FONTE: O autor (2019).

4.3.13.1 Análise da nuvem densa de pontos - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos inclinadas com RLO 80% e RLA 75% + fotos verticais com RLO 60% e RLA 60%.

No processamento da nuvem de pontos com a técnica SFM, foram utilizados 21 pontos de controle e 17 pontos de verificação. Na TABELA 76 são apresentados os resultados obtidos para a análise dos resíduos nas coordenadas X, Y e Z nos 21 pontos de controle empregados.

TABELA 76- Resumo dos resíduos. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | X(cm) | Y(cm) | Z(cm) | RP (cm) |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| EQM | 3,3 | 3,1 | 7,9 | 4,6 |
| Máximo | 8,3 | 10,8 | 18,5 | 10,8 |
| Mínimo | -5,1 | -5,2 | -14,1 | 0,4 |

RP= Resultante Planimétrica

FONTE: O autor (2019).

É possível verificar que tanto o valor do EQM da resultante planimétrica (4,6 cm) quanto o EQM altimétrico (7,9 cm) encontram-se abaixo dos respectivos limiares (8 cm e 10 cm). Tendo em vista as precisões obtidas no experimento anterior (10,5 cm em planimetria e 13,2 cm em altimetria) constata-se uma redução significativa. Uma provável causa para justificar esta redução é justamente o emprego de imagens inclinadas que, muito provavelmente, contribuíram significativamente para o aumento das precisões obtidas. Neste caso em princípio, verifica-se que a utilização de fotos inclinadas minimizou os erros inerentes a falhas do algoritmo de medição

automática de pontos homólogos quando na presença uma significativa variação na escala das imagens.

Para a verificação da exatidão da nuvem de pontos são analisadas as discrepâncias tridimensionais em 17 pontos de verificação. Na TABELA 77, as exatidões planimétrica (RP) e altimétrica, obtidas com valores de EQM das discrepâncias tridimensionais nos pontos de verificação, foram similares aos valores de EQM determinados a partir dos resíduos nos pontos de controle (precisões). Além disso, tanto o EQM planimétrico quanto o altimétrico encontram-se abaixo da tolerância estabelecida. Os p-valores dos testes estatísticos de normalidade (SW) e tendência (t), com um nível de confiança de 95%, comprovam estatisticamente que apenas as discrepâncias das componentes “ ΔY ” e “ ΔZ ” apresentam distribuição normal e são isentas de tendência (p-valor > 0,05). Entretanto o conjunto de discrepâncias da componente “ ΔX ”, apesar de atender estatisticamente à condição de normalidade, ao nível de confiança de 95% (p-valor > 0,05), possui tendência (p-valor < 0,05).

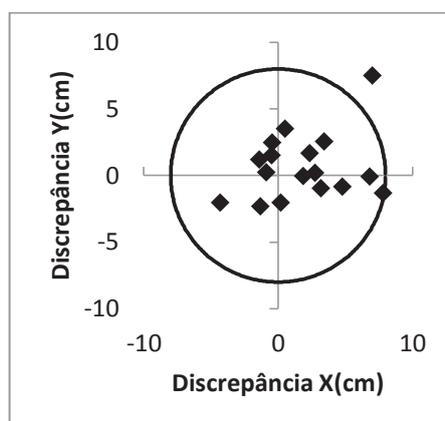
TABELA 77- Resumo das discrepâncias. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | $\Delta Z(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|---|----------------|
| EQM | 3,8 | 2,5 | 8,2 | 4,5 |
| Máximo | 7,8 | 7,5 | 16,4 | 10,3 |
| Média | 1,9 | 0,6 | 0,8 | 3,8 |
| Mínimo | -4,3 | -2,3 | -10,8 | 0,9 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | (p-valor) Z | |
| Normalidade SW | 0,618 | 0,072 | 0,257 | |
| Tendência t | 0,036 | 0,306 | 0,693 | |

FONTE: O autor (2019).

Uma análise visual da distribuição das discrepâncias planimétricas, considerando a tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm), pode ser feita no GRÁFICO 72. Verifica-se que somente uma discrepância planimétrica extrapola o limiar estabelecido, correspondendo a um índice de reprovação de aproximadamente 6%. Se considerado o índice do experimento anterior (44%), constata-se uma significativa melhora com o uso de imagens inclinadas.

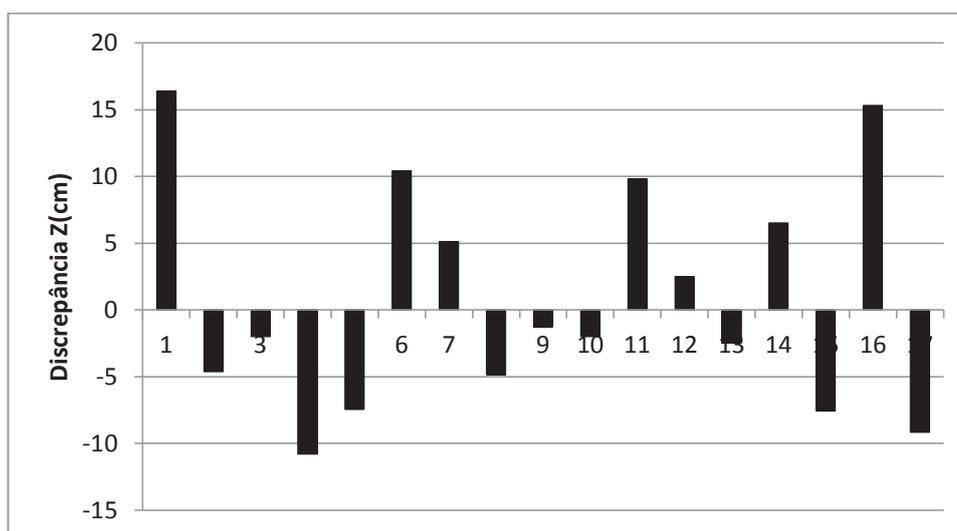
GRÁFICO 72- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 73 visualiza-se a distribuição das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação. Constata-se que apesar do valor do EQM encontrar-se abaixo da tolerância altimétrica estabelecida ($8,2 \text{ cm} < 10 \text{ cm}$), 23,5% das discrepâncias extrapolaram este limiar.

GRÁFICO 73- Discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 28 pode-se visualizar a sub-região da nuvem de pontos, selecionada para verificar visualmente a qualidade da reconstrução dos objetos na cena. Conforme assinalado na figura, foi identificado que tanto a classe edificação

quanto a classe árvore apresentaram aproximadamente 5% falhas de reconstrução. Nota-se também na área assinalada com vegetação, a presença de vazios (ausência de pontos). Como já apontado anteriormente, trata-se de região sombreada, que muito provavelmente, pelas razões já apontadas, interferiu na reconstrução da superfície no nível do solo. Verifica-se também a presença de ruídos, já detectados anteriormente nos recobrimentos que empregavam imagens inclinadas. Pode-se concluir com os experimentos realizados, que o emprego de imagens inclinadas traz o benefício aumentar as precisões e exatidões nos processos analisados, porém tende a agregar maior índice de ruídos na nuvem densa.

FIGURA 28 – Amostra de cenário para inferência de qualidade visual da nuvem densa de pontos no recobrimento composto a 100 m e 200 m, fotos verticais e inclinadas, (RLO 80% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%).



FONTE: O autor (2019).

4.3.13.2 Análise do Ortomosaico - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos inclinadas com RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais com RLO 60% e RLA 60%.

Para análise da exatidão planimétrica do Ortomosaico foram empregados 36 pontos de verificação. Na TABELA 78 são apresentadas as métricas e estatísticas

para as componentes ΔX e ΔY . De acordo com os valores obtidos, ao nível de significância estabelecido ($\alpha=0,05$), não se rejeita a hipótese de normalidade ou de existência de tendência em nenhuma das amostras ($p\text{-valor} > 0,05$). Adotando o valor de 2 GSD para a exatidão planimétrica admissível (8 cm), o EQM das resultantes planimétricas (9,0 cm) extrapola o limite tolerável. Determinando o intervalo de confiança da média das resultantes planimétricas por meio do teste de Wilcoxon, com um nível de confiança de 95%, tem-se $6,4 \text{ cm} \leq 7,4 \leq 8,6 \text{ cm}$. Considerando o EQM das resultantes planimétricas igual a 9,0 cm, verifica-se que o valor obtido extrapola este intervalo ($9,0 \text{ cm} > 8,6 \text{ cm}$).

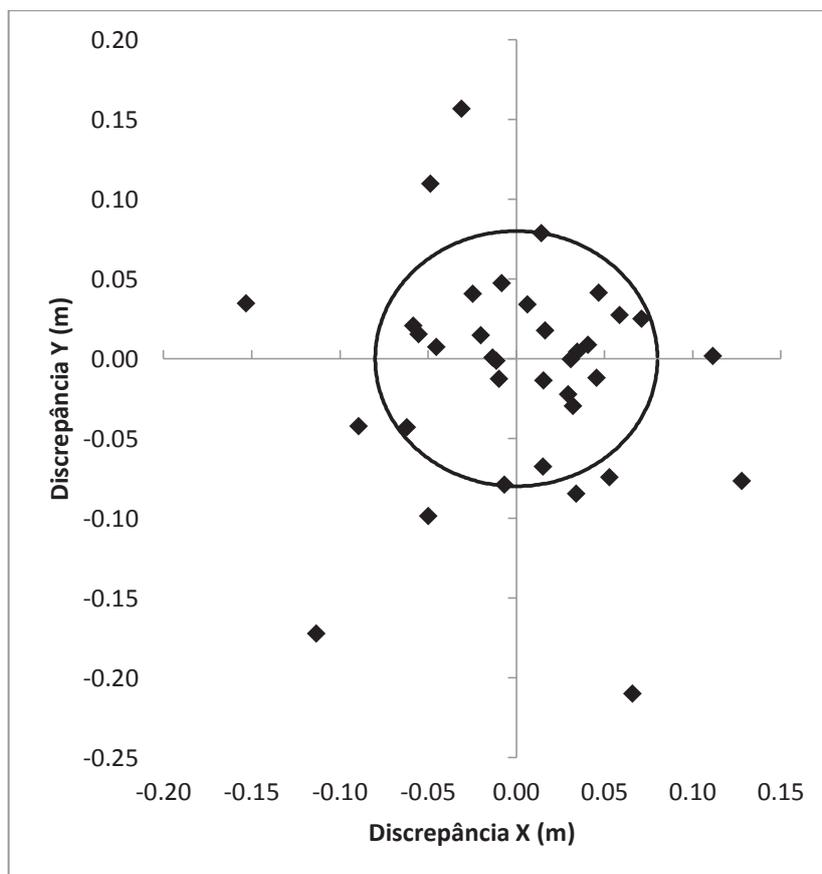
TABELA 78- Resumo das discrepâncias nos pontos de verificação medidos no ortomosaico. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta X(\text{cm})$ | $\Delta Y(\text{cm})$ | RP (cm) |
|---------------------|---|---|----------------|
| EQM | 5,8 | 6,9 | 9,0 |
| Máximo | 12,8 | 15,7 | 22,0 |
| Média | 0,1 | -1,0 | 7,4 |
| Mínimo | -15,3 | -21,0 | 1,1 |
| Estatísticas | (p-valor) X | (p-valor) Y | |
| Normalidade SW | 0,827 | 0,055 | |
| Tendência t | 0,881 | 0,400 | |

FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 74 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas considerando um círculo de raio igual à tolerância planimétrica de 2 GSD (8,0 cm). Observa-se que o índice de reprovação junto ao limiar estabelecido é de aproximadamente 30%. Considerando o experimento anterior que empregou recobrimento contendo exclusivamente imagens verticais, nota-se que não houve alteração significativa para a exatidão planimétrica do Ortomosaico com o uso de imagens inclinadas ($9,7 \text{ cm} \approx 9,0 \text{ cm}$).

GRÁFICO 74- Discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação do Ortomosaico. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.13.3 Análise do MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos inclinadas com RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais com RLO 60% e RLA 60%.

Na TABELA 79 são apresentadas as métricas e estatísticas obtidas a partir das discrepâncias altimétricas nos 28 pontos de verificação. É possível observar pelos p-valores dos testes estatísticos, ao nível de confiança de 95%, que as hipóteses de normalidade e de inexistência de tendência nos dados são aceitas (p -valor $> 0,05$). Admitindo a tolerância altimétrica de 2,5 GSD (10 cm) constata-se que o valor do EQM das discrepâncias altimétricas (exatidão altimétrica) é maior que o limiar estabelecido. Aplicando o teste de Wilcoxon, com 95% de confiança, para as discrepâncias altimétricas tomadas em módulo e admitindo uma média igual à tolerância altimétrica (10 cm), é verificado que o EQM altimétrico é aceito dentro do intervalo de confiança da média da amostra ($6,9 \text{ cm} \leq 10 \text{ cm} \leq 12,7 \text{ cm}$). Neste caso, observa-se que o valor do EQM altimétrico coincide com o limete superior do

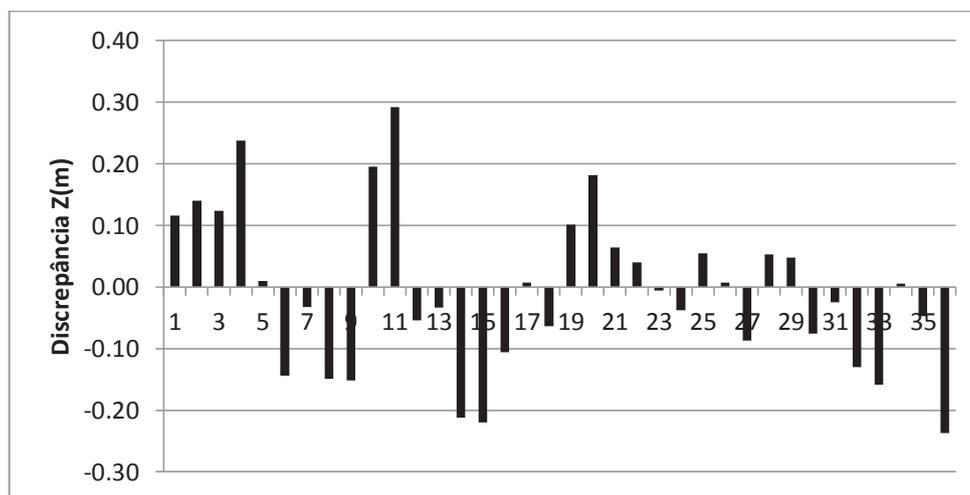
intervalo de confiança da média. No GRÁFICO 75 apresenta-se a distribuição das discrepâncias altimétricas, podendo ser visualizado a inexistência de tendência na amostra. Apesar do EQM das discrepâncias ter sido aceito dentro do intervalo de confiança da média das discrepâncias, tomadas em modulo, 47% das discrepâncias extrapolaram o limiar estabelecido.

TABELA 79- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|----------------|-----------------------|
| EQM | 12,7 |
| Máximo | 29,2 |
| Média | -0,8 |
| Mínimo | -23,7 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,830 |
| Tendência t | 0,703 |

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 75- Discrepâncias altimétricas MDT. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

Comparando com os resultados previamente obtidos, pode-se considerar que o presente recobrimento, ofereceu resultados semelhantes ao recobrimento anteriormente discutido,

4.3.13.4 Comparativo MDT - Bloco composto - 100 m + 200 m - fotos verticais + inclinadas - (RLO 60% e RLA 75% + RLO 60% e RLA 60%) com MDT (LIDAR).

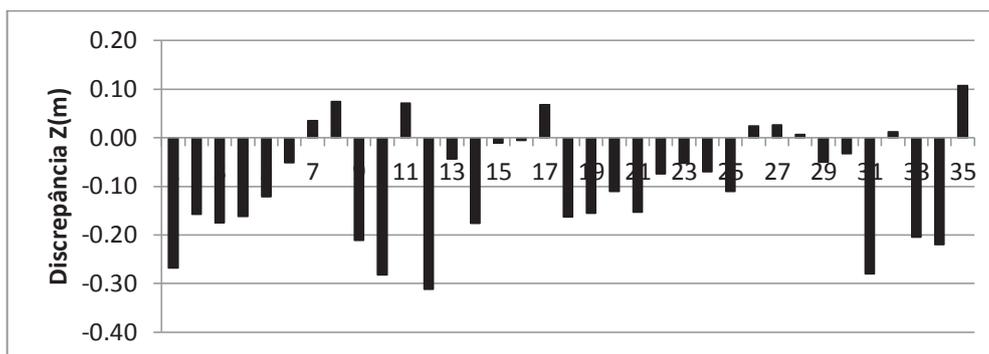
Os resultados da segunda verificação do MDT, com o MDT proveniente de levantamento LIDAR aerotransportado, são apresentados na TABELA 80. O EQM das discrepâncias (14,5 cm) pode ser aceito se considerado as imprecisões dos MDTs. Analisando a média das discrepâncias, verifica-se um valor negativo diferente de zero, indicando uma provável anormalidade e tendência na distribuição da amostra. O p-valor do teste SW, com o nível de confiança de 95%, permite aceitar estatisticamente que o conjunto de discrepâncias altimétricas entre o MDT obtido por técnica fotogrametria e o MDT LIDAR, possui uma distribuição normal. De acordo com o mesmo critério, é comprovado estatisticamente a existência de tendência na amostra, conforme indica o p-valor do testes ($p\text{-valor} < 0,05$). No GRÁFICO 76 pode ser feita a visualização da distribuição das discrepâncias e a tendência negativa, como já indicava a média negativa diferente de zero (-9,2 cm). O valor do EQM das discrepâncias altimétricas, obtida da comparação dos MDTs, apresentou valor de 14,5 cm. Valor este que pode ser admitido como dentro da exatidão esperada, pois ambos os MDTs (SFM e LIDAR) possuem imprecisões de ± 10 cm.

TABELA 80- Resumo das discrepâncias altimétricas do MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.

| Métricas | $\Delta Z(\text{cm})$ |
|---------------------|---|
| EQM | 14,5 |
| Máximo | 10,7 |
| Média | -9,2 |
| Mínimo | -31,1 |
| Estatísticas | (p-valor) |
| Normalidade SW | 0,404 |
| Teste de tendência | 0,000 |

FONTE: O autor (2019).

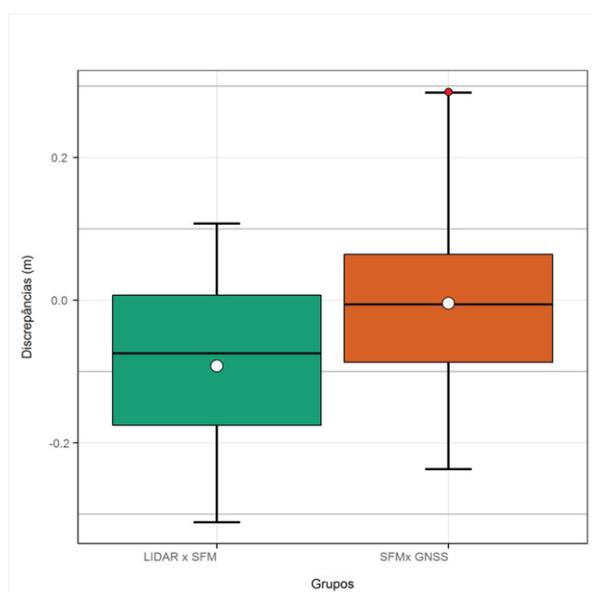
GRÁFICO 76- Discrepâncias altimétricas MDT SFM x MDT LIDAR. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

O GRÁFICO 77 permite a visualização de um comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Assim como em alguns dos experimentos realizados, verifica-se que as discrepâncias resultante da análise do MDT SFM com pontos de verificação GNSS (a esquerda) apresentam forte grau de similaridade com as discrepâncias entre o MDT SFM e LIDAR (a direita). Dada a tendência nas discrepâncias da comparação entre MDT SFM e LIDAR, em todos os experimentos discutidos e considerando as imprecisões dos MDTs, aceita-se que ambos os MDTs possuem exatidões similares.

GRÁFICO 77- Comparativo de discrepâncias altimétricas resultantes dos MDTs. Bloco composto: fotos inclinadas a 100 m, RLO 60% e RLA 75% + fotos verticais a 200 m, RLO 60% e RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

4.3.14 Considerações gerais sobre os experimentos

Análise da nuvem de pontos:

- Nos recobrimentos com fotos verticais a 100 m, a utilização de faixas de voo cruzadas promoveu melhora de 45% as exatidões planimétricas e 54% nas exatidões altimétricas;
- Nos recobrimentos com fotos verticais a 200 m, a utilização de faixas de voo cruzadas promoveu melhora de 3% as exatidões planimétricas e 22% nas exatidões altimétricas;
- Nos recobrimentos com fotos verticais a 100 m, o aumento de sobreposição longitudinal de 60% para 80% promoveu uma melhora de exatidão planimétrica de 4% enquanto que a altimétrica foi de 10%;
- Nos recobrimentos com fotos inclinadas a 100 m, o aumento de sobreposição longitudinal de 60% para 80% promoveu uma piora na exatidão planimétrica e altimétrica de 27% e 3% respectivamente;
- Com base nos recobrimentos avaliados, maiores porcentagens de sobreposição entre fotos e faixas, em recobrimentos com faixas de voo simples e fotos verticais não melhoraram necessariamente as exatidões planialtimétricas;
- Os recobrimentos que empregaram imagens inclinadas (10°), ofereceram um desempenho planimétrico e altimétrico médio superior em relação aos recobrimentos com imagens verticais (4°), sendo 33% para planimetria e 17% para altimetria;
- A execução de recobrimentos com alturas de voo distintas não trouxe contribuições significativas em relação aos recobrimentos convencionais;
- A característica dos materiais que compõem as superfícies, em conjunto com a incidência de luz solar, produz efeitos que prejudicam na detecção de pontos homólogos (áreas homogêneas e sem contraste);
- Os blocos que continham exclusivamente imagens inclinadas apresentaram maior incidência de ruídos na nuvem densa (efeito “salt and pepper”);

Análise do Ortomosaico:

- Considerando os experimentos realizados a 100 m, o uso de faixas de voo cruzadas foi capaz de melhorar o desempenho somente dos recobrimentos com sobreposição longitudinal de 60%, sendo 42% quando usando imagens verticais e 14% quando usando imagens inclinadas;
- Considerando os recobrimentos realizados a 200 m com fotos verticais, o uso de faixas de voo cruzadas promoveu uma piora de 4% na exatidão planimétrica;
- O ortomosaico obtido do recobrimento com sobreposição de 80% e câmera inclinada apresenta aproximadamente 20% de piora na exatidão planimétrica;
- considerando os experimentos a 100 m, empregando fotos verticais e inclinadas, a sobreposição longitudinal de 80% não contribuiu para melhora de exatidão planimétrica.
- nos experimentos realizados, o uso de imagens inclinadas ($\pm 10^\circ$) contribuiu para a obtenção de melhores exatidões planimétricas;
- nos experimentos realizados exclusivamente com faixas de voo simples, não houve diferenças significativas nas exatidões planimétricas obtidos a partir de distintas sobreposições;
- Blocos com alturas de voo distintas (100 m e 200 m) não trouxeram contribuições significativas em relação aos recobrimentos convencionais;

Análise do MDT:

- As melhores exatidões altimétricas estão associadas aos recobrimentos com faixas de voo cruzadas a mesma altura e integrando fotos verticais e inclinadas.
- blocos fotogramétricos contendo imagens inclinadas, independente se faixas de voo simples ou cruzadas e da sobreposição longitudinal (60% ou 80%), tenderam a apresentar melhores exatidões altimétricas em relação aos blocos com imagens exclusivamente verticais;
- considerando blocos fotogramétricos com mesma altura de voo, variando-se apenas a sobreposição longitudinal, maiores sobreposições não garantiram, necessariamente, melhores exatidões altimétricas;

- Blocos fotogramétricos com alturas de voo distintas (100 m e 200 m) não trouxeram contribuições significativas em relação aos recobrimentos com uma única altura de voo;

Comparação MDT SFM com MDT Lidar:

- Os dois modelos de elevação apresentaram exatidões similares de acordo com suas precisões. Entretanto os MDT obtidos por SFM apresentaram menor dispersão das discrepâncias enquanto que o MDT LIDAR revelou um possuir um erro sistemático e uma maior dispersão dos valores das discrepâncias.

4.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISPONIBILIDADE DE PONTOS DE APOIO NA EXATIDÃO DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA POR TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA SFM.

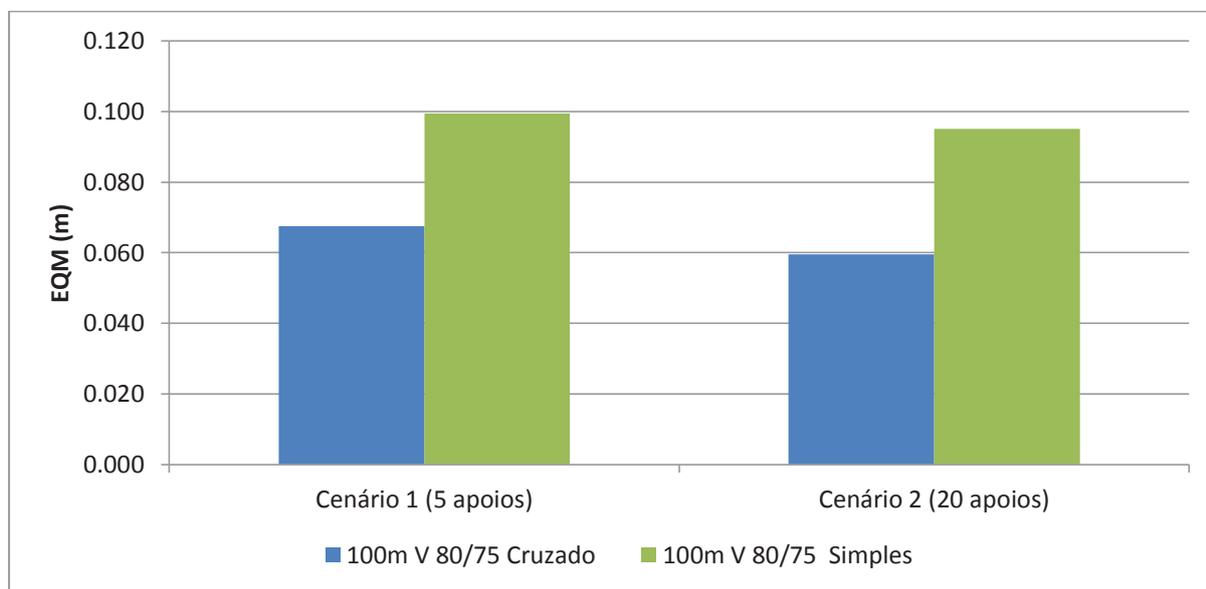
É indiscutível que as plataformas VANT comercialmente disponíveis ao público ainda não atendem plenamente aos requisitos que permitem um georreferenciamento direto (BLÁHA et al., 2011; CARBONNEAU; DIETRICH, 2016). Nestes casos, o uso de pontos de controle como meio de mitigar distorções nos modelos fotogramétricos gerados é de fundamental importância. Considerando os custos operacionais que envolvem a determinação de apoio em campo e que a geometria de voo pode influenciar nas exatidões obtidas, uma discussão sobre o assunto torna-se relevante.

Ao fazer uma análise das discussões sobre distribuição de pontos de apoio, percebe-se que em sua maioria são consideradas apenas geometrias de voo convencionais (TAHAR, 2013; VEGA; RAMÍREZ; CARRICONDO, 2017; JAMES et al., 2017; CARRICONDO et al., 2018; ZANETTI, 2017; SOUZA, 2018). Sendo assim, os experimentos discutidos no presente tópico levam em conta recobrimentos aéreos nas alturas de voo de 100 e 200 metros, com e sem faixas cruzadas, empregando fotos verticais e oblíquas. São utilizados um total de 40 pontos de apoio, sendo que no Cenário 1, cinco são pontos de controle e 35 de verificação. No Cenário 2, 20 são pontos de controle e 20 de verificação. A metodologia de análise de exatidão obtida no experimento fundamenta-se, exclusivamente na avaliação

gráfica dos valores de EQM da resultante planimétrica e EQM altimétrico das discrepâncias dos pontos de verificação.

A seguir são apresentados gráficos que mostram os valores de EQM das resultantes planimétricas e EQM altimétricos, obtidos nos experimentos realizados. No GRÁFICO 78, apresenta-se os valores dos EQM das discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação de quatro experimentos. Foram empregados dados de recobrimentos aéreos com imagens tomadas próximo da vertical, na altura de voo de 100 m, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%, faixas simples (convencionais) e cruzadas, variando os cenários de distribuição de pontos de apoio descrito. Desta forma, analisando-se os valores obtidos nos quatro experimentos, verifica-se que não existem diferenças significativas nos valores de EQM planimétrico nos dois cenários de pontos de apoio propostos. Entretanto, ao considerar o desempenho das distintas geometrias de voo (faixas simples e cruzadas), isoladamente para um único cenário, nota-se que a utilização de faixas cruzadas melhora significativamente as exatidões planimétricas obtidas.

GRÁFICO 78 – Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.

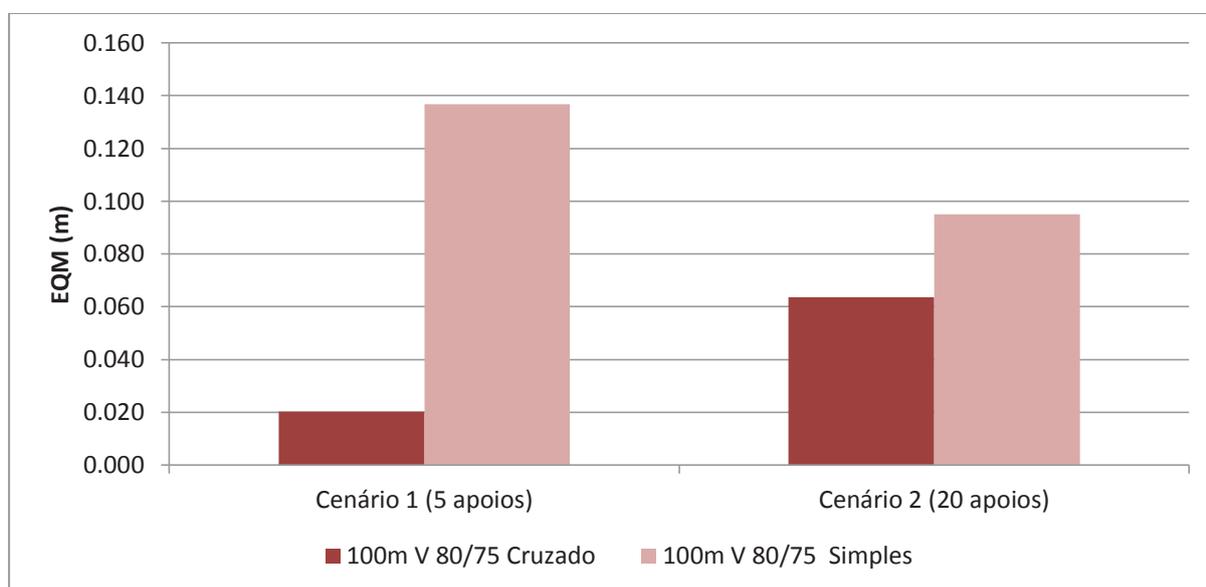


FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 79, são apresentados os valores dos EQM das discrepâncias altimétricas, nos mesmos pontos de verificação, para os mesmos quatro experimentos. Em uma primeira análise, constata-se que cada cenário de

distribuição de pontos de apoio resulta em valores de EQM distintos para as distintas geometrias de voo (simples e cruzada). Para o recobrimento com faixas de voo simples, o Cenário 2, com maior número de pontos de apoio (20 pontos), resultou em um valor de EQM altimétrico em torno de 30% melhor do que o obtido no Cenário 1, com 5 pontos de apoio. Já para o recobrimento com faixas de voo cruzadas, o Cenário 1, com menor número pontos de apoio, de forma inesperada resultou em um menor valor de EQM, aproximadamente 68% melhor em relação ao Cenário 2 (maior número de pontos de apoio). Com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que a geometria de voo cruzada conferiu uma maior rigidez ao bloco fotogramétrico (maior número de medidas por ponto), minimizando a influência da redução no número de pontos de apoio e aumentando as exatidões planimétrica e altimétrica. De maneira geral a utilização de maior número de pontos de apoio resulta em melhores exatidões.

GRÁFICO 79 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.

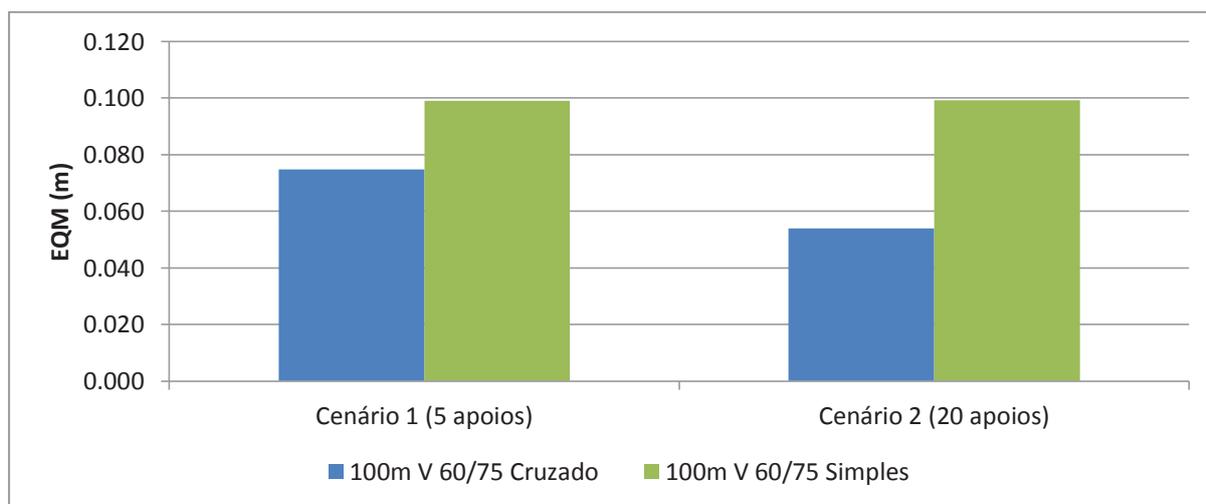


FONTE: O autor (2019).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para outro conjunto de experimentos, semelhante ao conjunto previamente discutido, porém considerando uma sobreposição longitudinal de 60%. No GRÁFICO 80 é possível verificar que o EQM planimétrico do recobrimento com características de faixas de voo simples, é semelhante em ambos os cenários. Não existem alterações significativas nos

valores de EQM quando considerado as condições do cenário com maior número de pontos de apoio (Cenário 2). Já o recobrimento com faixas de voo cruzadas foi beneficiado com a adição de mais pontos de apoio (Cenário 2), havendo uma redução de aproximadamente 28% na magnitude do EQM da resultante planimétrica. Considerando cada cenário de distribuição de pontos de apoio, evidencia-se novamente o melhor desempenho promovido pela geometria de faixas de voo cruzada (maiores exatidões). Apesar da clara melhora dos resultados obtidos nos experimentos com geometria de voo cruzada, considerando os resultados planimétricos obtidos no experimento anterior (GRÁFICO 78), nota-se que houve uma semelhança nas magnitudes dos EQM. Este resultado permite inferir que, para os dados analisados, a alteração na percentagem de sobreposição entre as imagens não promoveu diferenças significativas nos resultados.

GRÁFICO 80 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.

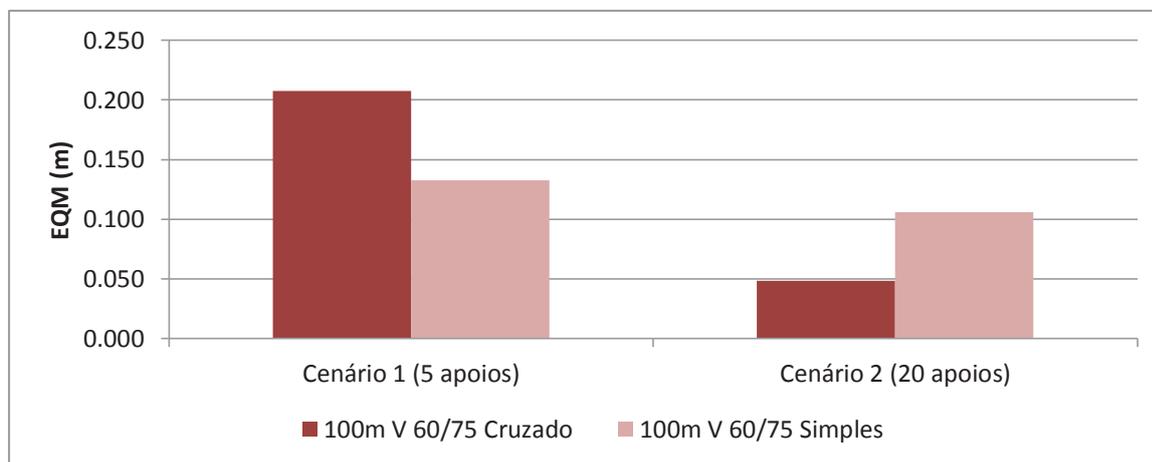


FONTE: O autor (2019).

Considerando os resultados obtidos para as exatidões altimétricas, conforme o GRÁFICO 81, tem-se que para ambas as geometrias de voo (faixas simples e cruzadas), o Cenário 2 resultou nos menores valores de EQM (maiores exatidões altimétricas). Para este mesmo cenário, é possível ainda observar que a geometria de faixas de voo cruzadas apresentou um desempenho aproximadamente 50% melhor em relação à geometria com faixas simples. Diferente dos resultados discutidos anteriormente no GRÁFICO 79, verifica-se no Cenário 1 do GRÁFICO 81,

como esperado, que o valor da exatidão altimétrica obtido a partir da geometria de voo cruzada, encontra-se pior que a obtida no Cenário 2.

GRÁFICO 81 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.

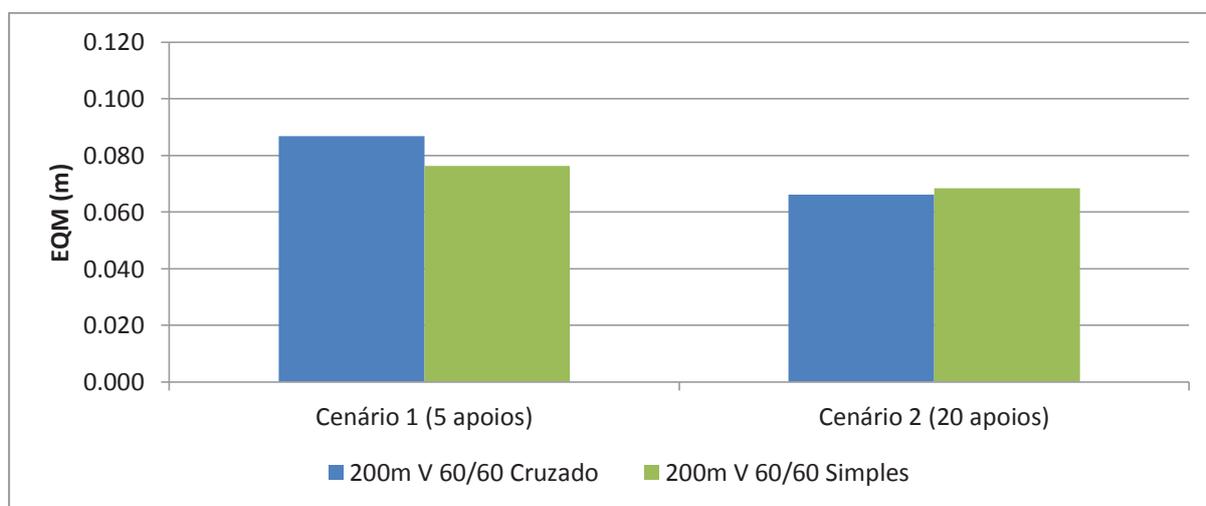


FONTE: O autor (2019).

Além dos recobrimentos discutidos, foi conduzido um conjunto de experimentos para verificar se uma eventual alteração significativa na altura de voo promoveria alguma influência nas conclusões até então realizadas. Para tanto foram empregados dados de recobrimentos com imagens tomadas próximo da vertical, na altura de voo de 200 m e sobreposição longitudinal e lateral de 60%. Também são avaliadas faixas simples e cruzadas sob os mesmos cenários de distribuição de pontos de apoio descritos anteriormente. No GRÁFICO 82 é possível visualizar que para o Cenário 1, a diferença de desempenho entre as duas geometrias de voo (faixas simples e cruzadas) é de aproximadamente 12%, enquanto que no Cenário 2 essa diferença é aproximadamente 3%. Estas diferenças podem ser assumidas como não significativas. Adicionalmente, ao contrário dos voos a 100 m previamente discutidos, no presente experimento a utilização de faixas de voo cruzadas não promoveu melhoras nos valores de EQM, em relação aos voos com faixas simples. Esperava-se que a geometria cruzada pudesse garantir maior rigidez ao bloco, já que, naturalmente, o uso de faixas de voo cruzadas possibilita maior número de raios (observações) por ponto. Consultando com mais contundência as medidas realizadas, não se percebe erros grosseiros nas medidas. Desta forma, uma hipótese que poderia justificar este ocorrido é que ao aumentar a altura de voo,

praticamente dobrando a grandeza, houve uma alteração significativa, para pior, da relação base/altura do bloco. Ao analisar o desempenho do recobrimento com geometria cruzada, obtido em cada cenário de distribuição de pontos de apoio, percebe-se uma diferença entre os valores de EQM aproximadamente 24%. Magnitude esta muito semelhante à obtida no voo a 100 m com recobrimento longitudinal de 60%.

GRÁFICO 82 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 200 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%.

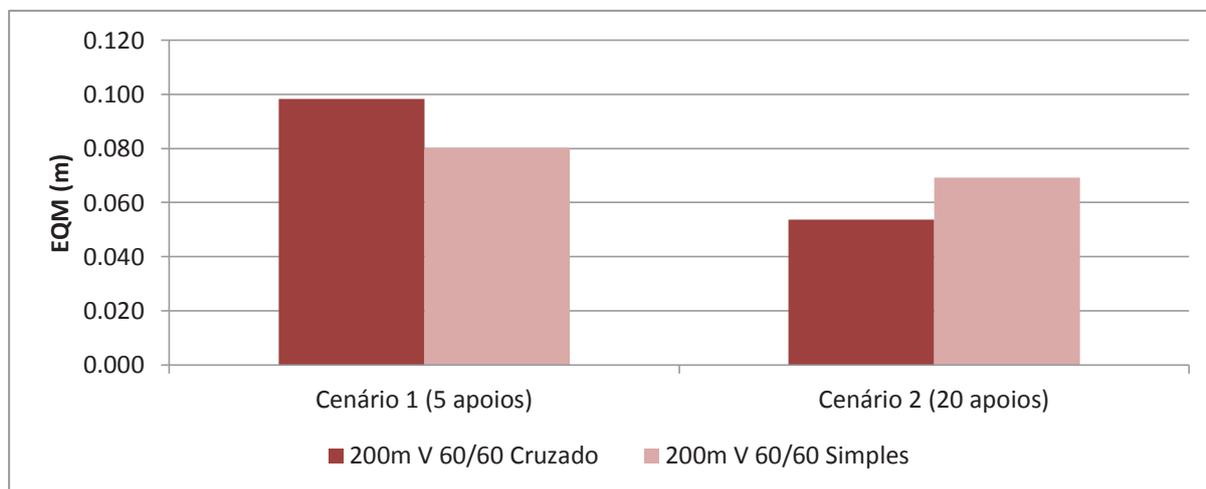


FONTE: O autor (2019).

Analisando as exatidões altimétricas, apresentadas no GRÁFICO 83, verifica-se comportamentos semelhantes aos observados para a planimetria. Entretanto, nota-se um realce das diferenças entre as distintas geometrias de voo (faixas simples e cruzadas), em cada cenário. Para o Cenário 1, a diferença de desempenho entre as duas geometrias de voo é de aproximadamente 18%, enquanto que no Cenário 2 essa diferença é aproximadamente 22%. Estes valores indicam que no Cenário 1, a utilização de faixas cruzadas piora a exatidão altimétrica. Por outro lado, no Cenário 2, houve melhora da exatidão com o uso de faixas de voo cruzadas, assim como visto nos experimentos realizados com recobrimento na altura de voo de 100 metros. Descartada a existência de erros grosseiros nas medidas dos pontos de verificação e considerando que o GSD para o recobrimento a 200 m é 8 cm, é plausível aceitar a magnitude do EQM altimétrico obtido para a condição cruzada. Não é possível afirmar, todavia que a altimetria foi

influenciada exclusivamente pela geometria de voo ou pelo número de pontos de apoio.

GRÁFICO 83 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 200 m, fotos próximas da vertical, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 60%.



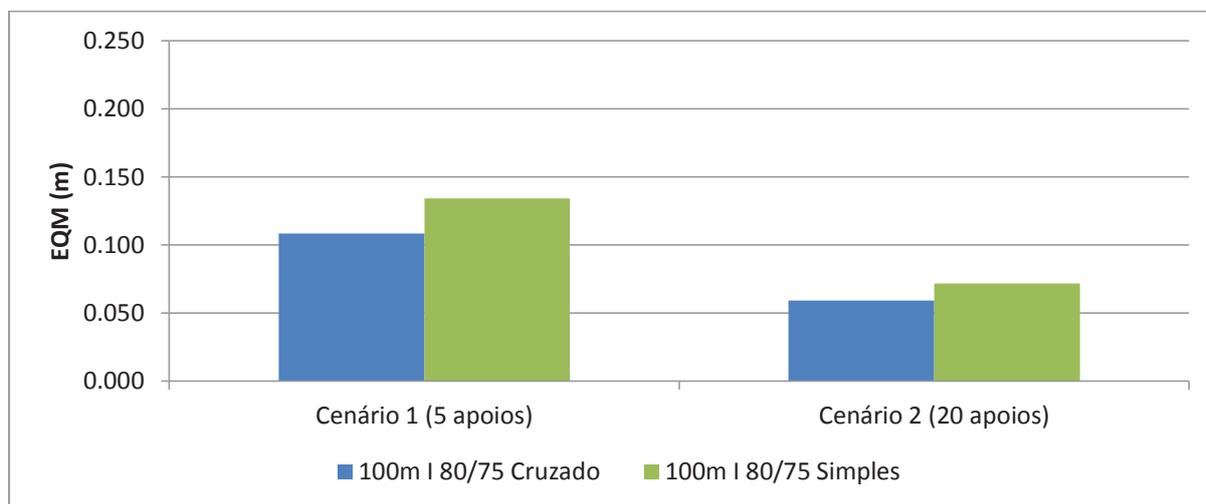
FONTE: O autor (2019).

O uso de plataformas VANT tem permitido a execução de diversas aplicações fotogramétricas, empregando tanto imagens verticais quanto imagens inclinadas. Neste sentido, além dos experimentos com imagens na vertical ($\pm 4^\circ$), também foram conduzidos experimentos empregando imagens obtidas com câmera inclinada ($\pm 10^\circ$). Nesta condição serão discutidos dois conjuntos de dados distintos com altura de voo de aproximadamente 100 m. Em cada conjunto avaliado, consideram-se os recobrimentos com faixas de voo simples (convencional) e cruzada, sob as condições dos cenários de distribuição de pontos de apoio já mencionados. Um primeiro conjunto de imagens foi obtido a partir de voos com sobreposição lateral de 80% e longitudinal 75%. Já o segundo conjunto de imagens considera percentagens de sobreposição longitudinal e lateral de 60% e 75% respectivamente.

No GRÁFICO 84 são apresentadas as exatidões planimétricas obtidas a partir do primeiro conjunto de dados (80% de recobrimento longitudinal e 75% de recobrimento lateral). É possível notar que tanto no Cenário 1 quanto no Cenário 2, não houveram diferenças significativas promovida pelas geometrias de voo (faixas simples ou cruzadas). Entretanto, a utilização de faixas de voo cruzada apresentou melhores resultados. Quanto se compara o desempenho entre cenários, nota-se que

existe diferença de aproximadamente 50% entre eles, sendo o Cenário 2 aquele que apresenta as melhores exatidões.

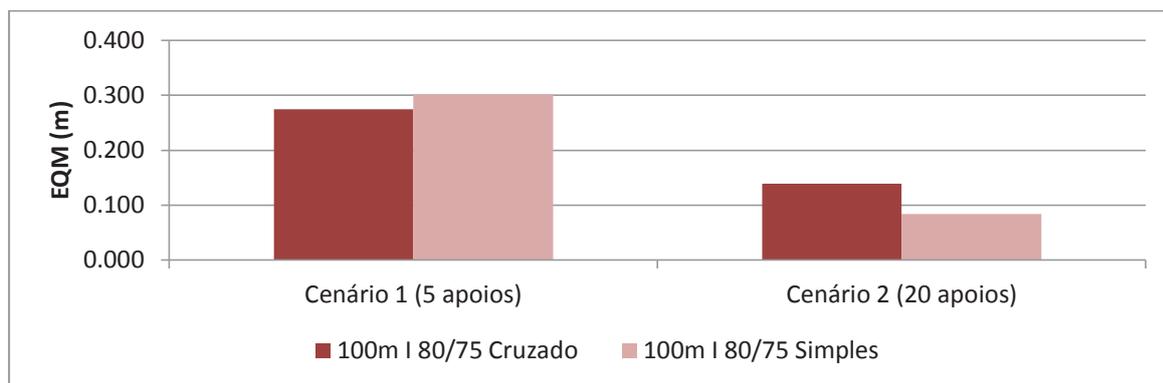
GRÁFICO 84 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.



FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 85, são apresentadas as exatidões altimétricas obtidas para o primeiro conjunto de dados com imagens inclinadas. Verifica-se que as melhores exatidões altimétricas foram obtidas no Cenário 2, tanto com a utilização de faixas simples como com faixas cruzadas. Nota-se que em ambos os cenários não houveram diferenças significativas promovidas pelas geometrias de voo (faixas simples ou cruzada). Contudo, diferentemente da planimetria, no Cenário 2 a geometria cruzada resultou em um valor de EQM pior que a geometria simples (aproximadamente 39%). Comparando-se as exatidões altimétricas obtidas nos dois cenários verifica-se, de forma geral, que as exatidões altimétricas, obtidas no cenário 2 são aproximadamente 50% melhores.

GRÁFICO 85 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 75%.

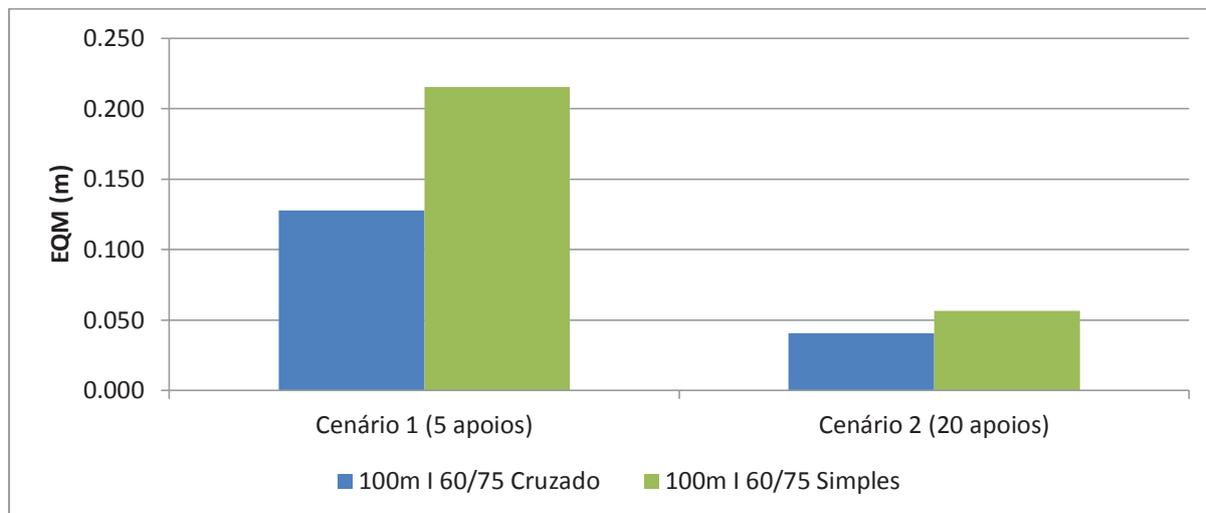


FONTE: O autor (2019).

No GRÁFICO 86 são apresentadas as exatidões planimétricas, do segundo conjunto de dados com câmera inclinada, tomados a 100 m com 60% de recobrimento longitudinal e 75% de recobrimento lateral. Similar aos resultados obtidos no primeiro grupo de experimentos com imagens inclinadas, a utilização de faixas cruzadas melhorou a exatidão planimétrica nos dois cenários de distribuição de pontos de apoio estudados. Ao se comparar o desempenho de cada cenário, verifica-se no Cenário 2 em relação ao Cenário 1, uma melhora de 68% para o recobrimento com faixas cruzadas e 73,5% para o recobrimento com faixas simples. Além disso, o EQM planimétrico obtido a partir de faixas cruzadas no Cenário 2 representa a melhor exatidão planimétrica dentre todos os experimentos discutidos neste tópico. No Cenário 1, apesar da geometria cruzada ter resultado em uma melhor exatidão, há uma diferença de aproximadamente 40% em relação à exatidão obtida com a geometria simples. Isso permite assumir que para um recobrimento com menor percentagem de sobreposição, a geometria cruzada consegue suprir a deficiência de apoio de campo. Contudo, como já identificado nos gráficos anteriores, o cenário melhor apoiado resulta em melhores exatidões.

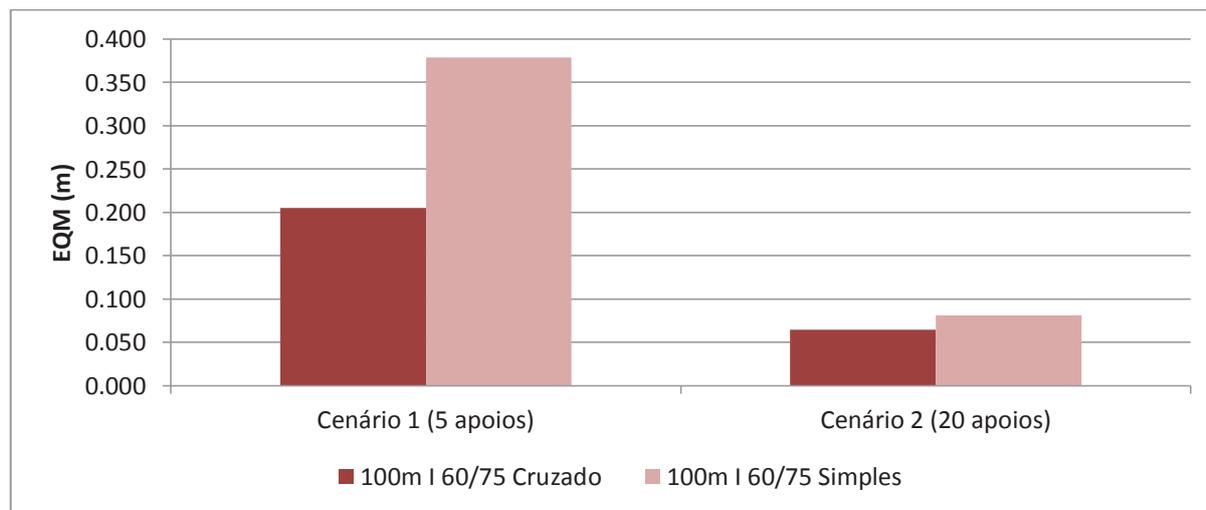
No GRÁFICO 87 são mostradas as exatidões altimétricas correspondentes ao segundo conjunto de dados com câmera inclinada. Nota-se que as exatidões obtidas apresentaram comportamento semelhante ao da planimetria, cabendo portanto as mesmas considerações.

GRÁFICO 86 - Resultados da Planimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 87 - Resultados da Altimetria para voos na altura média de 100 m, fotos inclinadas, recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 75%.



FONTE: O autor (2019).

Este tópico abordou as investigações realizadas para verificar a influência de duas configurações de distribuição de pontos de apoio, na extração de nuvens de pontos a partir da técnica fotogramétrica SFM. Os dados foram coletados a partir de uma plataforma VANT, com diferentes configurações de recobrimento. Com base nos resultados obtidos nos experimentos, as principais conclusões são apresentadas:

Com exceção de duas situações pontuais que requerem maiores investigações, para os conjuntos de dados analisados, independente da

porcentagem de sobreposição entre fotos ou faixas de voo, geometria das faixas de voo (simples ou cruzada), inclinação da câmera e altura de voo, o cenário com maior disponibilidade de pontos de apoio (Cenário 2) viabilizou as melhores exatidões (planimétricas e altimétricas).

Nos experimentos em que foram empregadas faixas de voo cruzadas, notou-se melhores das exatidões planimétricas e altimétricas. A geometria cruzada, nos casos estudados, conseguiu compensar as deficiências de apoio (Cenário 1), viabilizando exatidões planimétricas semelhantes às obtidas nos cenários com maior número de pontos de apoio.

A utilização de bloco de imagens tomadas com câmera inclinada ($\pm 10^\circ$), faixas de voo cruzadas e maior disponibilidade de pontos de apoio (Cenário 2), viabilizou a obtenção da melhor exatidão planimétrica no estudo realizado. Já as melhores exatidões altimétricas foram obtidas com imagens tomadas com a câmera próxima a vertical ($\pm 4^\circ$).

Para os conjuntos de dados analisados, pode inferir que as características dos recobrimentos em conjunto com a disponibilidade de pontos de apoio, interferem diretamente na magnitude das exatidões obtidas.

Em razão do que analisado, dependendo do nível de exatidão desejada no projeto cartográfico, o uso de da configuração com 5 pontos de controle (Cenário 1) é perfeitamente capaz de entregar resultados satisfatórios. Todavia neste cenário, para voos com geometria de faixas simples, recomenda-se o uso de percentagens de recobrimento longitudinal e lateral superiores a 70%. Caso seja usado uma percentagem inferior, sugere-se o emprego de faixas de voo cruzadas.

4.5 ESTUDO DOS EFEITOS DA AUTOCALIBRAÇÃO NA GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA POR TÉCNICA FOTOGRAFÉTRICA SFM.

Para avaliar a influência dos diferentes conjuntos de POI na nuvem de pontos são realizados três experimentos empregando dados de três recobrimentos distintos, previamente discutidos (Item 4.3).

O primeiro experimento utiliza os dados do recobrimento com altura de voo próxima a 200 m, com 60% RLO e 60% RLA e fotos tomadas com a câmera próxima da vertical ($\pm 4^\circ$). Foram testadas as nove combinações POI definidas anteriormente e a cada combinação é apresentado o valor de EQM dos resíduos nos pontos de controle e EQM das discrepâncias em pontos de verificação. Para este conjunto de dados em análise são considerados 21 pontos de controle e 20 pontos de verificação, sendo apresentados na TABELA 81 os valores de EQM obtidos para cada combinação. Analisando-se as magnitudes das resultantes planimétricas e altimétricas, é possível identificar a existência de dois grupos distintos.

TABELA 81 - Valores de EQM para as combinações de POI. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%.

| Combinações | Controle (m) | | | Verificação (m) | | | Resultante Planimétrica (m) | |
|-------------|--------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|
| | EQM x | EQM y | EQM z | EQM x | EQM y | EQM z | Controle | Verificação |
| 1 | 0.079 | 0.090 | 0.027 | 0.081 | 0.087 | 0.222 | 0.120 | 0.118 |
| 2 | 0.092 | 0.093 | 0.151 | 0.080 | 0.075 | 0.194 | 0.131 | 0.110 |
| 3 | 0.092 | 0.093 | 0.152 | 0.079 | 0.074 | 0.194 | 0.131 | 0.109 |
| 4 | 0.092 | 0.094 | 0.152 | 0.083 | 0.076 | 0.192 | 0.131 | 0.112 |
| 5 | 0.039 | 0.052 | 0.057 | 0.065 | 0.048 | 0.078 | 0.065 | 0.081 |
| 6 | 0.038 | 0.052 | 0.058 | 0.065 | 0.047 | 0.079 | 0.065 | 0.081 |
| 7 | 0.035 | 0.053 | 0.057 | 0.064 | 0.049 | 0.074 | 0.063 | 0.081 |
| 8 | 0.036 | 0.052 | 0.055 | 0.064 | 0.050 | 0.069 | 0.063 | 0.082 |
| 9 | 0.036 | 0.052 | 0.055 | 0.064 | 0.050 | 0.069 | 0.064 | 0.081 |

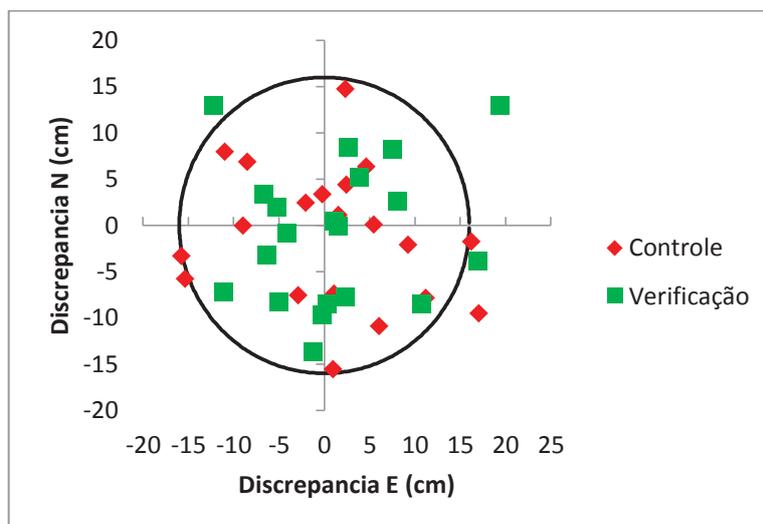
FONTE: O autor (2019).

As resultantes planimétricas obtidas nas quatro primeiras combinações (Grupo 1) mostram um patamar de magnitude da exatidão na ordem do decímetro. Estes resultados representam os efeitos da modelagem dos parâmetros: Distância Focal Calibrada (c), Distorção Radial Simétrica (K1, K2, K3, K4) e os dois primeiros

coeficientes da Distorção Tangencial (P1, P2). Os resultados obtidos a partir da quinta combinação consideraram os demais coeficientes da Distorção Tangencial (P3, P4), não Afinidade (B1) e Ortogonalidade (B2), mostrando outro patamar de exatidão. Percebe-se nitidamente que os resultados da primeira combinação ($c + X_0, Y_0$), apesar de não ser factível em termos práticos, não apresenta diferenças significativas em relação à combinação padrão do PhotoScan ($c + X_0, Y_0 + K_1, K_2, K_3 + P_1, P_2$). Porém, ao comparar o resultado da combinação padrão com as combinações seguintes (Grupo 2), percebe-se uma diminuição de aproximadamente 30% na magnitude das resultantes planimétricas dos pontos de verificação, evidenciando uma melhora de desempenho dos resultados. Assim, pode-se concluir que o emprego de parâmetros adicionais, além da combinação padrão, permite uma melhor modelagem do afastamento da condição de colinearidade, implicando diretamente na melhora das exatidões obtidas no espaço objeto.

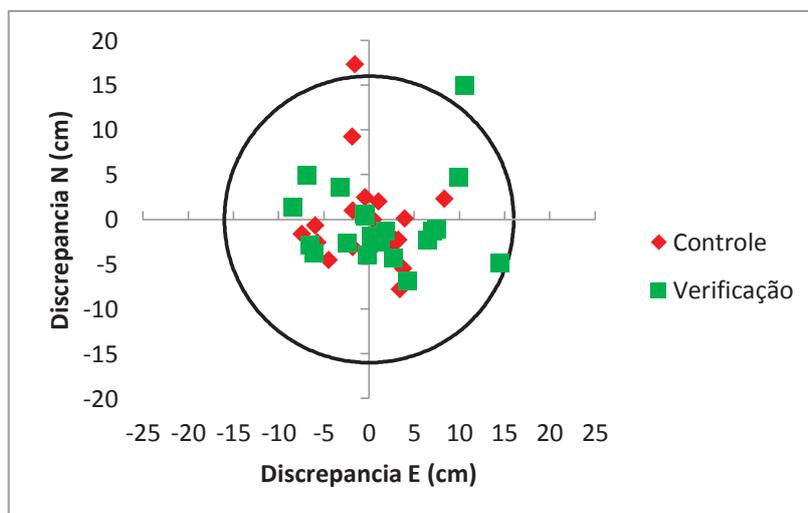
Para mostrar com mais detalhes a conclusão sob os efeitos da modelagem do afastamento da condição de colinearidade, apresenta-se os gráficos da dispersão das discrepâncias planimétricas para a combinação padrão e para o uso de todos os parâmetros (combinação 9). É possível constatar que no caso da configuração padrão GRÁFICO 88 ocorre uma maior dispersão, tanto nos resíduos nos pontos de controle quando das discrepâncias nos pontos de verificação, inclusive extrapolando o limiar de 2 GSD na escala (16 cm). Já para a combinação que leva em conta todos os parâmetros (GRÁFICO 89), há uma maior concentração da dispersão planimétrica na região central.

GRÁFICO 88 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação default. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

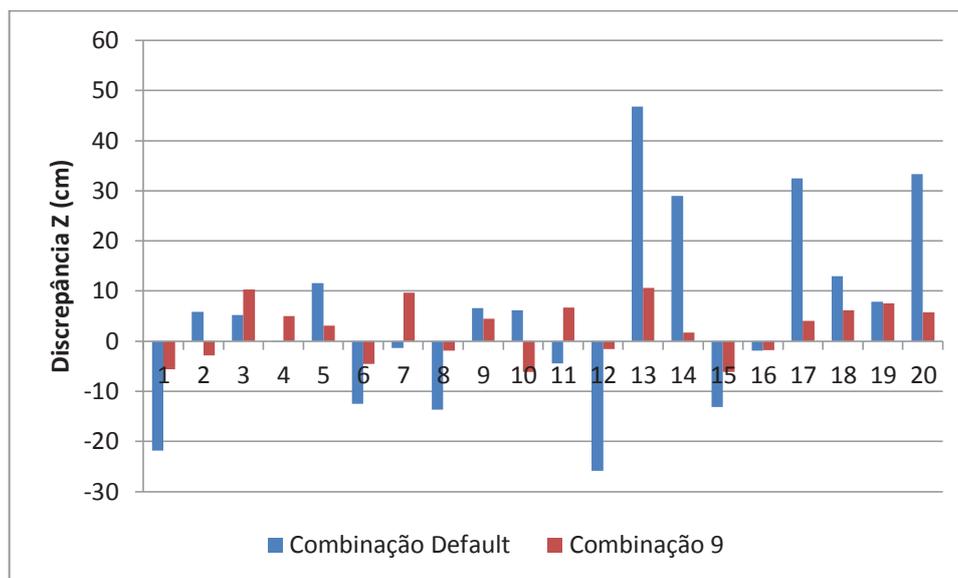
GRÁFICO 89 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação 9. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

Analisando os EQM das discrepâncias obtidas para a componente altimétrica dos pontos de verificação (exatidões), é possível identificar uma melhora também significativa. Como pode ser verificado no GRÁFICO 90, a adição dos demais coeficientes da distorção tangencial, de não afinidade e ortogonalidade, na autocalibração, promoveu uma melhora de aproximadamente 60% no desempenho da componente altimétrica, reduzindo as magnitudes das discrepâncias.

GRÁFICO 90 – Dispersão das discrepâncias altimétricas. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

O segundo experimento foi realizado empregando os dados do recobrimento com altura de voo próxima a 100 m, 60% RLO, 75% RLA e fotos tomadas também próxima da vertical ($\pm 4^\circ$). Em relação ao recobrimento previamente discutido, a principal diferença está na redução da altura de voo em aproximadamente 50% e no aumento de 15% na percentagem do recobrimento entre faixas de voo (RLA). Foram testadas as mesmas nove combinações de POI definidas anteriormente e a cada combinação determinou-se os valores de EQM dos resíduos nos pontos de controle e EQM das discrepâncias nos pontos de verificação. Na TABELA 82 são apresentados os valores de EQM obtidos para cada combinação, a partir de 20 pontos de controle e 19 pontos de verificação. Conforme assinalado na tabela, a partir das magnitudes das resultantes planimétricas e altimétricas, é possível também identificar a existência de dois grupos distintos de valores de EQM. Nas quatro primeiras combinações (primeiro grupo) nota-se que as resultantes planimétricas apresentam magnitudes de aproximadamente 30 cm, enquanto que no segundo grupo (demais combinações) as mesmas resultantes encontram-se com magnitudes aproximadamente 75% menores.

TABELA 82 - Valores de EQM para as combinações de POI. Experimento Voo a 100 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 75%.

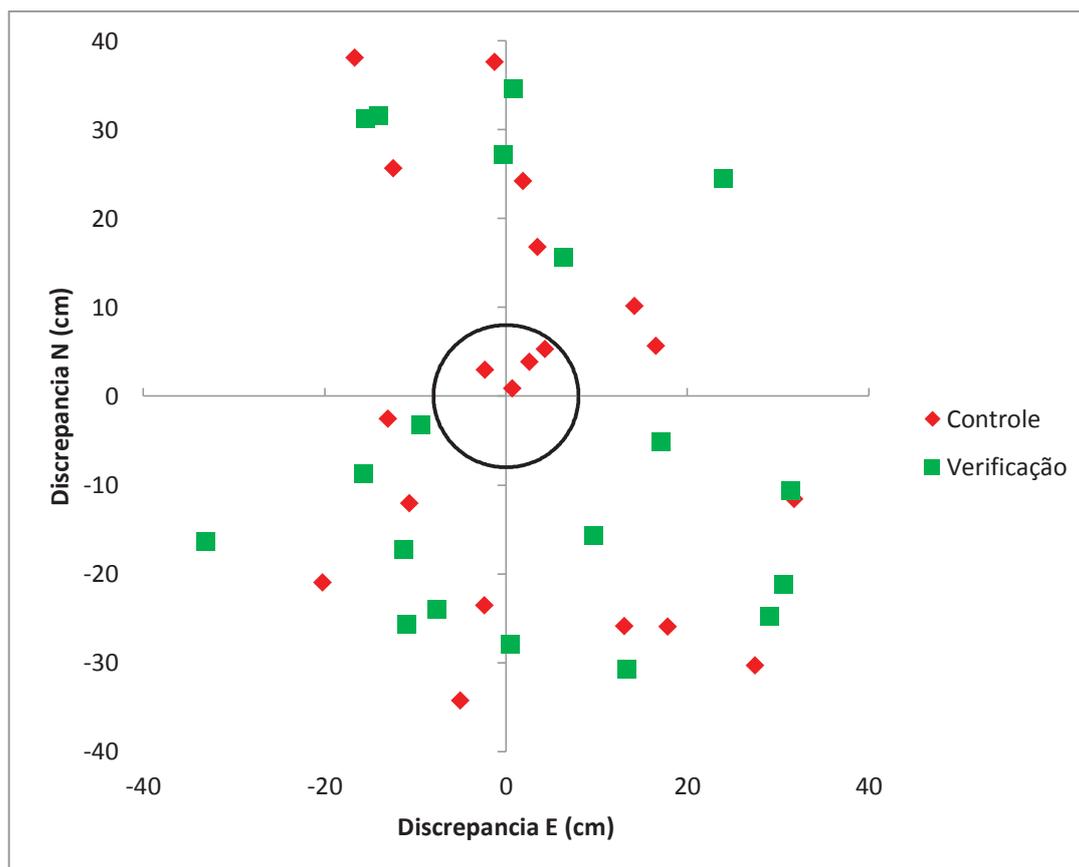
| Combinações | Controle (m) | | | Verificação (m) | | | Resultante Planimétrica (m) | |
|-------------|--------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-----------------------------|-------------|
| | EQM x | EQM y | EQM z | EQM x | EQM y | EQM z | Controle | Verificação |
| 1 | 0.142 | 0.227 | 0.363 | 0.181 | 0.248 | 0.302 | 0.268 | 0.307 |
| 2 | 0.141 | 0.216 | 0.211 | 0.180 | 0.229 | 0.161 | 0.258 | 0.291 |
| 3 | 0.141 | 0.216 | 0.212 | 0.180 | 0.230 | 0.162 | 0.258 | 0.292 |
| 4 | 0.140 | 0.216 | 0.213 | 0.180 | 0.227 | 0.164 | 0.257 | 0.290 |
| 5 | 0.028 | 0.043 | 0.089 | 0.054 | 0.053 | 0.069 | 0.051 | 0.076 |
| 6 | 0.029 | 0.043 | 0.089 | 0.054 | 0.053 | 0.068 | 0.051 | 0.076 |
| 7 | 0.028 | 0.042 | 0.092 | 0.054 | 0.054 | 0.076 | 0.051 | 0.076 |
| 8 | 0.028 | 0.043 | 0.089 | 0.054 | 0.053 | 0.069 | 0.051 | 0.076 |
| 9 | 0.029 | 0.043 | 0.089 | 0.054 | 0.053 | 0.068 | 0.051 | 0.076 |

FONTE: O autor (2019).

Considerando que foram empregados os mesmos conjuntos de pontos de apoio (controle e verificação) do experimento anterior, o experimento atual resultou em valores de EQM distintos e também piores, apenas se consideradas as quatro combinações iniciais de POI. Entretanto, os resultados obtidos a partir da quinta combinação de POI, tanto para o experimento previamente discutido quanto para o presente experimento, alcançaram valores de EQM com magnitudes semelhantes. Uma primeira conclusão que pode ser feita é que houve influência direta da geometria de voo nos resultados obtidos ao se comparar as magnitudes dos valores de EQM dos dois experimentos. Porém conforme a combinação de POI adotada para a modelagem do afastamento da condição de colinearidade, pode-se contornar esta influência. Haja visto que a partir da quinta combinação, ambos os experimentos realizados resultaram em valores de EQM com magnitudes semelhantes. Desta forma, dada à existência dos dois grupos de valores de EQM observados, constata-se novamente que o emprego de parâmetros adicionais implicou diretamente na melhora das exatidões obtidas. Para ilustrar a conclusão sob os efeitos da modelagem do afastamento da condição de colinearidade, apresenta-se os gráficos da dispersão das discrepâncias planimétricas para a combinação padrão e para combinação 9 (usando todos os parâmetros). É possível visualizar no GRÁFICO 91, assim como no GRÁFICO 88, a configuração padrão também resulta em uma maior dispersão planimétrica dos resíduos e das discrepâncias, inclusive novamente extrapolando o limiar de 2 GSD na escala (8

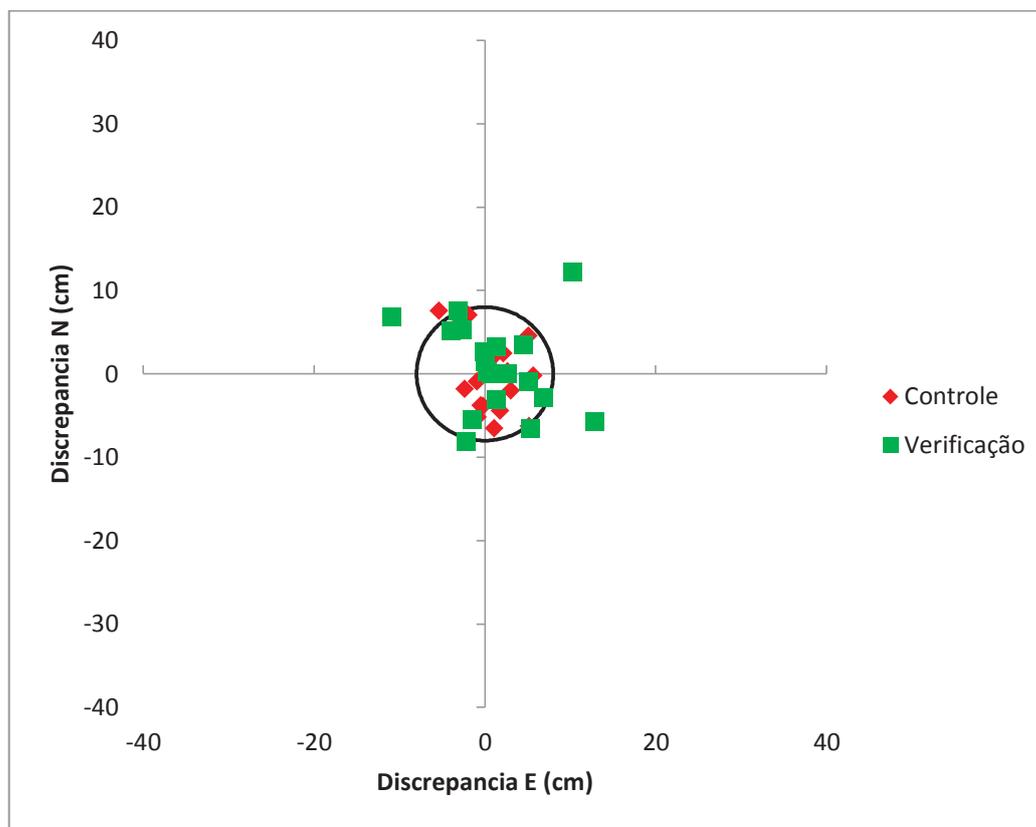
cm). Já no GRÁFICO 92 visualiza-se os resultados da combinação 9 (considerando todos os parâmetros), havendo uma maior concentração das dispersões planimétricas dos resíduos e das discrepâncias.

GRÁFICO 91 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação default. Experimento Voo a 100 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

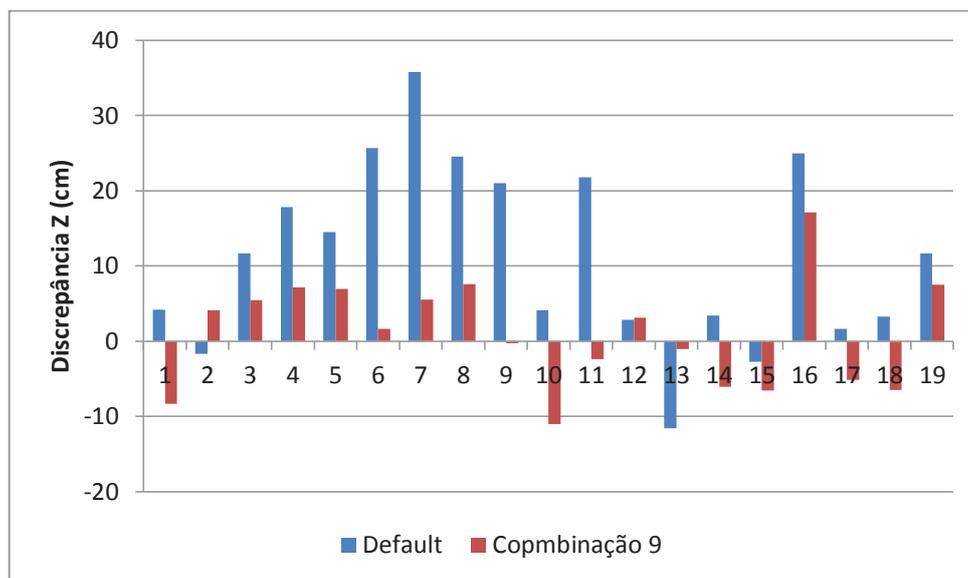
GRÁFICO 92 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação 9. Experimento Voo a 100 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Analisando as exatidões altimétricas (EQM das discrepâncias dos pontos de verificação) e o GRÁFICO 93, nota-se que os valores obtidos para a combinação *default* são maiores que os valores obtidos a partir da combinação 9, apresentando maiores afastamentos em relação a uma média zero (maior dispersão). Este resultado permite concluir que os POI da combinação *default*, em relação à combinação 9, são deficientes quanto à capacidade de modelagem do afastamento da condição de colinearidade. De maneira geral, a combinação com o maior número de parâmetros permitiu uma melhora de aproximadamente 91% no desempenho da média das componentes altimétricas em relação à condição padrão.

GRÁFICO 93 – Dispersão das discrepâncias altimétricas. Experimento Voo a 200 m com fotos verticais- RLO 60% RLA 60%.



FONTE: O autor (2019).

De forma similar aos experimentos discutidos previamente, com fotos tomadas na vertical, apresentam-se também os resultados de um experimento que considera fotos obtidas com câmera na condição inclinada. Foi realizado um terceiro experimento empregando os dados de um recobrimento com altura de voo próxima a 100 m, 80% RLO, 75% RLA e fotos tomadas com a câmera inclinada ($\pm 10^\circ$). Também foram testadas as mesmas nove combinações de POI definidas anteriormente e os valores de EQM dos resíduos nos 21 pontos de controle e EQM das discrepâncias nos 20 pontos de verificação são apresentados na TABELA 83. Analisando para cada combinação de POI, as magnitudes das resultantes planimétricas dos pontos de verificação, é possível verificar que os valores dos EQM encontram-se em um mesmo patamar. No caso da combinação 1 (c+X0, Y0), com pequena viabilidade prática pois considera o caso de uma câmera sem distorções de lentes, apresentou estranhamente precisão e exatidão planimétrica semelhante a outras combinações de POI, que consideram maior número de parâmetros.

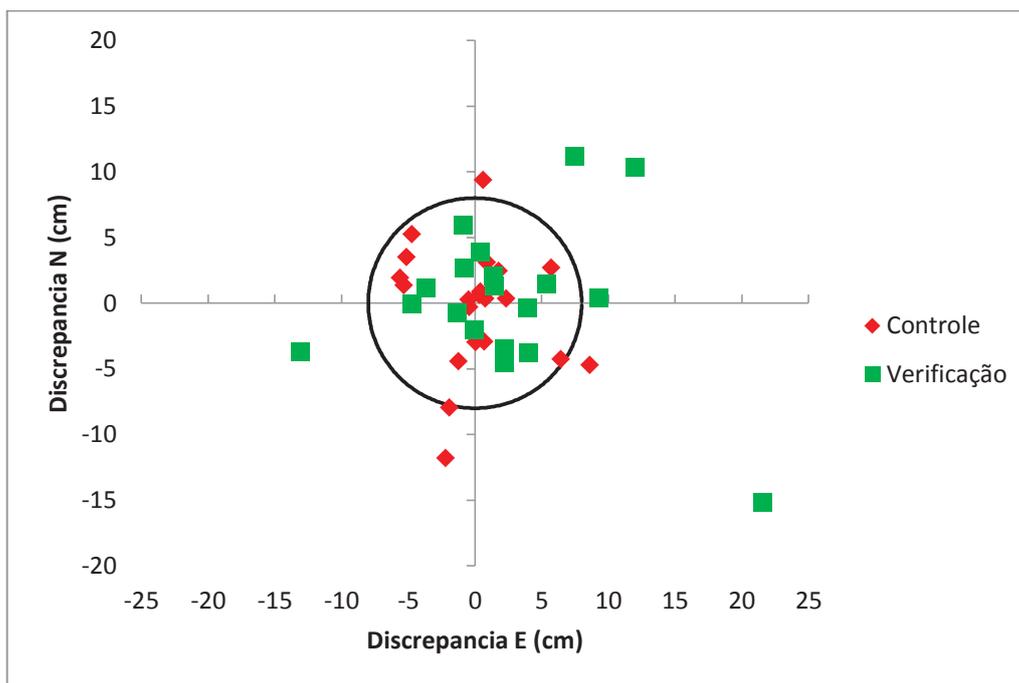
TABELA 83 - Valores de EQM para as combinações de POI. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%.

| Combinações | Controle (m) | | | Verificação (m) | | | Resultante Planimétrica (m) | |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------------------|-------------|
| | EQM x | EQM y | EQM z | EQM x | EQM y | EQM z | Controle | Verificação |
| 1 | 0.040 | 0.051 | 0.226 | 0.075 | 0.111 | 0.228 | 0.065 | 0.134 |
| 2 | 0.037 | 0.046 | 0.114 | 0.075 | 0.110 | 0.126 | 0.059 | 0.134 |
| 3 | 0.037 | 0.045 | 0.114 | 0.075 | 0.110 | 0.127 | 0.059 | 0.133 |
| 4 | 0.036 | 0.046 | 0.116 | 0.075 | 0.111 | 0.115 | 0.058 | 0.134 |
| 5 | 0.035 | 0.041 | 0.099 | 0.070 | 0.108 | 0.097 | 0.054 | 0.128 |
| 6 | 0.035 | 0.041 | 0.100 | 0.070 | 0.108 | 0.099 | 0.054 | 0.129 |
| 7 | 0.034 | 0.040 | 0.104 | 0.069 | 0.108 | 0.091 | 0.053 | 0.129 |
| 8 | 0.034 | 0.041 | 0.095 | 0.070 | 0.109 | 0.096 | 0.053 | 0.129 |
| 9 | 0.034 | 0.041 | 0.094 | 0.070 | 0.109 | 0.095 | 0.053 | 0.129 |

FONTE: O autor (2019).

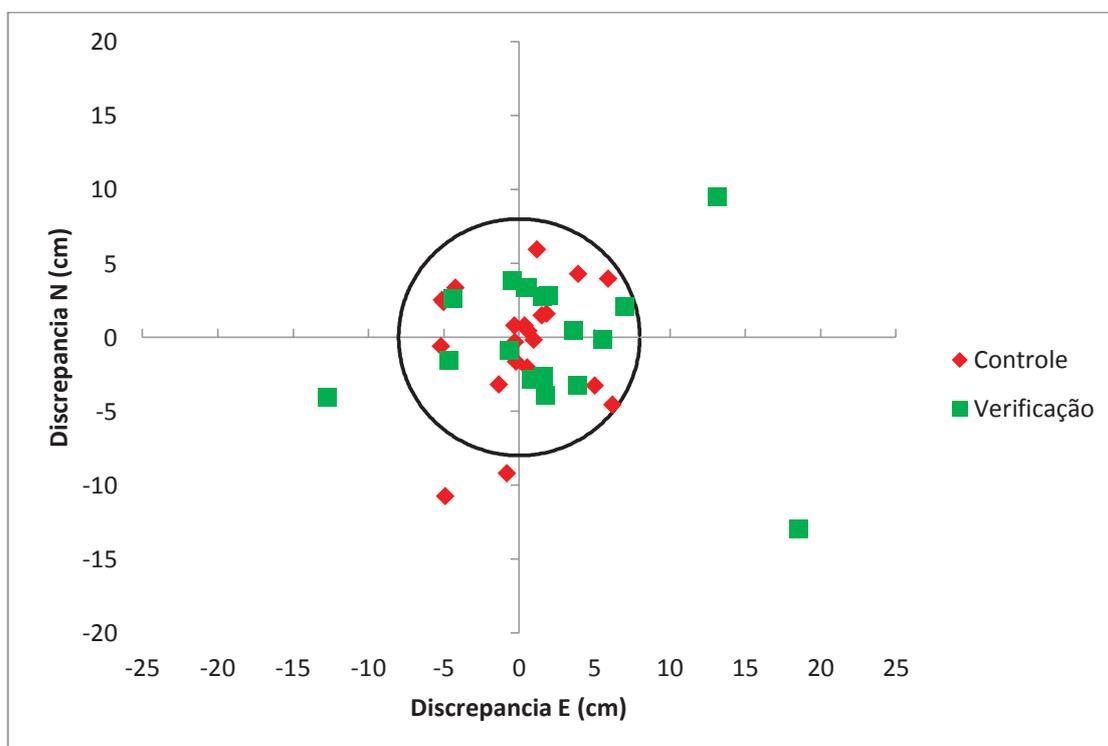
Como já mencionado, os EQM das resultantes planimétricas, obtidos a partir das nove combinações de POI não apresentam variações significativas de magnitudes (controle e verificação). A ausência de mudanças abruptas nos valores das resultantes planimétricas, por conta dos efeitos das combinações dos POI, principalmente entre a combinação 4 e 5, indica que para o experimento em análise houve uma influência direta do uso de fotos oblíquas nos resultados obtidos. Para ilustrar esta conclusão, acerca dos benefícios do uso de imagens oblíquas, analisam-se os resultados obtidos a partir de duas combinações de POI. Apresenta-se a seguir os gráficos da dispersão das discrepâncias planimétricas para a combinação padrão e para combinação 9. É possível visualizar no GRÁFICO 94 as dispersões obtidas para a configuração padrão de POI enquanto que no GRÁFICO 95 visualiza-se os resultados da combinação 9. Nota-se que apesar da diferença entre as combinações de POI empregadas no processamento, ambos os gráficos apresentaram valores concentrados dentro do limiar de 2 GSD (8 cm). Estes resultados mostram que no caso da obtenção de EQM planimétrico, a autocalibração utilizando imagens inclinadas, viabilizou a determinação de POI com propriedades geométricas similares nas nove combinações consideradas.

GRÁFICO 94 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação *default*. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 95 - Dispersão dos resíduos nos pontos de apoio e das discrepâncias planimétricas para a combinação 9. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%.

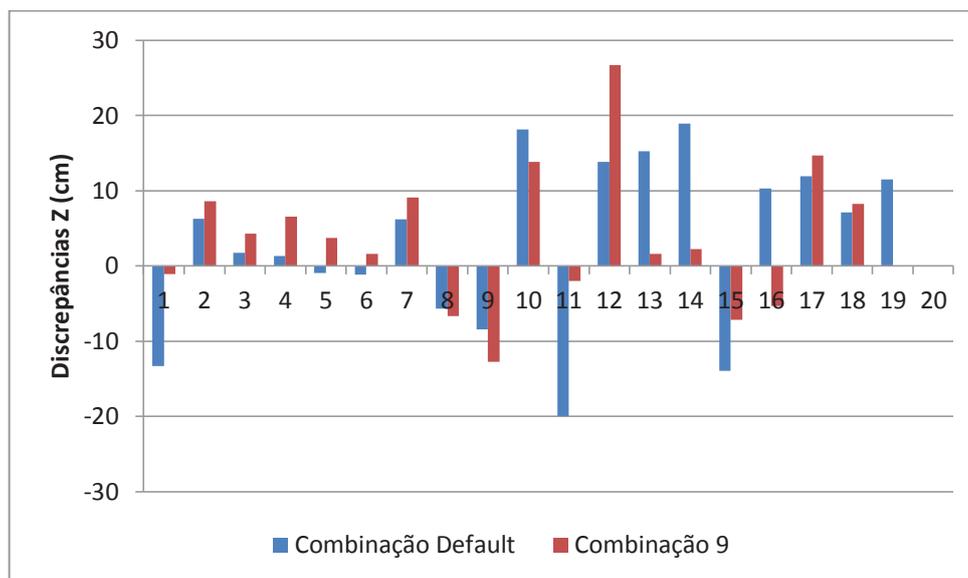


FONTE: O autor (2019).

Com relação aos resultados de exatidões altimétricas, apresentados na TABELA 83, a combinação 1 resulta na pior exatidão altimétrica obtida. Apesar da admissibilidade da insignificância nas diferenças entre os resultados das combinações de POI, nota-se uma sutil diferença entre as magnitudes dos EQM que, de certo modo, permite separar os resultados em dois grupos. Um primeiro grupo diz respeito aos resultados a partir da combinação 2, até a combinação 4, onde foram considerados os parâmetros da Distorção Radial Simétrica (K1, K2, K3, K4) e os dois primeiros coeficientes da Distorção Tangencial (P1, P2). O segundo grupo diz respeito aos valores obtidos a partir da quinta combinação, com a adição dos demais parâmetros. O fenômeno do degrau existente entre a combinação padrão e as demais, muito embora extremamente suavizado, manteve-se para a componente altimétrica. Porém, considerando-se inexistente a diferença de patamares de valores, pela insignificância das diferenças entre as exatidões, a partir da segunda combinação, comprova-se que a utilização de imagens inclinadas viabilizou a determinação de POI com propriedades geométricas similares.

Analisando-se as discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação, apresentadas no GRÁFICO 96, nota-se que os valores obtidos para a combinação 4 (*default*) apresentam dispersões semelhantes às obtidas a partir da combinação 9. Estes resultados confirmam que os POI determinados nas duas combinações apresentadas foram capazes de modelar o afastamento das condições de colinearidade de forma semelhante.

GRÁFICO 96 – Dispersão das discrepâncias altimétricas. Experimento Voo a 100 m com fotos inclinadas- RLO 80% RLA 75%.



FONTE: O autor (2019).

Concluindo o estudo realizado sobre autocalibração de POI na geração da nuvem de pontos empregando SFM tem-se:

- Com base nos dois experimentos realizados com fotos próximas a vertical e nas exatidões planimétricas e altimétricas é possível concluir que o emprego da combinação padrão para os POI, não permitiu uma modelagem adequada dos afastamentos da condição de colinearidade.
- A mudança na altura de voo (segundo experimento), provocou interferência mais significativas apenas nas quatro primeiras combinações de POI. A combinação padrão ou “default” continuou não apresentando os melhores resultados de exatidões planimétrica e altimétrica.
- No caso do uso de fotos oblíquas, a menos da primeira combinação, as demais combinações, inclusive a combinação padrão, apresentaram valores de EQM semelhantes (planimétrico e altimétrico).
- Os resultados obtidos corroboram com as considerações feitas por (JAMES *et al.*, 2017).
- Com base nas observações realizadas, recomenda-se que sejam feitos testes de significância dos POI, avaliando-se as magnitudes dos EQM antes da geração de

modelos de elevação ou de ortomosaicos, a fim de maximizar as potenciais exatidões destes produtos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É evidente em nossa sociedade a consolidação de plataformas VANT nas mais diversas áreas e aplicações. No âmbito das Ciências Geodésicas e Cartográficas, ressalta-se o interesse na extração de geoinformações com o melhor custo e benefício relacionando tempo de execução, custo financeiro e grau de exatidão inerente a cada aplicação.

Valendo-se da abordagem SFM, o presente estudo buscou verificar o comportamento das exatidões planimétricas e altimétricas de Nuvens de Pontos (no âmbito de um “*Bundle Adjustment*”), MDT e Ortomosaico, obtidos a partir de diferentes geometrias de voo. Para isso, foram concebidos, executados e analisados experimentos compostos por voos com diferentes sobreposições entre fotos, alturas em relação ao solo (100 m e 200 m) e grau de inclinação da câmera ($\pm 4^\circ$ e $\pm 10^\circ$). Os voos foram executados a partir de uma plataforma remotamente pilotada, cujo modelo é amplamente conhecido entre usuários especialistas e não especialistas (DJI PHANTOM). As análises e inferências que se seguiram foram alicerçadas em discrepâncias horizontais e verticais assim como em validações estatísticas.

Uma primeira constatação foi que as condições planejadas para os recobrimentos nem sempre podem ser alcançadas por conta de influências atmosféricas. A redução do número de imagens, almejando minimizar o esforço computacional necessário no processamento, pode levar muitos usuários a executar recobrimentos com menores proporções de sobreposição entre fotos. A utilização de configurações de recobrimento semelhante à usada na Fotogrametria clássica (60%RLO e 30%RLA) mostrou-se, podendo implicar “furos” no bloco de imagens.

Outro apontamento diz respeito à qualidade visual das imagens. Em altitudes mais elevadas, houve menor efeito de distorção (“*motion blur*”) por conta da velocidade aparente em relação ao solo, apesar de maior incidência de rajadas de vento. Portanto, deve-se atentar para o uso de uma velocidade de disparo da

câmera compatível com a velocidade da aeronave, de forma a minimizar os efeitos de arrasto.

Foi observado que os pontos de controle e verificação que tiveram as piores exatidões, foram justamente pontos com menor número de medidas (2 raios), ocorrendo principalmente nas bordas dos blocos fotogramétricos. Quando se dispõe de apenas dois raios para a determinação da interseção que define o ponto, imprecisões na componente “x” são distribuídos na componente “z”, degenerando a qualidade da componente altimétrica. Todavia, este fenômeno é drasticamente minimizado com o emprego de faixas de voo cruzadas.

Em relação ao desempenho dos produtos cartográficos gerados, constata-se que, a degradação da exatidão é proporcional ao número de etapas de processamento necessárias para a obtenção dos produtos. Erros altimétricos do modelo de elevação, por exemplo, são propagados e distribuídos para o Ortomosaico. Os produtos cartográficos obtidos a partir de imagens inclinadas ($\pm 10^\circ$) apresentaram melhores exatidões planimétricas e altimétricas em relação aos obtidos exclusivamente a partir de imagens verticais ($\pm 4^\circ$). Entretanto, em relação à Nuvem Densa, o uso de imagens inclinadas promoveu a ocorrência do efeito visual “salt and pepper”, inexistente com imagens verticais. Os experimentos mostraram que o emprego de maiores percentagens de sobreposição entre fotos e faixas, não conduz necessariamente a melhores exatidões. Já recobrimentos com geometria de voo cruzada, independente da percentagem de sobreposição entre fotos e faixas, foram os que apresentaram as melhores exatidões (planimétrica e altimétrica).

Quanto ao estudo sobre pontos de apoio, verificou-se que as geometrias (características) dos recobrimentos exercem influência sobre as exatidões obtidas em cenários com distintas quantidades e distribuições de ponto de apoio. Em alguns casos, a geometria de voo cruzada consegue compensar deficiências de disponibilidade de pontos de apoio, permitindo a obtenção de exatidões semelhantes às obtidas, empregando-se um recobrimento com faixas de voo simples, porém, com maior disponibilidade de pontos de apoio. Analisando um mesmo cenário de distribuição de pontos de apoio, não foram detectadas diferenças significativas nas exatidões obtidas, empregando-se faixas de voo com distintas porcentagens de sobreposição. Entretanto, nos recobrimentos com faixas de voo simples, menores sobreposições entre fotos e faixas, percebe-se uma melhora significativa nas exatidões quando são adicionadas faixas cruzadas. O estudo permitiu concluir que a

geometria de voo interfere na sensibilidade à disponibilidade de pontos de apoio e que, em se tratando de uma plataforma de aquisição de imagens munida de instrumental de baixo custo, o emprego de um maior número de pontos de apoio permite a obtenção de melhores exatidões.

Quanto ao número de POI empregado na autocalibração, ficou claro que, o uso da combinação padrão para os POI não viabilizou uma modelagem adequada dos afastamentos da condição de colinearidade. Recomenda-se que antes dos procedimentos de densificação da Nuvem de Pontos, geração do MDT e Ortomosaico, seja feita uma verificação das exatidões planimétricas e altimétricas obtidas, por meio da adição de POI além dos empregados na condição padrão. Esta verificação torna-se ainda mais importante dado ao fato que as câmeras integradas às plataformas não foram construídas com a finalidade de extração de informação métrica. Conforme demonstrado pelo estudo realizado, o uso de uma combinação de POI inadequada pode implicar em diferenças de exatidões tridimensionais significativas, superiores a 50%.

Dada às inúmeras possibilidades de configuração de recobrimentos e diante das necessidades intrínsecas de cada projeto cartográfico, é inviável sugerir o uso de uma configuração de recobrimento específica. Entretanto, os experimentos e estudos realizados permitem concluir que o uso de imagens inclinadas e faixas de voo cruzadas permitem a obtenções de melhores exatidões, mesmo em condições com menor disponibilidade de pontos de apoio. Com isso, cabe ao profissional responsável pelo projeto cartográfico adotar a melhor estratégia.

4.6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos experimentos conduzidos Apresentam se propostas de futuros estudos relacionados com a temática abordada:

- 1) Realizar estudos comparativos de desempenho de exatidões, empregando procedimentos de calibração de câmera independente da autocalibração;
- 2) Realizar estudos de geração de produtos cartográficos empregando o referenciamento direto de imagens a partir da integração GNSS/INS;
- 3) Realizar estudos de geração de produtos cartográficos em aplicações suportadas por uma única faixa de voo (corredores).

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. **Photogrammetric Record**, 1984. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1984.tb00505.x>.
- ACKERMANN, F. KINEMATIC GPS CONTROL FOR PHOTOGRAMMETRY. **Photogrammetric Record**, p. 261-276, 1992. doi:10.1111/j.1477-9730.1992.tb00251.x .
- AGISOFT PHOTOSCAN. **Agisoft PhotoScan 1.2.6**. [S.l.]. 2016.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003. ISBN ISBN 85-86180-28-9.
- ARAUJO, P. C. D.; ABAR, C. A. A. P. **Sobre o Boxplot no GeoGebra**. 1a. Conferência Latino Americana de GeoGebra. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 13-21.
- ASPRS. **Manual of Photogrammetry**. 5th. ed. Pennsylvania State University: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. 1151 p. ISBN ISBN 1570830711- 9781570830716.
- ASPRS. **ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data**. [S.l.], p. Vol. 81, No. 3, March 2015, pp. A1–A26. 2015. doi: 10.14358/PERS.81.3.A1-A26.
- BLÁHA, M. et al. DIRECT GEOREFERENCING OF UAVS. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Zurich, Switzerland, v. XXXVIII, 2011. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-131-2011>.
- BOTRUGNO, M. C.; D'ERRICO, G.; PAOLIS, L. T. D. Augmented Reality and UAVs in Archaeology: Development of a Location-Based AR Application. **De Paolis L., Bourdot P., Mongelli A. (eds) Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics AVR**, v. 10325, n. Lecture Notes in Computer Science, p. 261-270, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60928-7_23.
- CARBONNEAU, P. E.; DIETRICH, J. T. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 42, p. 473-486, 2016. <https://doi.org/10.1002/esp.4012>.
- CARRASCOSA, F. J. M. et al. An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaicks to Survey Archaeological Areas. **Sensors**, 2016. doi:10.3390/s16111838.
- CARRICONDO, P. M. et al. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. **International Journal of Applied Earth**

Observation and Geoinformation, p. 1-10, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. **Statistical inference**. Pacific Grove, CA : DUXBURY Thomson Learning, 2002. ISBN ISBN0-534-24312-6.

COELHO, L.; BRITO, J.. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Ed UERJ, 2007. 196 p. ISBN ISBN 978-85-7511-114-7.

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

COSTA, G. C.; SILVA, D. C. D. PRÉ-SINALIZAÇÃO DE PONTOS DE APOIO EM AEROFOTOGRAMETRIA COM CÂMERAS DE PEQUENO FORMATO. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, p. 001-009, Maio 2012.

COVENEY, S.; ROBERTS, K. Lightweight UAV digital elevation models and orthoimagery for environmental applications: data accuracy evaluation and potential for river flood risk modelling. **International Journal of Remote Sensing**, February 2017. doi:10.1080/01431161.2017.1292074.

CRAMER, M. On The Use Of Direct Georeferencing In Airborne Photogrammetry. **Proceedings 3rd. International Symposium on Mobile Mapping Technology**, Cairo, 2001.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.17.1691&rep=rep1&type=pdf>.

CRAMER, M.; PRZYBILLA, H. J.; ZURHORST, A. UAV CAMERAS: OVERVIEW AND GEOMETRIC CALIBRATION BENCHMARK. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Bonn, Germany, 4-7 September 2017. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017>.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. DIRECT GEOREFERENCING USING GPS/INERTIAL EXTERIOR ORIENTATIONS FOR PHOTOGRAMMETRIC APPLICATIONS, Amsterdam, v. 33, n. B3/1 PART 3, p. 198-205, 2000.

DEBIASI, P. **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA**. Curitiba. 2012.

DOYLE, F. J. **The Historical Development of Analytical Photogrammetry**. ASPRS Semi-Annual Meeting. Wellesley Island- NY: [s.n.]. 1964. p. 259-265.
https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1964journal/mar/1964_mar_259-265.pdf.

DSG, E. B. Normas Técnicas. **Geoportal**, 2019. Disponível em: <<http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2>>. Acesso em: Fev 2019.

EISENBEISS, H. **UAV Photogrammetry**. Zurich. 2009. (ISSN 0252-9335 ; ISBN 978-3-906467-86-3).

EURO-SDR, E. S. D. R. **Registration Quality- Towards Integration of Laser Scanning and Photogrammetry**. European Spatial Data Research -EuroSDR. [S.I.], p. 298. 2011. http://www.eurocdr.net/sites/default/files/uploaded_files/59_0.pdf.

EVERAERTS, J. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, n. 2008, p. 1187--1192, 2008.

EZEQUIEL, C. A. F. et al. **UAV Aerial Imaging Applications for Post-Disaster Assessment, Environmental Management and Infrastructure Development**. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Orlando, FL, USA: IEEE. 2014. DOI: 10.1109/ICUAS.2014.6842266.

FILHO, L. E. **CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOGRAFÉTICO MULTI-CÂMERAS PARA USO EM APLICAÇÕES DE MAPEAMENTO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO**. UFPR. CURITIBA. 2017. Tese.

FONSTAD, M. et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS**, v. 38, p. 421-430, 25 January 2013. DOI: 10.1002/esp.3366.

FRYSKOWSKA, A. et al. EFFECTIVE DETECTION OF SUB-SURFACE ARCHEOLOGICAL FEATURES FROM LASER SCANNING POINT CLOUDS AND IMAGERY DATA. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-2/W5, 2017. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-245-2017.

FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. **IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE**, v. 32, n. 8, p. 1362 - 1376, August 2010. doi: 10.1109/TPAMI.2009.161.

GABRLIK, P. et al. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, p. 4931-4959, Feb 2018. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1434331>.

GANDOR, F.; REHAK, M.; SKALLOUD, J. PHOTOGRAMMETRIC MISSION PLANNER FOR RPAS. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Toronto, XL-1/W4, 2015.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. 2. ed. Curitiba: UFPR, 2015. 430 p. ISBN ISBN978-85-8480-008-7.

GERKE, M.; PRZYBILLA, H.-J. Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. **Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation**, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>.

GHASEMI, A.; ZAHEDIASL, . Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. **Int J Endocrinol Metab**, 10, n. 2, 2012. 486-489. DOI: 10.5812/ijem.3505.

GINDRAUX, S.; BOESCH, R.; FARINOTTI, D. Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers. **Remote Sensing**, 2017. doi:10.3390/rs9020186.

GOMES, R. et al. Approximate georeferencing and automatic blurred. **biosystems engineering**, 2016. 308-327.

GRAÇA, N. L. S. D. S.; MITISHITA, E. A.; GONÇALVES, J. E. USE OF UAV PLATFORM AS AN AUTONOMOUS TOOL FOR ESTIMATING EXPANSION ON INVADED AGRICULTURAL LAND. **Bulletin of Geodetic Sciences**, Curitiba, v. 23, p. 509-519, 2017. doi: 10.1590/S1982-21702017000300034.

HAALA, N. et al. PERFORMANCE TEST ON UAV-BASED PHOTOGRAMMETRIC DATA COLLECTION. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XXXVIII-1/C22, September 2011.

HAALA, N.; CRAMER, M.; ROTHERMEL, M. QUALITY OF 3D POINT CLOUDS FROM HIGHLY OVERLAPPING UAV IMAGERY. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Rostock-Germany, 4-6 September 2013. 183-188.

HARDIN, P. J. et al. Small Unmanned Aerial Systems (sUAS) for environmental remote sensing: challenges and opportunities revisited. **GIScience & Remote Sensing**, 2018. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1510088>.

HASSAAN, O. et al. Precision Forestry: Trees Counting in Urban Areas Using Visible Imagery based on an Unmanned Aerial Vehicle. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 16, p. 16-21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.004>.

HENRICHSEN, A. **3D Reconstruction and Camera Calibration from 2D Images**. Cape Town. 2000.

HOLNESS, C. et al. Remote Sensing Archeological Sites through Unmanned Aerial Vehicle (U.A.V.) Imaging. **IGARSS**, 2016. 6695-6698.

HONKAVAARA, E. IN-FLIGHT CAMERA CALIBRATION FOR DIRECT GEOREFERENCING. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2004. 166-172.

HUTTON, J.; MOSTAFA, M. M. R. **10 Years of Direct Georeferencing For Airborne Photogrammetry**. APPLANIX Corporation. Ontario, p. 16. 2005.

IAROCCI, A. et al. **UAV: A MULTIDISCIPLINARY TOOL TO ACCESS EXTREME ENVIROMENTS**. 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Lausanne, Switzerland: IEEE. 2014. DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077571.

IAROCCI, A. et al. **UAV: A MULTIDISCIPLINARY TOOL TO ACCESS EXTREME ENVIROMENTS**.

JACOBSEN, K. DIRECT / INTEGRATED SENSOR ORIENTATION - PROS AND CONS. **Proceedings of the XXth ISPRS Congress**, p. 12-23, 2004.

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/384.pdf>.

JAMES, M. R. et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment.

Geomorphology, n. 280, p. 51–66, 2017. doi:10.1016/j.geomorph.2.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. doi: **10.1002/esp.4125**, 2017.

JARDIM, C. H. Relações entre temperatura, umidade relativa. **Geografias**, p. 128-142, 2011.

JAWLIK, A. **Statistics from A to Z: confusing concepts clarified /**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

JUNIOR, M. G. M. **RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS VERDADEIRAS COM EMPREGO DE DADOS LIDAR.**

Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 238. 2010. Tese.

KOIK, B. T.; IBRAHIM, . Exploration of Current Trend on Blur Detection. **Journal of Industrial and Intelligent Information**, Setembro 2013. 143-147.

KRAUS, K. **Photogrammetry Geometry from Images and Laser Scans**. 2nd. ed. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2007. 477 p. ISBN 978-3-11-019007-6.

LINDER, W. **Digital Photogrammetry: A Practical Course**. 4 th. ed. Düsseldorf: Springer, 2016. 223 p. ISBN 978-3-662-50462-8. DOI 10.1007/978-3-662-50463-5.

LINGUA, A.; MARENCHINO, D.; NEX, F. Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications. **Sensors**, 9, n. 5, 2009. 3746-3766. doi:10.3390/s90503745.

LOPEZ, D. H. et al. An Automatic Approach to UAV Flight Planning and Control for Photogrammetric Applications: A Test Case in the Asturias Region (Spain).

PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING, January 2013. 87-98.

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints.

International Journal of Computer Vision, Vol. 60, 2004. p.91-110.

LUGNANI, J. B. **Introdução a Fototriangulação**. 1. ed. Curitiba: Imprensa Universitaria UFPR, 1987. 134 p.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. 1304, 2008.

- MATÍAS, J. D. et al. Photogrammetric Methodology for the Production of Geomorphologic Maps: Application to the Veleta Rock Glacier (Sierra Nevada, Granada, Spain). **Remote Sensing**, 2009. doi:10.3390/rs1040829.
- NAKAMURA, J. **Image sensors and signal processing for digital still cameras**. [S.I.]: Taylor & Francis, 2006.
- NASRULLAH, A. R. **Systematic Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Product Quality**. University of Twente. Enschede (Netherlands). 2016.
- NEUMANN, K. J. **Digital aerial cameras**. Germany: Intergraph Z/I Deutschland GMBH. [S.I.]: [s.n.]. 2005. p. 1-5.
https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2009/html/nonref/1_6.pdf.
- NOCERINO, E. et al. ACCURACY AND BLOCK DEFORMATION ANALYSIS IN AUTOMATIC UAV AND. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Strasbourg- France, Volume II-5/W1, 2-6 September 2013.
- OLIVEIRA, ; AMORIN, H. S.; ERECZYNSKI, C. P. Investigating the atmosphere with data obtained by radiosondes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2018.
- ORYCH, A. REVIEW OF METHODS FOR DETERMINING THE SPATIAL RESOLUTION OF UAV SENSORS. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Toronto, p. 1-5, 2015. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-391-2015.
- PEPE, M.; FREGONESE, L.; SCAIONI, M. Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with. **EUROPEAN JOURNAL OF REMOTE SENSING**, 2018. 412-436. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444945>.
- PFEIFER, N.; GLIRA, P.; BRIESE, C. DIRECT GEOREFERENCING WITH ON BOARD NAVIGATION COMPONENTS OF FLIGHT WEIGHT UAV PLATFORMS. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Melbourne, Volume XXXIX-B7, September 2012.
- PORTAL ACTION. <http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas>. **Portal Action**, 2018 a. Acesso em: 1 Setembro 2018.
- PORTAL ACTION. <http://www.portalaction.com.br/manual-nao-parametricos/teste-de-wilcoxon-amostra-unica>. **Portal action**, 2018 b. Acesso em: 5 Maio 2018.
- PULITI, S. et al. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 485-497, January 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.007>.
- RAZALI, M.; WAH, B. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. **Journal of statistical modeling and analytics**, 2, n. 1, 2011. 21-33.
- REMONDINO, F. Detectors and descriptors for photogrammetric applications. **Proceedings of Photogrammetric and Computer Vision ISPRS Symposium**, Bonn- Germany, 2006. <http://www.close->

range.com/docs/Detectors_and_descriptors_for_photogrammetric_applications--Remondino.pdf.

RIZKY , A. P.; LIYANTONO; SOLAHUDIN, M. Multi-copter development as a tool to determine the fertility of rice plants in the vegetation phase using aerial photos. **Procedia Environmental Sciences**, v. 24, p. 258-265, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.034>.

ROCK, G.; RIES, J. B.; UDELHOVEN, T. SENSITIVITY ANALYSIS OF UAV-PHOTOGRAMMETRY FOR CREATING DIGITAL ELEVATION MODELS (DEM). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Zurich, Volume XXXVIII-1/C22, 14-16 September 2011.

ROKHMANA, C. A. The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia. **Procedia Environmental Sciences**, v. 24, p. 245-253, 2015. doi: 10.1016/j.proenv.2015.03.032.

SANDAU, R. **Digital Airborne Camera: Introduction and Technology**. [S.l.]: Springer Netherlands, 2010. 350 p. ISBN ISBN 978-1-4020-8877-3 e-ISBN 978-1-4020-8878-0. DOI 10.1007/978-1-4020-8878-0.

SANTOS, D. P. et al. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL EM DADOS ESPACIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE ESTATÍSTICA ESPACIAL: PROPOSTA DE MÉTODO E EXEMPLO UTILIZANDO A NORMA BRASILEIRA. **BCG - Boletim de Ciências Geodésicas - On-Line version**, Curitiba, Outubro-Dezembro 2016. 630-650.

SANTOS, S. D. R. et al. **CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DO PEC (PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA) NOS DIAS ATUAIS**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife: [s.n.]. 2010. p. 1-5.

SCHONBERGER, J. L.; FRAHM, J.-M. **Structure-from-Motion Revisited**. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: [s.n.]. 2016. DOI: 10.1109/CVPR.2016.445.

SCHWARS, K. P. et al. An Integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 11, p. 1667-1674, Nov 1993.

SCHWARZ, ; FRASER, C. S.; GUSTAFSON,. Aerotriangulation without ground control. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, 1984. 237-250.

SENTHILNATH, J. et al. Application of UAV imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods. **Computers and Electronics in Agriculture**, p. 8-24, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.027>.

SIEBERTH , T.; WACKROW , R.; CHANDLER, J. H. UAV Image Blur - Its Influence and Ways to Correct it. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Toronto, XL-1/W4, 2015. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-33-2015.

SIEBERTH, T.; WACKROW, R.; CHANDLER, J. H. Automatic detection of blurred images in UAV image sets. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2016. 1-16.

SKALOUD, J.; CRAMER, M.; SCHWARZ, K. P. Exterior Orientation by Direct Measurement of Camera Position and Attitude. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vienna, Vol. XXXI, 1996.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the World from Internet Photo Collections. **International Journal of Computer Vision**, 11 December 2008. 189-210. DOI 10.1007/s11263-007-0107-3.

SOPCHAKI, C. H. **INFLUÊNCIA DO N AMOSTRAL E DAS CARACTERÍSTICAS DO RELEVO NA QUALIDADE DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Curitiba, p. 165. 2016.

SOPCHAKI, C. H. et al. VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DE ORTOMOSAICOS PRODUZIDOS A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA SEM O USO DE PONTOS DE APOIO. **RAEGA Espaço Geográfico em Análise**, p. 200-2014, 2018.

SOUZA, G. D. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONFIGURAÇÕES DOS PONTOS DE APOIO E DO VOO NA ACURÁCIA DE ORTOFOTOMOSAICOS ELABORADOS APARTIR DE DADOS DE VANT**. PORTO ALEGRE. 2018.

STACHNISS, C. Cyrill Stachniss. **Photogrammetry II - 10 - SIFT Features and RANSAC (2015/16)**, 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=oT9c_LIFBqs>. Acesso em: 20 Agosto 2018.

TACHIBANAYA, T. Description of Exif file format, p. 15, 2001. Disponível em: <<http://aboveallohio.com/vcbackup/HTMLbum5/backup/2012-10-15/Canon%20Exif%20file%20format.pdf>>. Acesso em: Setembro 2018.

TAHAR, K. N. AN EVALUATION ON DIFFERENT NUMBER OF GROUND CONTROL POINTS IN UNMANNED AERIAL VEHICLE PHOTOGRAMMETRIC BLOCK. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Istanbul - Turkey, v. Volume XL-2/W2, November 2013.

TAHAR, K. N. MULTI ROTOR UAV AT DIFFERENT ALTITUDES FOR SLOPE MAPPING STUDIES. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Toronto, Volume XL-1/W4, 2015.

TEO, T.-A.; ZHAN, K.-Z. INTEGRATION OF IMAGE-DERIVED AND POS-DERIVED FEATURES FOR IMAGE BLUR DETECTION. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Julho 2016.

TESIC, J. Metadata practices for consumer photos. **IEEE MultiMedia**, v. vol. 12, n. nº 3, p. 86-92, July-Sep 2005. ISSN doi: 10.1109/MMUL.2005.50.

THODE, H. C. **Testing for normality**. NEW YORK : MARCEL DEKKER, INC., 2002. ISBN ISBN: 0-8247-9613-6.

TRIGGS, B. et al. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis. **Vision Algorithms: Theory and Practice.IWVA 1999. Lecture Notes in Computer Science**, Berlin, v. 1883, 2000. https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21.

VEGA, F. A.; RAMÍREZ, F. C.; CARRICONDO, P. M. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement**, p. 221-227, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>.

WESTOBY, M. et al. Structure-from-Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

WIERZBICKI, D.; KEDZIERSKI, M.; FRYSKOWSKA, A. ASSESMENT OF THE INFLUENCE OF UAV IMAGE QUALITY ON THE ORTHOPHOTO PRODUCTION. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Toronto, Canadá, XL-1/W4, 2015. 1.

WOLF, P.; DEWITT, B. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. 3rd. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Science, 2000. 624 p.

WROBE, B. P. THE EVOLUTION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY FROM ANALYTICAL PHOTOGRAMMETRY. **The Photogrammetric Record**, p. 765-776, 1991. doi:10.1111/j.1477-9730.1991.tb00738.x .

XIE, L. et al. An asymmetric re-weighting method for the precision combined bundle adjustment of aerial oblique images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2016. 92-107.

ZANETTI, J. **INFLUÊNCIA DO NÚMERO E DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE EM ORTOFOTOS GERADAS A PARTIR DE UM LEVANTAMENTO POR VANT**. VIÇOSA. 2017.

ZITOVA, B.; FLUSSER, J. Image registration methods: a survey. **Image and Vision Computing**, 2003. 977-1000. doi:10.1016/S0262-8856(03)00137-9.