

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARLO ANTONIO RIBEIRO MARTINS

ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS OBTIDAS DE  
AEROLEVANTAMENTOS VANT E LIDAR.

CURITIBA

2021

MARLO ANTONIO RIBEIRO MARTINS

ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS OBTIDAS DE  
AEROLEVANTAMENTOS VANT E LIDAR.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, no 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

2021

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

M396e Martins, Marlo Antonio Ribeiro  
Estudo da integração de nuvens de pontos obtidas de aerolevantamentos VANT e LiDAR  
[recurso eletrônico] / Marlo Antonio Ribeiro Martins. – Curitiba, 2021.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-  
Graduação em Ciências Geodésicas, 2021.

Orientador: Edson A. Mitishita.

1. Fotogrametria. 2. Fotogrametria aérea. 3. Imagens digitais. I. Universidade Federal do Paraná.  
II. Mitishita, Edson A. III. Título.

CDD: 526.982

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
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 **MARLO ANTONIO RIBEIRO MARTINS** intitulada: **ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS OBTIDAS DE AEROLEVANTAMENTOS VANT E LIDAR**, sob orientação do Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA, que após terem inquirido o aluno e realizada 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, 30 de Julho de 2021.

Assinatura Eletrônica

30/07/2021 19:36:16.0

EDSON APARECIDO MITISHITA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/09/2021 17:48:30.0

ALVARO MURIEL LIMA MACHADO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/08/2021 13:32:03.0

HIDEO ARAKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

31/07/2021 09:40:05.0

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE  
MESQUITA FILHO/PR.PRUDENT)

Dedico esta obra a quem sempre me deu amor, incentivo e educação,

a minha amada mãe, **Dailza Damas**,

que talvez por nunca ter tido oportunidade de frequentar uma universidade, insistia orgulhosamente em me chamar de doutor, desde que me graduei no curso de engenharia e agora chegou o momento em que poderá me chamar de doutor, entretanto a vida roubou a estrela mais preciosa da minha vida, mas ela jamais deixará de brilhar no meu coração e nele vai poder me chamar de doutor.

## AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar seus agradecimentos aos professores, aos colaboradores e amigos abaixo relacionados:

- Ao meu Amigo e Querido Pai, Marco Antonio Cardoso Martins, que ainda recordo o seu sorriso, as nossas conversas, falar que a vida é boa e merece ser vivida. Por vezes, ainda sinto a gente tomando nossa cerveja e vendo o jogo do Grêmio. Não quero acreditar que você se foi, mas você sempre será recordado com muito carinho;
  - Ao Amigo, Orientador e Professor Dr. Edson A. Mitishita, do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, que acreditou no potencial da pesquisa, obrigado pela confiança;
  - Ao Amigo e Professor Dr. Pedro Faggion, do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, que apoiou a pesquisa, obrigado pelo apoio;
  - Aos meus Primos Bruno Damas e Nathan Damas, que me apoiaram dividindo os momentos de problemas e soluções, obrigado pelos conselhos pessoais;
  - Aos Amigos Henrique Scremin, Leandro Coradim, William Lobato, Alexander Rodrigues e Guilherme Borges, que colaboram com o meu crescimento profissional e pessoal;
  - Aos Amigos do IPPUC, Artur Furtado, Alessandro Dias, Alexandre Kuchenny, Gilberto Costa, Luana Sloboda e Oscar Schmeiske que colaboram com o meu crescimento profissional, pelo apoio e suporte técnico;
  - Ao IPPUC, que viabilizou a pesquisa disponibilizando os dados do Sistema Laser, as imagens digitais aéreas e as ferramentas para o desenvolvimento da pesquisa;
  - Aos participantes da banca examinadora por aceitarem o convite e pelas sugestões recomendadas, objetivando engrandecer o trabalho e torná-lo de qualidade.

*“Que nossos esforços desafiem as impossibilidades, pois as grandes proezas da história foram conquistadas daquilo que parecia impossível.”*  
(Charlie Chaplin)

*“A pessoa que para de sonhar, morre. Temos que sonhar sempre.”*  
(Dailza Damas)

*“A felicidade só existe quando compartilhada.”*  
(Christopher Johnson McCandless)

## RESUMO

As características dos dados pontuais do “*Light Detection and Ranging*” (LiDAR), e aqueles, obtidos com imagens, têm sido reconhecidas como sendo complementares no campo das aplicações fotogramétricas, e as pesquisas para aprimorar a sua utilização de forma integrada se intensificou nos últimos anos. O objetivo desta pesquisa é integrar nuvens de pontos LiDAR, ou seja, “*Point Cloud LiDAR*” (PCL), com nuvens de pontos obtidas por Fotogrametria utilizando a técnica “*Structure from Motion*” (SfM), ou seja, “*Point Cloud Data*” (PCD). Esta integração visa minimizar as falhas de oclusão, melhorar a definição de bordas das edificações, densificação da nuvem de pontos e redução dos pontos espúrios, desta maneira obtendo nuvens de pontos com melhores qualidade geométricas para a reconstrução tridimensional. Foram escolhidas duas áreas de estudo distintas: a primeira foi utilizada para a obtenção dos pontos de controle em nuvens LiDAR; e a segunda foi utilizada para se colocar em prática a metodologia da integração das nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica. Os resultados obtidos nos experimentos mostraram que para o método de determinação dos pontos de controle os resultados apresentaram valores satisfatórios, permitindo enquadrá-los na escala de 1/2.000 ou menores para a Classe A do PEC-PCD. Para o método de integração das nuvens de pontos os resultados apresentaram melhorias significativas na nuvem integrada, como redução das falhas de oclusão, melhorarias na definição de bordas das edificações e uma grande densificação da nuvem integrada.

**Palavras-chaves:** Nuvem de Pontos, Pontos de Controle, LiDAR, Fotogrametria e Integração.



## ABSTRACT

The characteristics of point Light Detection and Ranging (LiDAR) data and those of imagery have been recognized as complementary in photogrammetric applications, and research to improve their integrated use has intensified in recent years. The goal of this research is to integrate LiDAR point clouds, i.e. Point Cloud LiDAR (PCL), with point clouds obtained by photogrammetry using the Structure from Motion (SfM) technique, i.e. Point Cloud Data (PCD). This integration aims to minimize occlusion, improve the definition of building edges, densify the point cloud, and reduce spurious points, thus obtaining point clouds with better geometric conditions for three-dimensional reconstruction. Two distinct study areas were chosen: the first was used to obtain control points in LiDAR clouds; and the second was used to apply the methodology of LiDAR and photogrammetric point cloud integration. The results obtained in the experiments showed that for the method of determining the control points, the values of the results were satisfactory, allowing them to fit into the 1/2.000 scale or smaller for Class A of the PEC-PCD. For the point cloud integration method, the results showed significant improvements in the integrated cloud, such as reduced occlusion gaps, improved building edge definition, and a large densification of the integrated cloud.

**Keywords:** Point Cloud, Control Points, LiDAR, Photogrammetry and Integration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Falhas na Nuvem de Pontos LIDAR .....	22
Figura 2 – Componentes Básicos do Sistema LiDAR.....	30
Figura 3 – Modelos de Espelho de Varredura LASER.....	32
Figura 4 – Tipos de Varredura LASER.....	33
Figura 5 – Largura da Faixa de Recobrimento.....	34
Figura 6 – Múltiplos Retornos do Pulso Emitido .....	35
Figura 7 – Representação do Ponto <b>X</b> em Coordenadas Homogêneas .....	47
Figura 8 – O Modelo Pinhole.....	48
Figura 9 – Sistemas de Coordenadas da Imagem ( $x, y$ ) e da Câmera ( $x_{cam}, y_{cam}$ ) .....	49
Figura 10 – Transformação entre os Sistemas de Coordenadas do Espaço Objeto ( $O, X, Y, Z$ ) e do Espaço Imagem ( $C, X_{cam}, Y_{cam}, Z_{cam}$ ).....	50
Figura 11 – Fluxograma do SFM-MVS.....	53
Figura 12 – Espaço Escala .....	56
Figura 13 – Detecção de Máximo e Mínimo no Espaço-Escala.....	56
Figura 14 – Magnitude e Orientação dos Gradientes .....	59
Figura 15 – Descritor dos Pontos Chaves.....	60
Figura 16 – Caso de uso típico para a Geometria Epíolar .....	64
Figura 17 – Elementos Principais da Geometria Epíolar .....	65
Figura 18 – Estação Total TOPCON GM-50 Series.....	69
Figura 19 – Topcon Hiper SR GNSS PP.....	70
Figura 20 – Limitação da Frequência de Varredura pela Altura de voo .....	71
Figura 21 – DJI Phantom 4 Pro e Sensor Óptico .....	72
Figura 22 – Distribuição das Imagens.....	72
Figura 23 – Ortofoto com Resolução Espacial de 2,6 CM .....	73
Figura 24 – Modelo Digital de Elevação com 93 PTOS/M <sup>2</sup> .....	73
Figura 25 – Mapa de Localização das Áreas de Estudo.....	74
Figura 26 – Localização dos Telhados de Estudo .....	75
Figura 27 – Área de Estudo levantada por VANT .....	76
Figura 28 – Método para Obtenção das Entidades Pontuais.....	77
Figura 29 – Telhado de 4 Águas e Entidades Pontuais .....	78
Figura 30 – Quinas obtidas pela Interseção de Retas .....	78

Figura 31 – Seleção dos Pontos para os Segmentos de Retas.....	79
Figura 32 – Obtenção das Retas e Entidades Pontuais B, C, D e E. ....	81
Figura 33 – Obtenção das Retas e Entidades Pontuais A e F.....	81
Figura 34 – Croqui de Levantamento das Entidades Pontuais por Irradiação.....	82
Figura 35 – Levantamento Topográfico Convencional por Irradiação. ....	83
Figura 36 – Leitura das Entidades Pontuais na Borda e Cumeeira .....	83
Figura 37 – Etapas da Metodologia de Pesquisa aplicada no Teste .....	86
Figura 38 – Obtenção das Entidades Pontuais.....	88
Figura 39 – Distribuição dos Pontos de Controle.....	88
Figura 40 – Esquema das Diferenças da PCD em relação à PCL.....	90
Figura 41 – Identificação dos Pontos de Integração .....	90
Figura 42 – Filtragem dos Pontos de Integração .....	91
Figura 43 – Nuvem de Pontos de Integração PCL + PCD .....	91
Figura 44 – Pontos de Interação Removidos .....	93
Figura 45 – Diferença Altimétrica dos Pontos do Mapa de Correção .....	95
Figura 46 – Programa de Interpolação Quadrática.....	96
Figura 47 – Segmentos de Retas em Telhados de 4 Águas.....	98
Figura 48 – Discrepâncias na Componente <b>E</b> das Quinas e Cumeeiras .....	103
Figura 49 – Discrepâncias na Componente <b>N</b> das Quinas e Cumeeiras.....	103
Figura 50 – Discrepâncias na Componente <b>H</b> das Quinas e Cumeeiras.....	103
Figura 51 – Resíduos da Autocalibração para as Imagens Digitais.....	109
Figura 52 – Distribuição dos Pontos de Controle com os Resíduos .....	110
Figura 53 – Diferenças médias encontradas ao longo da PCD em relação à PCL ..	111
Figura 54 – Gráfico da Distribuição de Frequência das Discrepâncias .....	114
Figura 55 – Gráfico da Distribuição de Frequência das Discrepâncias Refinadas ..	116
Figura 56 – Mapa de Correção da PCD para PCL.....	117
Figura 57 – Nuvens Integradas após aplicado o Mapa de Correção.....	118
Figura 58 – Exemplo 01 da Melhoria na Definição de Bordas .....	118
Figura 59 – Exemplo 02 da Melhoria na Definição de Bordas .....	119
Figura 60 – Exemplo 03 da Melhoria na Definição de Bordas .....	119
Figura 61 – Exemplo 01 da Minimização das Falhas de Oclusão .....	119
Figura 62 – Exemplo 02 da Minimização das Falhas de Oclusão .....	120
Figura 63 – Exemplo 01 da Densificação da Nuvem de Integração .....	120
Figura 64 – Exemplo 02 da Densificação da Nuvem de Integração .....	121

Figura 65 – Exemplo 01 da Localização de Pontos Espúrios.....	121
Figura 66 – Exemplo 02 da Localização de Pontos Espúrios.....	121
Figura 67 – Melhor Definição da Vegetação.....	122
Figura 68 – Identificação de Variação Volumétrica.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos sobre a integração de nuvens de pontos LST e SfM .....	23
Tabela 2 – Normas vigentes quanto à operação de VANTs .....	40
Tabela 3 – Tabela de resumo das regulamentações da ANAC .....	43
Tabela 4 – Especificações TOPCON GM-50 Series .....	68
Tabela 5 – Especificações Topcon HIPER SR .....	69
Tabela 6 – Especificações ALTM PEGASUS HD500 .....	70
Tabela 7 – Valores do PEC-PCD para a Classe A .....	85
Tabela 8 – Amostra de pontos de integração localizados na PCD e na PCL .....	92
Tabela 9 – Pontos em duplicidade na nuvem de pontos de integração.....	92
Tabela 10 – Exemplo da Nuvem de Integração .....	95
Tabela 11 – Exemplo dos Pontos Utilizados para o Mapa de Correção.....	95
Tabela 12 – Coeficientes Calculados para as Bordas do Telhado Número 8.....	99
Tabela 13 – Coordenadas das Entidades Pontuais das Quinas das Bordas.....	100
Tabela 14 – Coeficientes Calculados para as Cumeeiras do Telhado Número 8....	100
Tabela 15 – Coordenadas das entidades pontuais na Cumeeira .....	101
Tabela 16 – Coordenadas das Entidades Pontuais das Quinas e Cumeeiras dos 28 Telhados .....	101
Tabela 17 – Coordenadas das Entidades Pontuais das Quinas e Cumeeiras dos 28 Telhados .....	102
Tabela 18 – Estatística das Discrepâncias das Entidades Pontuais de Quinas e Cumeeiras.....	104
Tabela 19 – Análise de Tendência nas Quinas do Telhado.....	105
Tabela 20 – Análise, Classe A, para a Precisão das Quinas dos Telhados .....	106
Tabela 21 – Análise de Tendência nas Cumeeira dos Telhados.....	106
Tabela 22 – Análise, Classe A, para a Precisão das Cumeeiras dos Telhados .....	107
Tabela 23 – Entidades Pontuais obtidas na PCL.....	108
Tabela 24 – POIs estimados na autocalibração.....	109
Tabela 25 – REMQ Total dos Pontos de Controle .....	109
Tabela 26 – REMQ dos Pontos de Controle .....	110
Tabela 27 – Amostra dos Pontos de Integração .....	112
Tabela 28 – Exemplo da duplicidade de pontos e a classificação da PCD .....	112
Tabela 29 – Distribuição de Frequência das Discrepâncias. ....	114

Tabela 30 – Medidas de Posição e Dispersão das discrepâncias .....	115
Tabela 31 – Distribuição de Frequência das Discrepâncias Refinada .....	115
Tabela 32 – Medidas refinadas de Posição e Dispersão das discrepâncias .....	116
Tabela 33 – Amostra da Diferença Altimétrica entre a Nuvem PCD e a PCL.....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMVS	Clustering for Multi-View Stereo
DNGSS	Differential Global Navigation Satellite System
DoG	Diferenças de Gaussianas
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground Sample Distance
ICAO	Organização Internacional de Aviação Civil
IMU	Unidade de Medida Inercial
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
LiDAR	Light Detection and Ranging
LST	Laser Scanner Terrestre
MVS	Multi-View Stereo
PCD	Point Cloud Data
PCL	Point Cloud Lidar
PMVS2	Patch Multi-View Stereo
RANSAC	Random Sample Consensus
ROA	Remotely Operated Aircraft
RPA	Aeronaves Remotamente Pilotadas
RPV	Remote Piloted Vehicle
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale Invariant Features Transform
SVD	Decomposição em Valores Singulares
SVLA	Sistema de Varredura Laser Aerotransportado
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USAF	Força Aérea dos Estados Unidos
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	19
1.2 ESTADO DA ARTE.....	22
1.3 HIPÓTESE .....	26
1.4 OBJETIVOS .....	26
1.4.1 Objetivo Geral.....	26
1.4.2 Objetivos Específicos.....	26
1.5 JUSTIFICATIVA.....	27
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	28
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	30
2.1 SISTEMA DE VARREDURA LASER AEROTRANSPORTADO – SVLA .....	30
2.2 VEÍCULOS AEROTRANSPORTADOS NÃO TRIPULADOS – VANT .....	36
2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE VANT .....	38
2.4 STRUCTURE FROM MOTION (SfM) .....	44
2.4.1 Evolução e Breve Histórico do SfM .....	44
2.4.2 A Câmera e o Modelo Pinhole .....	46
2.4.3 Decomposição em Valores Singulares .....	51
2.4.4 Algoritmo SfM .....	52
2.5 GEOMETRIA EPIPOLAR .....	63
3. MATERIAIS.....	68
3.1 ESTAÇÃO TOTAL E RECEPTOR GNSS.....	68
3.2 SISTEMA LASER SCANNER PEGASUS HD500 .....	70
3.3 VEÍCULO ÁEREO NÃO TRIPULADO .....	71
4. ÁREA DE ESTUDO .....	74
4.1 PRIMEIRA ÁREA DE ESTUDO.....	75
4.2 SEGUNDA ÁREA DE ESTUDO .....	75



5. MÉTODOS.....	77
5.1 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE .....	77
5.1.1 Extração de Pontos para a Determinação dos Segmentos de Retas .....	77
5.1.2 Obtenção das Entidades Pontuais via Regressão com Interseção de Reta .....	80
5.1.3 Obtenção das entidades pontuais via Levantamento Topográfico.....	82
5.1.4 Avaliação das entidades pontuais pelo teste tendência e precisão .....	83
5.2 METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO DAS NUVENS LiDAR e VANT .....	86
5.2.1 Aerolevantamento LiDAR e VANT.....	87
5.2.2 Processamento Fotogramétrico.....	87
5.2.3 Comparação das diferenças entre PCD em relação à PCL .....	89
5.2.4 Busca dos pontos de integração .....	90
5.2.5 Remoção dos pontos de integração em duplicidade.....	92
5.2.6 Avaliação por distribuição de frequência dos pontos de integração.....	93
5.2.7 Geração do mapa de correção entre a PCD e a PCL .....	94
5.2.8 Aplicação do mapa de correção na nuvem PCD .....	95
5.2.9 Integração das nuvens de pontos PCD e PCL .....	97
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	98
6.1 RESULTADOS PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE .....	98
6.1.1 Resultados da Obtenção das Entidades Pontuais por Regressão e Intersecção .....	98
6.1.2 Resultados da Obtenção das Entidades Pontuais por Topografia .....	102
6.1.3 Avaliação das Entidades pontuais da Quina versus a Cumeeira do Telhado Comparados pela Topografia .....	102
6.1.4 Análise de Tendência e PEC para entidades pontuais de Quinas .....	105
6.1.5 Análise de Tendência e PEC para entidades pontuais de Cumeeiras .....	106
6.2 RESULTADOS PARA INTEGRAÇÃO DAS NUVENS LiDAR e VANT.....	108

6.2.1 Resultados do Processamento Fotogramétrico .....	108
6.2.2 Análise das diferenças encontradas entre a PCD em relação à PCL .....	110
6.2.3 Resultado da Localização dos Pontos de Integração .....	111
6.2.4 Resultados da Remoção dos Pontos de Integração em Duplicidade .....	112
6.2.5 Análise Estatística dos Pontos de Integração .....	113
6.2.6 Correção Altimétrica por Interpolação Quadrática .....	116
6.2.7 Integração das Nuvens de Pontos .....	118
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	123
REFERÊNCIAS .....	127

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Topografia em seus primórdios era associada ao uso de desenhos realizados manualmente para representar a superfície física terrestre, o que tornava o mapeamento das superfícies dos terrenos razoavelmente trabalhoso (ANDRADE, 2003). Com o advento da fotografia, em meados do século XIX, permitiu uma evolução nesse campo, tornando os processos mais rápidos e menos custosos.

As invenções do início do século XX são de suma importância para a difusão da Fotogrametria, como o avião, o restituidor fotogramétrico analógico e o aperfeiçoamento de lentes para câmeras aéreas. No fim da década de 1950 e início da década de 1960 foram desenvolvidos os princípios da Fotogrametria Analítica, bem como, o nascimento do primeiro restituidor analítico. Além dos avanços tecnológicos que continuaram sendo feitos na qualidade geométrica das objetivas e na parte eletrônica das câmeras, bem como, os avanços computacionais que levaram a era da Fotogrametria Digital (MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001). A migração da Fotogrametria para o meio digital alterou significativamente a metodologia utilizada nos levantamentos fotogramétricos, bem como a forma de extração e processamento das informações Cartográficas, permitindo a automatização de diversos processos no fluxo de trabalho da Fotogrametria.

Toda a evolução ocorrida no século passado, nas plataformas, nos sensores e nas estações de trabalho não foram suficientes para aumentar o uso da Fotogrametria em pequenas ou médias empresas de engenharias, ficando restrita às grandes empresas que conseguiam arcar com o ônus de todos os recursos técnicos e humanos para se realizar a extração de informações Cartográficas com o uso da Aerofotogrametria.

Como alternativa, para minimizar os custos operacionais da Fotogrametria, foram utilizadas inúmeras opções de plataformas aéreas, para carregar a câmeras, desde pipas até aeromodelos. Entretanto, estas plataformas apresentavam limitações na realização do recobrimento, nas condições geométricas das câmeras analógicas ou digitais, no desempenho na tomada das imagens (tempo de aquisição e memória de armazenamento), na metodologia e na capacidade de processamento dificultaram na aplicação comercial dessa tecnologia, limitando somente a estudos, principalmente

acadêmicos. Assim, como essas limitações não era possível obter resultados que superassem a precisão centimétrica (SMITH; CHANDLER; ROSE, 2009).

Conjuntamente com a evolução da Fotogrametria Analítica para a Digital, outros campos da ciência evoluíram, colaborando com os procedimentos de medições utilizando imagens. No campo da Visão Computacional algoritmos foram desenvolvidos para facilitar e otimizar o processamento digital de imagens. Na interseção dessas duas áreas do conhecimento (Fotogrametria e Visão Computacional), foi criada a técnica denominada *Structure From Motion* (SfM) por Ullman (1979). De acordo com Westoby *et al.* (2012), essa técnica foi desenvolvida para estimar a estrutura tridimensional de objetos a partir de imagens, sem que seja necessário o conhecimento à priori da posição ou orientação do sensor no momento da tomada das fotografias, nem o conhecimento das coordenadas tridimensionais dos pontos na superfície física.

Em meados da década passada Snavely, Seitz e Szeliski (2006, 2008), pesquisaram a utilização do SfM para a modelagem de patrimônios históricos ao redor do globo, como o Monte Rushmore, o Coliseu e a Grande Muralha da China. As imagens utilizadas foram tomadas em diversos sensores distintos, com diferentes pontos de vista e condições de iluminação díspares. O intuito dessas pesquisas era somente o de reconstruir feições para o turismo virtual, portanto questões considerando a acurácia posicional não foram consideradas.

A utilização dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), também chamadas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), como plataforma aérea de baixo custo, juntamente com o algoritmo SfM, para a realização de levantamentos fotogramétricos tem se destacado ultimamente tanto no mercado de engenharia, como na academia (QU; HUANG; ZHANG, 2018; VAN BLYENBURGH, 2018). Ainda assim, pesquisas utilizando outras plataformas aéreas para obtenção de medidas foram conduzidas, por exemplo, utilizando pipas, balões de hélio e dirigíveis (BRYSON *et al.*, 2013; JOHNSON *et al.*, 2014; VERICAT *et al.*, 2009). Segundo Luhmann *et al.* (2013), desde 2010, os algoritmos da Visão Computacional, como o SfM, tornaram-se mais populares e foram capazes, de forma automática, extrair uma nuvem de pontos tridimensionais, empregando um conjunto de imagens, para a modelagem 3D de objetos.

Algumas das vantagens que consolidaram os VANTs, como plataformas de baixo custo, para a realização de levantamentos fotogramétricos de pequenas áreas,

foi possibilidade de serem pilotadas remotamente, com programação de rotas e a portabilidade de transporte das próprias plataformas (LESLAR, 2015). Contudo, ao se comparar com aeronaves tripuladas, para fins de levantamento fotogramétricos, os VANTs têm suas limitações principalmente à autonomia de voo e sua estabilidade. A autonomia de voo desse tipo de plataforma, de maneira geral, resume-se a minutos, o que é uma desvantagem para o mapeamento de grandes áreas quando comparado a aeronaves tripuladas (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016). Em relação a sua estabilidade, o fato de serem plataformas portáteis faz com seu tamanho e peso sejam muito menores se comparadas as aeronaves tradicionais, o que causa um impacto mais relevante na sua estabilidade (VAN BLYENBURGH, 2018).

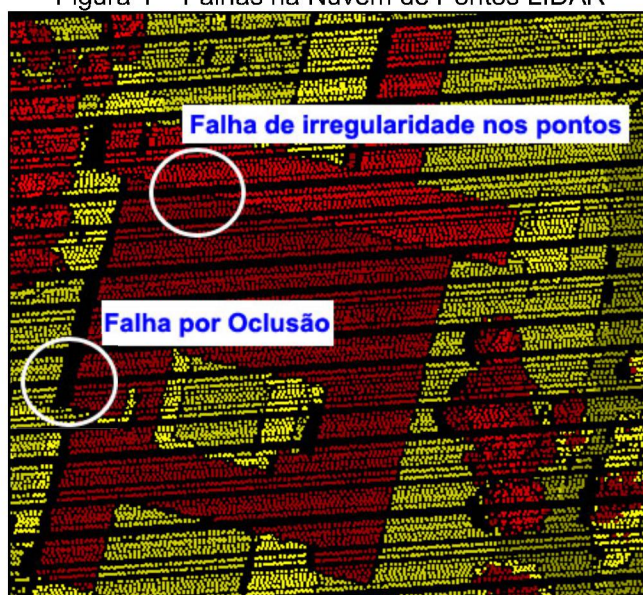
A tecnologia do LiDAR foi desenvolvida na década de 1960, porém tornou-se mais difundida a partir do começo do século XXI (SZABÓ *et al.*, 2016). Por muitos anos as pessoas que trabalham com metodologias de extração de informações cartográficas, envolvendo dados LiDAR encontraram oclusões, sombras e falhas por irregularidades nas nuvens de pontos geradas, o que era um obstáculo para reproduzir os modelos completos de superfícies (LESLAR, 2015). A vantagem da utilização dos VANTs para o recobrimento dessas deficiências se dá pelo fato dessas plataformas serem relativamente baratas e fáceis de operar (LESLAR, 2015). A ideia de usar VANTs para a Fotogrametria área não é algo recente, contudo, com a revolução da tecnologia que surgiu nas últimas décadas, o uso dessas plataformas tornaram-se mais práticas e corriqueiras (GOINAROV, 1997; LESLAR, 2001).

A reconstrução automática dos cenários urbanos tridimensionais tornou-se uma importante parte da pesquisa fotogramétrica ao final do século passado (GRUEN ET AL., 1995, 1997). Os artigos publicados, nesta temática, além de investigarem diversos métodos de reconstrução apresentam uma série de abordagens aos serviços comerciais e softwares (BRENNER, 2005). De acordo com a EuroSDR, conjuntos 3D de modelos de edificações são comumente coletados utilizando medições fotogramétricas oriundas de estéreo imageamento aéreo ou de técnicas LiDAR (SHAN; TOTH, 2018).

Habib, Zhal e Kim (2010) concluíram que: “a geração de modelos digitais de estruturas complexas ainda permanece um desafio”. A dificuldade da definição geométrica de objetos na extração autônoma com imagens áreas foi um dos fatores que motivou o aumento no uso de nuvem de pontos 3D geradas a partir de um Laser, como uma fonte alternativa de dados.

Considerando esse contexto e o fato de poucos estudos abordando a integração de nuvens de pontos providas de plataformas áreas, esta pesquisa propõe a integração de nuvens de pontos de fontes distintas para implementar a reconstrução tridimensional das edificações. Para isto serão utilizadas nuvens de pontos, provenientes do levantamento LiDAR e do levantamento fotogramétrico com a metodologia “*Structure from Motion*” (SfM). Essa pesquisa busca avaliar a integração nas seguintes questões: densificação de nuvem de pontos, falhas de pontos por oclusões e principalmente definição das bordas das edificações (Figura 1).

Figura 1 – Falhas na Nuvem de Pontos LIDAR



FONTE: O autor (2021)

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Nas duas últimas décadas diversos estudos foram realizados para otimizar e melhorar a extração do mapeamento de feições na superfície física terrestre, pesquisas de metodologias para integrar dados de levantamentos fotogramétricos LiDAR e de imagens têm sido constantemente realizadas nesse campo do conhecimento. De acordo com Shan e Toth (2018), a constante evolução tecnológica está possibilitando cada vez mais a coleta de geoinformações oriundas de múltiplos sensores por um custo mais acessível.

No campo da Geodésica e Cartográfica, considerando a extração de informações métricas e a captura de realidade para distintas aplicações, utilizando o Laser Scanner Terrestre, o levantamento fotogramétrico com VANT e o

processamento fotogramétrico com a técnica do SfM estão presente em diversos estudos, que investigam a união destas nuvens de pontos, tanto obtida pelo Laser Scanner Terrestre (LST) como pela técnica do SfM. Na Tabela 1 são mostrados alguns destes estudos de integração.

Tabela 1 – Estudos sobre a integração de nuvens de pontos LST e SfM

Ano	Título	Autores
2014	Tridimensional reconstruction applied to cultural heritage with the use of camera-equipped UAV and terrestrial laser scanner	Xu et al.
2015	UAV-based acquisition of 3D point cloud - a comparison of a low-cost laser scanner and SfM-tools	Mader et al.
2016	Modelling and assessment of coastal changes at Golspie Beach, Scotland, UK; an integration of terrestrial laser scanning and digital photogrammetric techniques, for an effective coastal land use management	Brown, Igwe e Adekunle
2017	Smart Merging Method for Hybrid Point Cloud Data Using UAV and LiDAR in Earthwork Construction	Kwon et al.
2018	Comparison and utilization of point cloud generated from photogram. and laser scanner 3D world model for smart heavy equipment planning	Moon et al.
2019	Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry in Mapping Alpine Terrain	Šašak et al.

Fonte: O autor (2021)

XU *et al.* (2014) propuseram a utilização de um sistema de veículo aéreo não tripulado (VANT) equipado com uma câmera DSLR Canon EOS 5D Mark II, com resolução de 8.1 Megapixels com uma lente de 18–55 mm e a utilização de um Laser Scanner Terrestre em um projeto integrado para capturar nuvens de pontos 3D e facilitar a aquisição de informações completas sobre um objeto de interesse, o monumento do local da Conferência de Gutian<sup>1</sup>, no condado de Shanghang, na cidade de Longyan no sudeste da província de Fujian, na China. A metodologia de registro de ambas as nuvens de pontos foi feita de uma maneira iterativa. Os resultados mostraram uma nuvem de pontos final com uma cobertura completa do monumento

<sup>1</sup> O Congresso de Gutian ou Conferência de Gutian foi a 9ª reunião do 4º Exército Vermelho e a primeira após a Revolta de Nanchang e a subsequente fuga das tropas rebeldes para o sul.

histórico com detalhes profundos, e uma acurácia do modelo, somente com 12% de erro. De acordo com os autores, os resultados demonstraram que as duas plataformas utilizadas se complementam em termos de cobertura, resolução de detecção e precisão do modelo para registros tridimensionais.

Mader *et al.* (2015) fizeram um estudo para o desenvolvimento de um sistema para a exploração de monitoramento de áreas ou construções desconhecidas. Dentro dessa ideia dos autores, e para se chegar a tal objetivo, foram realizados experimentos utilizando Laser Scanner e plataforma VANT para a obtenção de nuvem de pontos. Foi realizado o levantamento de uma ponte, o qual resultou nas nuvens de pontos 3D utilizada para os experimentos. Segundo os autores, os resultados obtidos com o erro médio quadrático de 32 centímetros são suficientes para dar uma visão geral do objeto mensurado e pode ser usado para planejamentos de rotas e desvio de obstáculos. A comparação com a nuvem de pontos do laser terrestre, utilizado como verdade de campo, mostrou que uma alta qualidade geométrica na ordem dos 5 centímetros. Os autores finalizaram o estudo discutindo os problemas encontrados, bem como, uma análise quantitativa do potencial de precisão encontrada para futuras aplicações.

Brown, Igwe e Adekunle (2016) realizaram um estudo para validar a utilização da integração de dados provenientes de levantamentos Laser Scanner Terrestre e aéreo fotogramétrico com tecnologia SfM para o mapeamento de ambientes costeiros e para o gerenciamento de uso da terra. Os experimentos foram realizados na praia de Golspie<sup>2</sup>, situada em Sutherland, Highlands, Escócia. De acordo com os autores a utilização de ambas as técnicas, bem como a sua integração e comparação, mostraram resultados satisfatórios em regiões da praia de Golspie, que é caracterizada por afloramentos rochosos e rochosos na extremidade norte e apoiada por areias marinhas e cascalhos que foram depositados durante um período de nível do mar relativamente mais alto, cerca de 6.500 anos atrás, como foi caso, já que todos os objetivos do estudo foram cumpridos. Para avaliar o sucesso do projeto proposto, foi necessário um modelo digital de terreno (DTM) de alta resolução da posição atual da praia em 2014.

Kwon *et al.* (2017) propuseram um método para gerar nuvem de pontos 3D usando um método de digitalização híbrido (um laser scanner terrestre e dados

---

<sup>2</sup> A costa de Golspie, é situada em Sutherland, Highland, na Escócia, que fica na costa do Mar do Norte.



oriundo de Fotogrametria VANT). O objetivo do estudo proposto pelos autores foi apresentar um método de digitalização híbrido para a modelagem 3D de terraplenagem em operações de construção. Os autores puderam observar que utilizando o método de escaneamento híbrido proposto no estudo é possível processar com rapidez e precisão o mapeamento 3D de formas atípicas do solo que mudam continuamente de acordo com a situação da construção.

Moon *et al.* (2018) propuseram uma metodologia para a geração e mesclagem de dados de nuvem de pontos híbridas adquiridos de varredura a laser (Laser Scanner Terrestre) e por processamento de imagens baseado em Fotogrametria VANT. Também foi realizada uma comparação entre os conjuntos de dados adquiridos na digitalização a laser e no processamento de imagens, utilizando alguns estudos de caso envolvendo o planejamento de equipamentos pesados para a construção civil e terraplanagem. Finalmente, foi feita uma comparação analítica, em relação ao levantamento por Laser Scanner Terrestre, para verificar a precisão da tecnologia de processamento de imagens baseada em VANT para projetos de terraplanagem. De acordo com os autores, o estudo confirmou a usabilidade de dados fotogramétricos oriundos da Fotogrametria VANT para esse tipo de trabalho.

Šašak *et al.* (2019) apresentaram uma nova abordagem metodológica baseada no uso combinado da varredura de Laser Scanner Terrestre e na Fotogrametria VANT para gerar uma nuvem de pontos de alta resolução e um modelo digital de elevação de um terreno acidentado nos alpes. Essa abordagem foi demonstrada em uma pequena área de estudo na parte superior de um vale descongelado na Montanhas Tatras, Eslováquia. Os resultados mostraram que a complementação da nuvem de pontos geradas pelo Laser Scanner Terrestre, com a nuvem de pontos VANT, suplementaram a cobertura feita pelo primeiro em locais com cobertura insuficientes (locais em que o Laser Scanner Terrestre não conseguiu realizar o mapeamento), além de reduzir as sombras presentes na nuvem de pontos 3D. Os autores afirmaram que a técnica por eles proposta, permite o mapeamento 3D de encostas íngremes e saliências protuberantes presentes em terrenos montanhosos.

Como podemos observar existe extensa pesquisa nas ciências Cartográfica e Geodésicas, envolvendo a aquisição de dados da realidade, utilizando a Fotogrametria VANT ou levantamento fotogramétrico com tecnologia SfM, integrada com dados de levantamento Laser Scanner.

Neste sentido, surge a necessidade de estudos que investiguem a precisão da união de nuvens de pontos provinda de levantamentos de Laser Scanner Aéreo e de nuvens de pontos oriundas de técnicas SfM. Desta forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo teórico e procedimentos práticos para a realização da união de nuvens de pontos de diferentes origens, utilizando um software especialista.

### 1.3 HIPÓTESE

A hipótese considerada para este trabalho é de que se realizada integração entre a nuvem de pontos obtidas por levantamento LiDAR e a nuvem de pontos obtidas pelo processamento fotogramétrico utilizando a técnica SfM, então é possível minimizar as falhas de oclusão, melhor definição de bordas das edificações, densificar a nuvem de pontos e reduzir os pontos espúrios, assim obtendo uma nuvem de pontos final com melhor qualidade geométricas para a reconstrução tridimensional das edificações.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 Objetivo Geral

Integrar a nuvem de pontos LiDAR, "*Point Cloud LiDAR*" (PCL), com a nuvem de pontos provinda do SfM do levantamento VANT, "*Point Cloud Data*" (PCD) visando minimizar as falhas de oclusão, melhor definição de bordas das edificações, densificar a nuvem de pontos e reduzir os pontos espúrios, assim obtendo uma nuvem de pontos com melhor qualidade geométricas para a reconstrução tridimensional das edificações.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar pontos de apoio utilizando a nuvem de pontos PCL;

- b) Realizar o levantamento aerofotogramétrico utilizando uma plataforma VANT para a obtenção da nuvem de pontos PCD a partir do processamento fotogramétrico utilizando a técnica SfM;
- c) Comparar as nuvens PCL e PCD para obtenção das discrepâncias entre as nuvens;
- d) Analisar estatisticamente as nuvens de pontos do PCL e PCD;
- e) Gerar mapa de correção para o ajustamento da nuvem de pontos PCD em relação a PCL;
- f) Ajustar as coordenadas altimétricas na nuvem de pontos PCD.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

As pesquisas e o desenvolvimento de técnicas que buscam a automação de procedimentos, a redução de custos e tempo, atrelado ao aumento da precisão dos resultados e das informações obtidas, são aspectos que têm sido explorados nas últimas duas décadas nas ciências Geodésicas, mais especificamente, nas pesquisas da Fotogrametria utilizando novas tecnologias como os RPAs.

Metodologias de extração autônoma de feições Cartográficas da superfície terrestre empregando imagens de alta resolução espacial e procedimentos fotogramétricos têm sido constantemente estudadas em projetos de pesquisas na Área de Geociências. Essa captura da realidade feita em alta resolução espacial é pesquisada e utilizada para análises em diversas áreas do conhecimento das engenharias, tais como, as propriedades de afloramentos rochosos (LATO *et al.*, 2013), dinâmica de deslizamentos de terra (LUCIEER; JONG; TURNER, 2014), a arqueologia (FIORILLO *et al.*, 2015), a idade relativa de acidentes geográficos (KLAPYTA; KOLECKA, 2015), erosão de solo (NEUGIRG *et al.*, 2015), a biomassa (COOPER *et al.*, 2017), e a modelagem 3D de cidades (BALSA-BARREIRO; FRITSCH, 2018). Nesses estudos os equipamentos e métodos utilizados para a aquisição de dados espaciais e para a geração de nuvem de pontos são o Laser Scanner Terrestre (LST), isto é, LiDAR Terrestre. Outra técnica, a curta distância (*close range photogrammetry*), é a utilização de imagens fotogramétricas com o processamento pela técnica SfM (LATO *et al.*, 2013; CAWOOD *et al.*, 2017; SHAN; TOTH, 2018). A alta resolução espacial, chegando em milímetros para o LST e centímetros para o SfM, e a rapidez na aquisição de dados são fatores que corroboram

a utilização desses métodos para a coleta de dados (JAVERNICK; BRASINGTON; CARUSO, 2014; GALLAY *et al.*, 2015; SRINIVASAN *et al.*, 2015; KOREŇ; MOKROŠ; BUCHA, 2017; AGÜERA-VEGA *et al.*, 2018).

Diversos estudos, na área de Fotogrametria, são frequentemente encontrados na literatura utilizando, comparando e analisando a captura da realidade, a geração e a união de nuvens de pontos com a utilização do LST e do processamento fotogramétrico com a técnica SfM (FLENER *et al.*, 2013; OUÉDRAOGO *et al.*, 2014; NOUWAKPO; WELTZ; MCGWIRE, 2016; WILKINSON *et al.*, 2016). Entretanto há uma escassez nas pesquisas utilizando a integração de nuvem de pontos geradas por Laser Scanner Aerotransportado e SfM, por esse motivo, justifica-se a importância desse estudo tendo o intuito de analisar o resultado obtido da integração no aumento do aspecto geométrico, além de expandir e aprofundar o conhecimento nesse campo de pesquisa.

A motivação para realizar esse trabalho, no melhor do nosso conhecimento e esforço para tal, foi o fato de não terem sido encontradas pesquisas que versam sobre a integração de dados oriundos do LIDAR aerotransportado com dados oriundos de veículos aéreos não tripulados, a partir do momento em que a ideia foi concebida. Um outro ponto que motivou a realização desse trabalho, foi a contribuição que o mesmo traz para outros trabalhos futuros, servindo como uma referência e material de consulta para trabalhos relacionados a integração de nuvem de pontos LiDAR aerotransportado e aquelas oriunda de fotogrametria VANT.

## 1.6 ESTRUTURA DA TESE

Neste primeiro capítulo é abordada a introdução do trabalho, apresentando uma contextualização, trabalhos relacionados, os objetivos desse estudo e sua justificativa e por fim, nesta subseção a estrutura em que ele foi escrito.

No segundo capítulo é apresentando a revisão de literatura utilizada na concepção do estudo. Partindo dos sistemas de varredura laser scanner aerotransportado, passando pelos veículos aéreos não tripulados, por um breve histórico do “*Structure from Motion*” (SfM), pela geometria epipolar e finalizando com um subcapítulo referente a nuvem de pontos.

O terceiro capítulo discute os materiais utilizados para a execução das atividades.

O quarto capítulo apresenta as áreas de estudo selecionadas para a realização dos trabalhos.

O quinto capítulo discute a metodologia proposta para se solucionar os desafios encontrados na execução das atividades.

O sexto capítulo apresenta os resultados e discussões

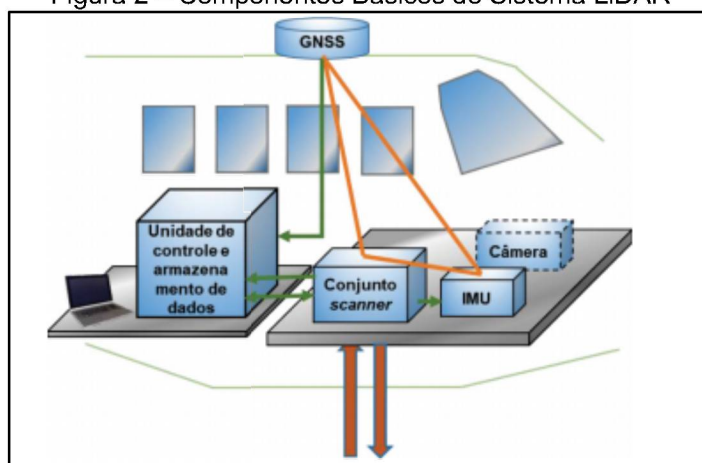
O sétimo e último capítulo apresenta as considerações finais e recomendações de trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SISTEMA DE VARREDURA LASER AEROTRANSPORTADO – SVLA

A tecnologia de varredura a laser, conhecida como LiDAR (Light Detection And Ranging) baseia-se no mapeamento tridimensional da superfície física terrestre por meio do uso de um sensor laser embarcado em uma plataforma aérea. De acordo com Vosselman e Maas (2010), o sistema LiDAR, como um todo, é dividido em dois principais componentes; sendo um o sistema de varredura laser, que mede a distância a um ponto no solo iluminado pelo laser, e outro a integração de sensores GNSS/INS que permite estimar, com exatidão, a posição e orientação do sistema laser.

Figura 2 – Componentes Básicos do Sistema LiDAR



Fonte: Adaptado de Vosselman e Maas (2010).

- a) Conjunto scanner: é composto pelo laser e sistema óptico/mecânico do scanner. O sistema laser montado em um orifício na fuselagem da aeronave, continuamente, envia pulsos de laser sobre o terreno durante o voo. Dependendo da velocidade da aeronave e altura de voo, as tecnologias atuais permitem um escaneamento com densidade de pontos que varia de 0,2 a 50 pontos/m<sup>2</sup>. Conjunto de sensores permitem uma compensação do ângulo de rotação navegação para atenuar os efeitos de falta de sobreposição lateral entre as linhas de voo.
- b) Antena receptora GNSS: é, normalmente, uma antena de dupla frequência com registro de sinais a uma frequência de 2Hz, dependendo

do sistema. A antena é montada na parte externa do topo da aeronave para exposição à constelação de satélites GNSS.

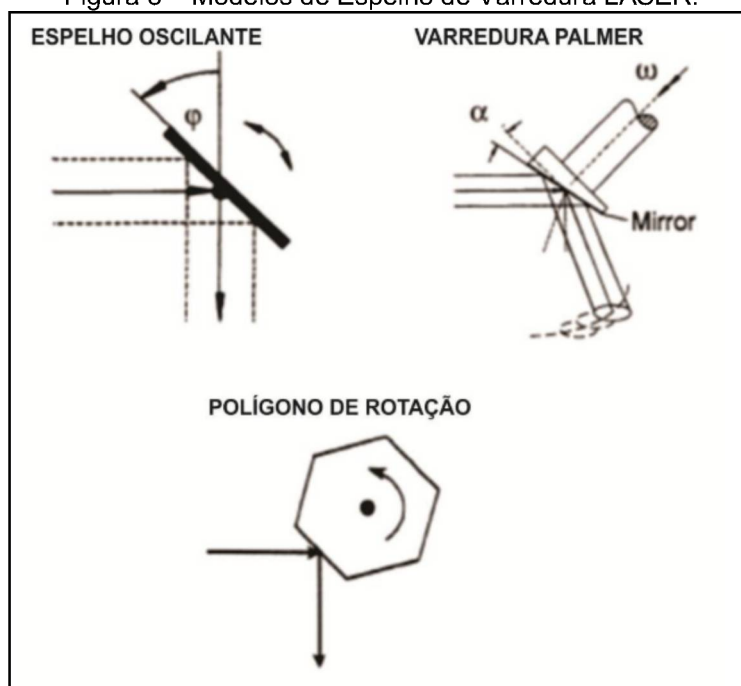
- c) Unidade de medida inercial, também conhecido como “*Inertial Measurement Unit*” (IMU): a IMU ou é fixada diretamente no laser scanner ou próximo dele em uma plataforma estável. Normalmente, a IMU armazena dados de aceleração e taxas de rotação a uma frequência de 200 Hz, dependendo do sistema. Enquanto os dados de aceleração são utilizados como suporte para a interpolação da posição da plataforma oriunda da trajetória do GNSS, as taxas de rotação são usadas para determinar a orientação da plataforma. A combinação de GNSS e IMU permite reconstruir a trajetória do voo com uma exatidão melhor que 10 cm, dependendo do sistema.
- d) Unidade de controle e armazenamento de dados: dispositivo responsável pela sincronização do tempo e controle de todo o sistema. Armazena informações de alcance e posição coletadas pelo scanner, IMU e GNSS. Laser scanners modernos, que geram até 300.000 pulsos por segundo, produzem cerca de 20 Gbyte de dados por hora. Por outro lado, os dados de GNSS e IMU atingem até 0,1 Gbyte por hora.
- e) Laptop do operador: este é utilizado como meio de comunicação com a unidade de controle e armazenamento dos dados para configuração dos parâmetros da missão de voo e monitoramento do desempenho do sistema no voo.
- f) Sistema de gerenciamento do voo: este é o meio pelo qual o piloto visualiza as linhas de voo pré-planejadas para a missão.

O princípio de funcionamento de um sistema LiDAR consiste na emissão de pulsos laser em direção à superfície que se pretende coletar informações. Assim que os raios emitidos encontram algum obstáculo, eles retornam ao sensor. A determinação da distância do sensor ao objeto é calculada pelo intervalo de tempo entre a emissão e o retorno de cada pulso (SHAN; TOTH 2018, WEHR; LOHR, 1999). Dado que as medições são realizadas com a plataforma em movimento, são integradas ao sensor, um sistema de posicionamento global por satélites (GNSS) e um sistema de navegação inercial (SNI). Dessa maneira, as posições e orientações são obtidas pelos dois sensores supracitados.

Após o perfilamento laser e anteriormente a extração da nuvem de pontos, é aplicado um método pós-processado para a correção diferencial das posições da aeronave durante o aerolevanteamento, o “*Differential Global Navigation Satellite System*” (DGSS). Com a aplicação desse método a exatidão das observações realizadas no espaço objeto alcançam a dimensão entre cinco a trinta centímetros (MOSTAFA, 2001).

O sistema LiDAR é composto por um espelho de varredura óptico-mecânico, que realiza uma varredura transversal à direção do voo. De forma geral, existem três tipos de espelhos de varredura, a saber: espelho oscilante, varredura Palmer e polígonos de rotação (Figura 3). Tais espelhos resultam numa varredura do tipo “zig-zag”, modelos elípticos e linhas paralelas, respectivamente (Figura 4) (WEHR; LOHR, 1999).

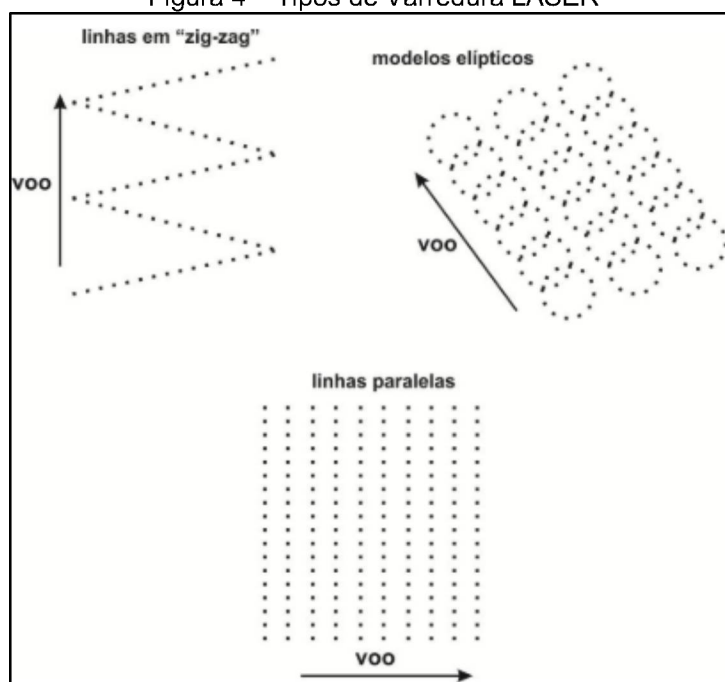
Figura 3 – Modelos de Espelho de Varredura LASER.



Fonte: Adaptado de Wehr Lohr (1999).



Figura 4 – Tipos de Varredura LASER



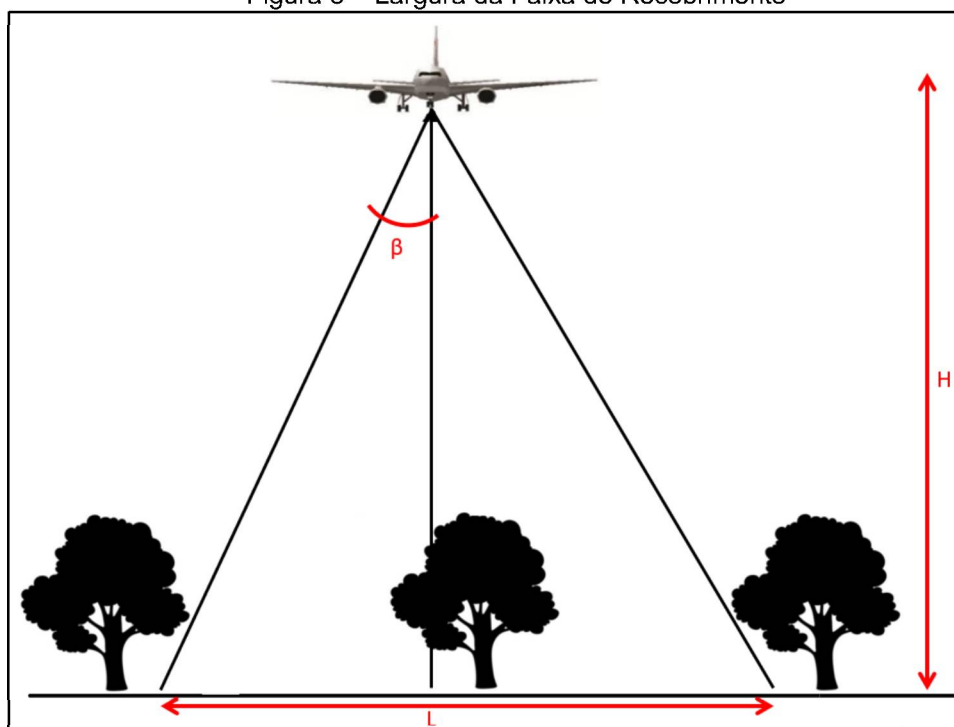
Fonte: (DALMOLIN; SANTOS, 2003).

A altura de voo e o ângulo de varredura, definidas anteriormente à realização do mapeamento, determinam a largura da faixa de recobrimento. A angulação máxima de varredura e altura de voo do sensor é determinada conforme especificações de cada equipamento. A equação (1) é utilizada para o cálculo da largura da faixa de recobrimento:

$$L = 2H \tan(\beta) \quad (1)$$

Na equação (1)  $L$  corresponde a largura de faixa de recobrimento,  $H$  é igual a altura de voo, e  $\beta$  é igual a metade do ângulo de varredura. A Figura 5 mostra um esquema dos parâmetros da equação supracitada.

Figura 5 – Largura da Faixa de Recobrimento

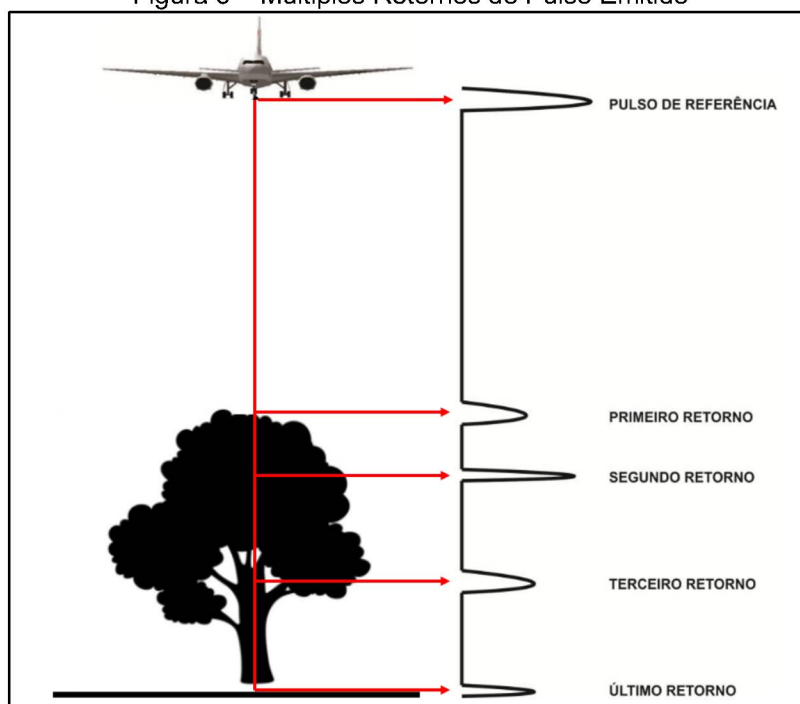


Fonte: O autor (2020)

O pulso laser diverge a medida em que sua propagação ocorre pelo meio, por isso, quando é projetado no terreno representa somente uma parte específica do terreno, que está relacionada com a altura de voo e o valor da divergência do feixe. Dado que a divergência do feixe influencia na detecção de objetos, para aplicações em áreas urbanas, visando o máximo de precisão para a coleta das edificações, ou para os mapeamentos florestais, para a alta penetrabilidade, o valor da divergência deve ser pequeno. Em contrapartida, em outras aplicações de levantamento de linhas de transmissão, os valores de divergência devem ser maiores BIN et al. (2008). De acordo com Hainosz (2012), nos sistemas atuais a divergências podem variar de 0,15 a 0,8 mrad.

Os pulsos emitidos pelo laser podem encontrar mais de um obstáculo durante o seu percurso, o que pode resultar em diversos retornos para um único pulso emitido. A tecnologia *waveform* permite a identificação desse múltiplos retornos, além de todo o percurso percorrido pelo feixe de laser emitido (HAINOSZ, 2012). A Figura 6 apresenta um esquema dos múltiplos retornos do pulso emitido.

Figura 6 – Múltiplos Retornos do Pulso Emitido



Fonte: Adaptado de Hainosz (2012).

De acordo com Mallet e Bretar (2009), os sensores laser aerotransportados que possuem a capacidade de armazenar a onda completa de retroespalhamento do pulso laser emitido, estão sendo comercializados desde do ano 2004. Tal característica fornece informações adicionais sobre a estrutura e as propriedades físicas da superfície iluminada (HAINOSZ, 2012). Os sensores com esse tipo de capacidade recebem o nome de *full-waveform* (MALLET; BRETAR, 2009). A densidade dos pontos resultante do recobrimento aéreo utilizando LiDAR está conectada diretamente aos seguintes parâmetros: a frequência de operação, o ângulo de varredura, a velocidade da aeronave e a altura de voo (ZANDONA, 2013). De acordo com Persson et al. (2005), os sensores laser tem a capacidade de obter informações sobre a refletância das feições da superfície física terrestre no comprimento de onda do infravermelho (800 nm - 1550 nm) próximo, além de coletar informações geométricas dos objetos. Como já mencionado, a maioria dos sensores atualmente tem a capacidade de armazenar a amplitude do pulso emitido, além de cada vez mais sensores serem capazes de realizar uma digitalização *full-waveform* (HAINOSZ, 2012; PERSSON et al. 2005).

## 2.2 VEÍCULOS AEROTRANSPORTADOS NÃO TRIPULADOS – VANT

Os veículos aéreos não tripulados, são veículos que podem ser remotamente pilotados, completamente independentes ou ainda uma junção de ambos (VAN BLYENBURGH, 1999). Existem diversas maneiras de se referir a esse tipo de veículo, dentre eles estão, *drone* (zangão, em inglês – devido à similaridade do som emitidos pelo aparelho e pelo animal), *Remotely Operated Aircraft* – ROA (Aeronave Operada Remotamente), *Remote Piloted Vehicle* – RPV (Veículo Pilotado Remotamente) e *Unmanned Aerial Vehicle* – UAV. De acordo com (LONGHITANO, 2010), a nomenclatura deveria incluir o termo “sistema” para expressar um conceito que abrangesse demais componentes, como a estação de comando terrestre, operadores, processos de comando e controle, a telemetria, a navegação e outros hardwares e/ou softwares que venham a fazer parte, além do veículo aéreo propriamente dito.

Como podemos inferir, a nomenclatura de sistema, ou seja, o termo *Unmanned Aircraft System* – UAS, expande o conceito de veículo aéreo não tripulado para além do veículo aéreo somente. Como uma alternativa para o termo UAS, adotado pelo Departamento de Defesa dos EUA e pela Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido, a Força Aérea dos Estados Unidos (USAF) e a Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO) preferem o termo *Remotely Piloted Aircraft* – RPA (Aeronave Pilotada Remotamente ou Aeronave Pilotada por Controle Remoto). O termo “controle remoto” é para designar duas importantes vertentes desse tipo de tecnologia: i) o fato de que existe um piloto da aeronave e ii) o sistema continua a estar fortemente dependendo de pessoal (VAN BLYENBURGH, 2014; COLOMINA e MOLINA, 2014). Atualmente são encontrados diversos modelos de VANT no meio civil tendo uma variedade de aplicações. Em sua gênese esses veículos foram concebidos para fins militares, sendo, especialmente, utilizado em situações de conflito (JENSEN, 2009).

O VANT pode ser obtido em diversos tamanhos e dimensões, apresentando modelos com multirotores, mais leves e portáteis, bem como, modelos com asa fixa, mais pesados e robustos. Aqueles têm uma capacidade de carga de algumas gramas, já estes chegam a uma capacidade de até uma tonelada. O VANT pode ser colocado para voar, entre outras formas, por meio do lançamento manual, lançamento vertical, com um impulso<sup>3</sup> para que a velocidade inicial atinja a velocidade suficiente para o

---

<sup>3</sup> O impulso inicial pode ser feito utilizando um carro ou outro veículo para que o VANT chegue a velocidade necessária.

voo. O pouso é feito utilizando ou não um trem de pouso acoplado ao veículo (JENSEN, 2009).

Uma das maiores vantagens do VANT é que podem sobrevoar áreas comumente inacessíveis, comparativamente aos sistemas tripulados, em locais montanhosos, áreas vulcânicas, regiões sísmicas, áreas desérticas, áreas sob inundações, zonas de acidente naturais, áreas constantemente nubladas, dado que, realizam voos em altitudes baixas, que normalmente aviões tripulados não voam. Além disso, outro aspecto favorável é a maior disponibilidade de utilização destes tipos de aparelhos (EISENBEISS, 2009; 2011). Para além dos pontos positivos citados acima, Eisenbeiss (2009) ainda demonstra que por não serem veículos tripulados, os custos de aquisição e operação são reduzidos.

Considerando os micro/mini VANTs, aqueles que não superam os 5 kg, de acordo com (EISENBEISS, 2011), as desvantagens estão interligadas com a escolha dos sensores fotogramétricos, de posição e orientação, visto que, como veículo não suporta cargas elevadas, é necessário que os sensores que o acompanham sejam menores e mais leves possíveis, o que por sua vez, faz com que estes sensores demandem inúmeras calibrações. Ainda relacionado com essa questão, outro ponto negativo de veículos com menos de 5 kg, é o fato de estarem muito mais suscetíveis as condições climáticas, como vento e chuva (EISENBEISS, 2009; 2011).

Como foi mencionado, a aeronave tem embarcado sensores que permitem conhecer sua localização durante todo o voo, nesse caso o sistema responsável por essa função é sistema de navegação, composto por um receptor GNSS integrado a um sistema inercial (VAN BLYENBURGH, 2014; EISENBEISS, 2011). Os veículos ainda podem carregar câmeras digitais no espectro visível, câmeras infravermelho termal, sensores hiperspectrais ou ainda sensores radar com abertura sintética – SAR, para coleta de imagens em quaisquer condições que seja possível realizar um voo (VAN BLYENBURGH, 2014; JENSEN, 2009).

De acordo com (EISENBEISS, 2009), os VANTs são uma nova ferramenta de medição fotogramétrica que permite uma gama de novas aplicações, sendo possível a combinação de Fotogrametria aérea com a terrestre, introdução de novas aplicações em tempo real e alternativas de baixo custo quando comparada com Fotogrametria clássica em aeronaves tripuladas. Daí justifica-se a sua utilização em monitoramentos de impactos ambientais (LONGHITANO, 2010), agricultura de precisão (JORGE ET AL., 2011), cadastro urbano e sensoriamento remoto (EISENBEISS, 2009; 2011;

KHAN et al., 2012; LALIBERTE et al., 2011; TURNER et al., 2012). Informações mais detalhadas sobre VANT podem ser encontradas nos trabalhos de (VAN BLYENBURGH, 2018; COLOMINA; MOLINA, 2014). Nesta pesquisa os termos utilizados para se referir a essa tecnologia serão, VANT ou RPA, conforme o exposto anteriormente.

### 2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE VANT

As primeiras legislações surgiram no começo da década de 2010, com as pesquisas e estudos conjuntos do DECEA (Departamento de Controle Aéreo) e da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) para o estabelecimento de regulamentações para a operação civil dos VANTs (MELLO, 2019).

A regulamentação de VANT adotada nacionalmente foi baseada na documentação regulatória da “*International Civil Aviation Organization*” (ICAO), que estão nos anexos da convenção de Chicago e na publicação “*Manual on RPAS*”. Entretanto, o texto integral do documento Circular de Informações Aeronáuticas AIC – N21 não está mais disponível para consulta nas publicações do DECEA (BRASIL, 2021).

A Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40 veio para regulamentar os parâmetros técnicos de enquadramento e categorização dos VANTs, bem como, as regras de voo as quais esses são submetidos. Para além disso, essa nova regulamentação suplantou a AIC-N21.

De acordo com o Código Brasileiro de Aeronáutica (CBAer) (Lei n. 7.565/1986, em seu Título IV, Capítulo I, Art. 106), “Considera-se aeronave todo aparelho manobrável em voo, que possa sustentar-se e circular no espaço aéreo, mediante reações aerodinâmicas, apto a transportar pessoas ou coisas.” (BRASIL, 1986). Dessa maneira os VANTs estão enquadrados como aeronaves perante a lei brasileira, ou seja, estão submetidos a regulação e fiscalização da ANAC.

A RBCA-E n.94 da ANAC, vigente desde abril de 2017, coloca que a idade mínima para uso e operação de VANT é 18 anos e que operação totalmente autônomas são proibidas no Brasil, além de haver uma necessidade de seguros para danos a terceiros.

A operação de VANTs no Brasil é regulada hoje pela ANAC, DECEA, ANATEL e, em alguns casos específicos, pelo Ministério da Defesa ou do Comando da

Aeronáutica (COSTA JÚNIOR, 2017). É importante ressaltar que as regulamentações técnicas são descritas como possuidor de força legal, tanto na Constituição Federal de 1988 quanto no Código Brasileiro de Aeronáutica e no Código Penal, ficando os que violam os termos, sujeitos às penas dos crimes cometidos em função das violações (BRASIL, 2021).

O DECEA coloca que é obrigatória a autorização de voo para aeronaves, de qualquer tipo, no espaço aéreo nacional, excetuadas aquelas atividades de lazer ou desporto, como o próprio órgão descreve em seu *site* (MELLO, 2019):

“Qualquer objeto que se desprenda do chão e seja capaz de se sustentar na atmosfera – com propósito diferente de diversão – estará sujeito às regras de acesso ao espaço aéreo brasileiro. Desse modo, todo o voo de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) precisa de autorização do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), exatamente como no caso das aeronaves tripuladas. Ou seja, a regra geral, seja aeronave tripulada ou não, é a mesma, já que é imprescindível a autorização para o voo. A exceção, para os dois casos, também é a mesma: os voos que tenham por fim de lazer, esporte, hobby ou competição, que tem regras próprias”.

Dessa maneira, antes que um VANT possa ser operado, seja em atividades de apoio à agricultura ou a mineração, faz-se necessário que haja uma autorização de voo, assim como um plano de voo concebido e aprovado (GONÇALVES, 2018). A Tabela 2 elenca algumas das leis e normas vigentes quanto ao uso de veículos aéreos não tripulados.

Tabela 2 – Normas vigentes quanto à operação de VANTs

<p align="center"><b>Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental para Veículos Aéreos Não Tripulados IS 21-002<sup>a</sup>;</li> <li>2. RBAC21, 29 de novembro de 2011 – Certificado de Autorização de Voo Experimental;</li> <li>3. RBHA 91, de 20 de março de 2003 – Regras Gerais de Operação Para Aeronaves Civis.</li> </ol>
<p align="center"><b>Departamento de Controle Aéreo (DECEA)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ICA 100-40, 9 de novembro de 2015 – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro;</li> <li>2. ICA 100-12, de 31 de julho de 2014 – Regras do Ar;</li> <li>3. ICA 100-37, de 28 de abril de 2014 – Serviços de Tráfego Aéreo.</li> </ol>
<p align="center"><b>Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008 – Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita;</li> <li>2. Resolução nº 635, de 9 de maio de 2014 – Regulamento sobre Autorização de Uso Temporário de Radiofrequências;</li> <li>3. Portaria 465, de 22 de agosto de 2007 – Aprovar a NORMA Nº 01/2007, anexa a esta Portaria, que estabelece os procedimentos operacionais necessários ao requerimento para a execução do Serviço Especial para fins Científicos ou Experimentais.</li> </ol>

Fonte: ANAC (2021)

O DECEA é o órgão que regula todo o espaço aéreo brasileiro, dessa maneira, toda operação de um VANT ou de uma aeronave tripulada é regulada por este órgão e os demais órgãos competentes, seja na esfera municipal, estadual ou federal.

Como colocado anteriormente, a ICA 100-40 é a norma que legisla sobre os aspectos legais a serem respeitados para uma utilização segura do espaço aéreo por este tipo de aeronave.

O espaço aéreo é dividido em várias categorias, como os controlados, condicionados, segregados, entre outros, e cada um deles vai exigir uma permissão/autorização, sendo que em alguns deles qualquer tipo de operação aérea é restrita, por exemplo, nos espaços aéreos militares.



Os agentes interessados em explorar o espaço aéreo, denominados de Exploradores ou Operadores devem solicitar a autorização de uso do espaço aéreo ao CINDACTA da região onde ocorrerá o voo (MELLO, 2019). De acordo com o DECEA:

“Os procedimentos para solicitar a autorização de uso do espaço aéreo devem observar, porém, à localidade em que se pretende voar já que o espaço aéreo brasileiro é dividido em sub-regiões aéreas de responsabilidades de diferentes órgãos operacionais regionais, subordinados ao DECEA. Esses órgãos, são os quatro Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo, os chamados CINDACTA que atuam diretamente no controle aéreo dessas áreas – denominadas, por padrão internacional, de FIR (em português, Regiões de Informação de Voo) – que preenchem a totalidade da área de responsabilidade do Brasil. Há ainda um outro órgão regional, responsável exclusivamente pelo uso do espaço aéreo entre as terminais aéreas do Rio de Janeiro e São Paulo: o Serviço Regional de Proteção ao Voo de São Paulo (SRPV-SP)”.

Para o DECEA, explorador/operador é toda “pessoa, organização ou empresa que se dedica ou se propõe a se dedicar à exploração de aeronaves.” Tal pessoa é a responsável pela operação ou exploração, controle de pessoal envolvido, manutenção e treinamento para manuseio dos equipamentos bem como por toda a documentação que for necessária para uma operação em conformidade. A certificação dos operadores/exploradores é competência da ANAC.

A ICA 100-12 esclarece que cabe ao operador/explorador do VANT ter todas as mesmas responsabilidades de um piloto de aeronave tripulada, no sentido de agir de acordo com as leis e as regulamentações em vigência sobretudo por não estarem a bordo da aeronave.

Para altitudes até aproximadamente 30 metros, em áreas confinadas (dentro de prédios ou estádios), e quando se trabalha próximo a obstáculos e áreas muito povoadas são consideradas algumas regras específicas para o voo. Especificamente quanto ao voo em aglomerados habitacionais, a ICA 100-40 prevê que (MELLO, 2019):

“Dentre outras normatizações, a operação sobre áreas povoadas e aglomerados de pessoas estará, a princípio, proibida. A autorização de voo nesses casos dependerá de uma série de requisitos de segurança, expressos na ICA, a serem avaliados, caso a caso. Já os voos no interior de prédios e construções fechadas, mesmo que parcialmente, incluindo ginásios, estádios e arenas a céu aberto (até o limite vertical da sua estrutura lateral) serão de total responsabilidade do proprietário e deverão estar autorizados por estes, já que estes espaços não são “espaços aéreos” sob a responsabilidade do DECEA, incompatíveis, assim, com a regulação da ICA 100-40. Cabe, porém,

para esse tipo de operação, observar as regulamentações da ANAC e as responsabilidades civis em vigor”.

Após proceder toda certificação e homologação nas demais agências, o operador deve acessar via *web* o “Sistema de Autorização para Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS” (SARPAS) na página do DECEA e cadastrar o seu equipamento, bem como se cadastrar no sistema para solicitar o acesso ao espaço aéreo. A solicitação para se voar naquele espaço aéreo será enviada para o Órgão Regional responsável. Esta solicitação deverá se dar com antecedência mínima de 18 dias, tempo que pode ser menor dependendo da operação.

A ANATEL regula a utilização das frequências de rádio e da sua utilização por todos os tipos de produto, empresa e aparelho. Cada empresa ao disponibilizar seu produto no mercado nacional, com suas respectivas frequências de rádio, deve fazer a homologação, contudo, em alguns casos como produtos importados ou artesanais, cabe ao proprietário da aeronave, junto a ANATEL, fazer um requerimento para a declaração de conformidade. O usuário pode utilizar um documento, que é disponibilizado pela própria ANATEL, que traz informações detalhadas e passo a passo de como as pessoas podem acessar esse sistema (PINTO, 2017).

O sistema Mosaico, acessado via online, traz quatro modalidades de Declaração de Conformidade, possíveis de serem solicitadas:

- a) Fabricante: empresa com domicílio no Brasil e fabrica produtos que utilizam radiofrequências;
- b) Fabricante artesanal: pessoa física ou jurídica com domicílio no Brasil que produz para utilização própria, sem direito de comercialização;
- c) Importador: Pessoa física ou jurídica que importa produtos de telecomunicação e tem domicílio no Brasil;
- d) Importador de produto para uso próprio: pessoa física ou jurídica que importa produtos de telecomunicação, porém com restrições de comercialização e para uso próprio. Que também deve ter domicílio em território nacional.

Os usuários que adquirem uma aeronave, para uso no sensoriamento remoto, se encaixam no tipo de solicitante “Importador de produto para uso próprio”. Tal modalidade não impede nenhum tipo de uso, porém, restringe a comercialização

(PINTO, 2017). De forma geral, os produtos fabricados para o mercado interno, tem sua regulação perante a ANATEL, como a categoria “Fabricante”, o que gera um conflito de informações. O operador deve se responsabilizar pela devida homologação (PINTO, 2017).

Para a regulamentação, junto a ANAC, a documentação vai variar conforme a classe e o tipo de operação. Aeronaves com até 250 g e que voem até aproximadamente 120 metros não necessitam de documentação. Para aeronaves de Classe 1, 2 e 3 e para voo acima de 120 metros, deverá ser emitido uma licença e habilitação para a operação durante o voo. Ainda para o operador, em aeronaves de classe 1 e 2, deverá ser emitido um Certificado Médico Aeronáutico (CMA) emitido pela ANAC ou um de terceira classe emitido pelo DECEA (PINTO, 2017).

O Portal RPAS apresenta uma Tabela 3 resumido, de maneira didática, com os aspectos a serem considerados para cada tipo de operação e classe de VANT.

Tabela 3 – Tabela de resumo das regulamentações da ANAC

VANT	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
<b>Registro da aeronave</b>	Sim	Sim	BVLOS: Sim VLOS: Sim
<b>Autorização do projeto</b>	Sim	Sim	Apenas BVLOS ou acima de 400 ft
<b>Licença e habilitação</b>	Sim	Sim	Operações acima de 400 ft
<b>Local de operação</b>	A distância da aeronave não tripulada NÃO poderá ser inferior a 30 metros horizontais de pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação. Esse limite não é aplicável para operações por órgão de segurança pública, de polícia, de fiscalização tributária e aduaneira, de combate a vetores de transmissão de doenças, de defesa civil e/ou do corpo de bombeiros, ou operador a serviço de um destes.		

Fonte: ANAC (2021)

É importante ressaltar que todo VANT entre 250 g e 25 kg que irão operar na faixa visual (VLOS) até 120 m do nível do solo, deve ser cadastrado por meio da ferramenta online disponível em ([sistemas.anac.gov.br/sisant](http://sistemas.anac.gov.br/sisant)); Já para os VANTs classe 2 e 3, que irão operar além da linha de visada (BVLOS) ou acima de 120 m, o fabricante pode optar pelo processo de certificação de tipo estabelecido no RBAC nº. 21 ou pela autorização na Subparte E do RBAC-E nº. 94 (ANAC, 2021).

## 2.4 STRUCTURE FROM MOTION (SfM)

Nesta seção serão abordados os conceitos e fundamentos do *Structure From Motion* (SfM), e os relacionamentos com a Fotogrametria e as Ciências Geodésicas para a melhor compreensão deste estudo.

### 2.4.1 Evolução e Breve Histórico do SfM

O teorema do SfM foi apresentado e formalizado por Ullman (1979). Nesse trabalho o autor discutiu os princípios e as formulações matemáticas para a definição desse teorema. Uma das principais contribuições foi a proposição da hipótese da rigidez, em que o autor coloca algumas restrições para a interpretação do teorema do SfM e postula que qualquer conjunto de elementos passando por uma transformação 2D e que tem uma interpretação única como um corpo rígido se movendo no espaço, deve ser interpretado como tal corpo em movimento.

Para que o teorema do SfM fosse desenvolvido foi necessário a pesquisa em diferentes áreas do conhecimento, como a Fotogrametria e a Visão Computacional. As pesquisas realizadas nesse sentido foram justamente para tentar solucionar o problema da reconstrução de um objeto na superfície terrestre a partir de sua representação em um conjunto de imagens.

Na Fotogrametria os estudos para a utilização de imagens para fins de mapeamento começaram em 1849, com o militar francês Aimé Laussedat, considerado o pai dessa ciência (TOMMASELLI, 2009). Já no campo da Visão Computacional um estudo inicial foi o experimento que, a partir da projeção ortogonal da sombra de objetos tridimensionais, possibilitou a percepção visual de todas as suas dimensões (WALLACH; O'CONNELL, 1953).

O experimento "*The two cylinders demonstration*", conduzido por pesquisadores da área da Visão Computacional, mostrou que a estrutura de um objeto em movimento pode ser percebida projetando-se somente algumas feições desse respectivo objeto, ou seja, não se faz necessário projetar ortogonalmente todos os pontos para que sua estrutura seja obtida (ULLMAN, 1979). Neste contexto Ullman (1979) apresentou contribuições imprescindíveis para essa área, consolidando o teorema do SfM.

Para Ullman (1979), a utilização da projeção perspectiva, ao invés da projeção ortogonal, acarretaria a perda de desempenho computacional, devido à complexidade de cálculos para os feixes perspectivos que interceptam o plano de projeção. A utilização da projeção ortogonal era a mais adequada naquele contexto pois, todos os feixes perspectivos interceptam o plano de projeção em um único mesmo ângulo, o que tornava os cálculos matemáticos menos complexos e permitia um melhor desempenho computacional.

Considerando essa questão da projeção dos feixes perspectivos podemos observar uma das primeiras divergências encontradas na Fotogrametria Analítica e no SfM. Enquanto este tinha seus cálculos realizados com a projeção ortogonal, aquela utilizava a projeção com feixes perspectivos (ULLMAN, 1979).

As evoluções no campo do SfM continuaram a acontecer com a proposição de orientação de pares de fotografia utilizando cinco pontos observados em ambas as imagens (OKAMOTO, 1981), a utilização da Geometria Epípolar, visão estereoscópica e princípios da Fotogrametria para a reconstrução tridimensional de cenas estáticas (BOLLES; BAKER; MARIMONT, 1987). Para solucionar problema quanto às restrições da posição da câmera (HEEL, 1990) propôs a utilização de gradientes de brilho da imagem na correspondência dos pontos homólogos para a reconstrução tridimensional dos objetos.

Avanços tecnológicos como a modernização dos sistemas computacionais, o advento dos algoritmos de detecção e descrição de pontos de interesse em imagens digitais fizeram com que novas soluções pudessem ser pesquisadas e propostas. Um exemplo disto é o algoritmo do SIFT (LOWE, 2004), que contribuiu com uma forma robusta para a automatização do processo de reconstrução tridimensional, fazendo com o que o algoritmo se tornasse cada vez mais automático e minimizando a interferência do usuário.

Tanto a Visão Computacional e a Fotogrametria, bem como, o campo do Processamento Digital de Imagens, foram áreas que por meio dos seus adventos científicos e tecnológicos contribuíram para a solução do problema do SfM, o que possibilitou cada vez mais a automatização de todo o processo. Atualmente o processamento fotogramétrico com a técnica do SfM é utilizada para diversas finalidades, sendo a geração de base cartográfica uma das mais difundidas.

## 2.4.2 A Câmera e o Modelo Pinhole

Na Fotogrametria as imagens têm como objetivo realizar o mapeamento entre os pontos do terreno e os pontos da imagem, ou em outras palavras, entre os pontos do espaço-objeto ( $R^3$ ) e do espaço-imagem ( $R^2$ ) (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004). O modelo matemático que define o mapeamento é o modelo Pinhole. Este modelo define um mapeamento geométrico do ponto no espaço-objeto para o espaço-imagem usando como referência a projeção perspectiva (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

Ao se utilizar a projeção perspectiva, a forma dos objetos imageados é distorcida, não podendo ser descrita com a utilização da geometria Euclidiana tradicional. Para se contornar esse problema utiliza-se a geometria projetiva, mais especificamente o sistema de coordenadas homogêneas, dirimindo as limitações acarretadas pelo sistema de coordenada da geometria euclidiana.

Na geometria Euclidiana um ponto  $x$  é representado em  $R^2$  e tem suas coordenadas definidas por um par ordenado, tal que  $x = (x, y)$ . Já esse mesmo ponto em um sistema coordenadas homogêneas é representado por:  $x'$ , tal que  $x' = (x, y, w)$ , ou seja, uma tríade de coordenadas. De acordo com Hartley e Zisserman (2004), a relação entre as coordenadas euclidianas e as coordenadas homogêneas é dada por:

$$u = \frac{x}{w} \quad (2)$$

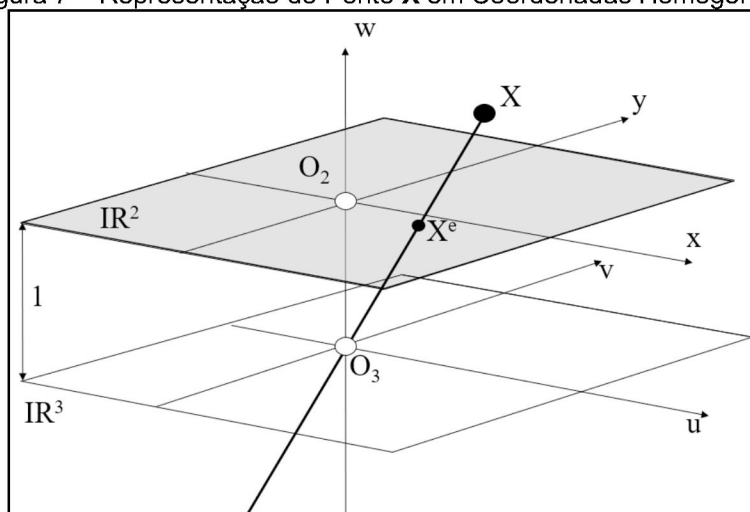
$$v = \frac{y}{w} \quad (3)$$

Utilizando essa relação é possível representar um ponto  $x$  no espaço de coordenadas homogêneas e recuperar suas coordenadas no espaço euclidiano. A operação contrária, de se representar um ponto no espaço  $R^3$  a partir de um ponto no espaço homogêneo, também é possível de ser realizada (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004). Considerando uma multiplicação por um escalar qualquer  $\lambda$ , diferente de zero, o valor das coordenadas homogêneas é invariante, dessa forma, podemos dizer  $x$  e  $\lambda x$  representam as coordenadas do mesmo ponto (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

A Figura 7, ilustra a representação geométrica das coordenadas homogêneas de um ponto  $X$ . Logo, podemos observar que estas coordenadas estão representadas

pela sua projeção de coordenadas homogêneas  $X^e$  e o relacionamento entre o plano  $R^2$ , com sua origem em  $O_2$ , o  $R^3$  com origem em  $O_3$ . A linha que conecta o ponto  $X$  e intercepta o plano  $R^2$  e a origem do sistema euclidiano ( $O_3$ ) representa todo o conjunto de valores de pontos que  $\lambda X$  pode assumir (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

Figura 7 – Representação do Ponto  $X$  em Coordenadas Homogêneas



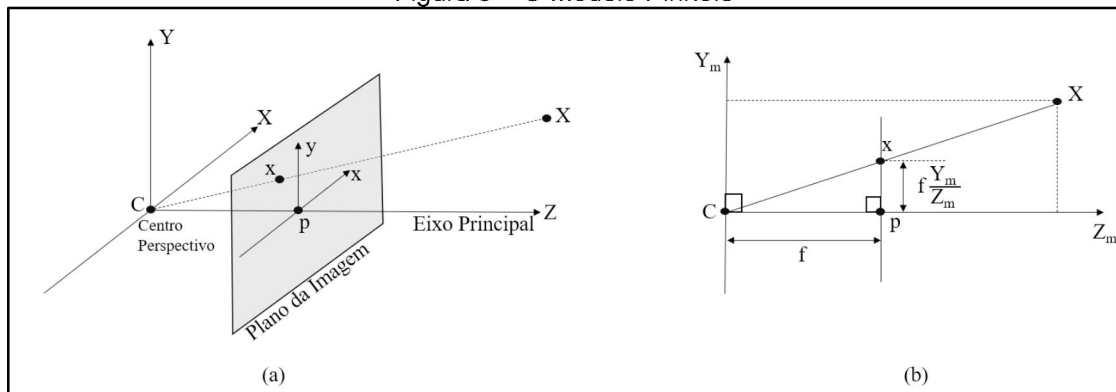
Fonte: Adaptado de Förstner e Wrobel (2016)

O ponto  $X^e$  é o ponto em que a linha toca o plano  $R^2$  e o valor da sua posição é definida pela coordenada homogênea  $w$ , que no exemplo tem valor unitário. As coordenadas homogêneas do ponto  $X$ , no plano  $R^2$  são  $X^e = (x, y, 1)$  (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

#### 2.4.2.1 O modelo pinhole

A Figura 8 denota o modelo de câmera *pinhole* em que  $C$  é a origem do Centro perspectivo e coincide com a origem de um sistema cartesiano tridimensional. O ponto  $p$  é o Ponto Principal e também é o ponto de interseção entre o eixo principal e o plano da imagem ou plano focal ( $Z = f$ ). A distância entre o centro da câmera e o plano da imagem é igual a distância focal ( $f$ ) (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

Figura 8 – O Modelo Pinhole



Fonte: Adaptado de Hartley e Zisserman (2004)

Um ponto  $X$  no espaço, denotado como  $X = [X_m, Y_m, Z_m]^T$ , definido em relação ao sistema de coordenadas  $[C, X, Y]^T$  e o ponto imagem  $x = [x_i, y_i]^T$ , definido no eixo de coordenadas  $[P, x, y]^T$ , o que buscamos é a relação  $\xi$ , entre  $(R^3 \rightarrow R^2)$  tal que (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004):

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \xrightarrow{\xi} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Desta transformação, são explicitados os parâmetros extrínsecos e os intrínsecos, sendo eles, respectivamente, a rotação e translação do eixo  $[P, x, y]^T$  em relação à  $[C, X, Y, Z]^T$ , e o centro perspectivo e outros (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

A partir da Figura 8 podemos inferir que a matriz de projeção do ponto central da câmera, em coordenadas homogêneas, é:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{P} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A equação acima (4) presume que a origem das coordenadas do plano da imagem está no ponto principal, entretanto, dificilmente a câmera está posicionada de tal maneira, ainda mais em aplicações da Fotogrametria, as quais frequentemente assumem um referencial geodésico tridimensional com origem no centro de massa da Terra (WANG; WU, 2011). Em outras palavras, podemos dizer que na prática pode



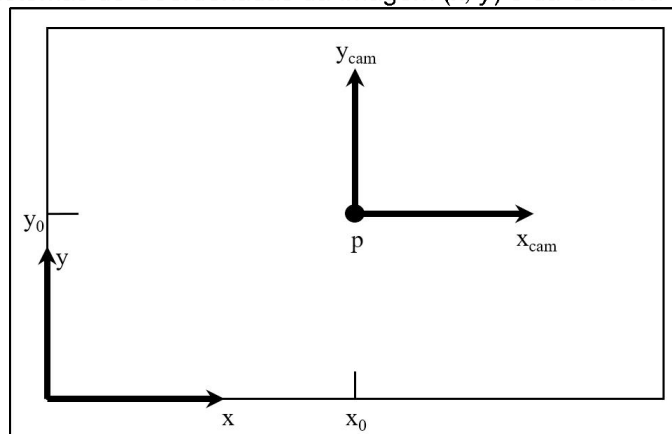
ser que o ponto central P da câmera não esteja localizado sobre o eixo Z (Figura 9) nesse caso, aplica-se o seguinte mapeamento:

$$[X_m, Y_m, Z_m]^T \rightarrow \left[ \frac{X_m}{Z_m} + p_x, \frac{Y_m}{Z_m} + p_y \right]^T \quad (5)$$

Neste caso, ponto principal P é expresso por  $P = [p_x, p_y]^T$  e a transformação é dada por:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{P} \begin{bmatrix} x_i + p_x \\ y_i + p_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Figura 9 – Sistemas de Coordenadas da Imagem ( $x, y$ ) e da Câmera ( $x_{cam}, y_{cam}$ )



Fonte: Adaptado de Hartley e Zisserman (2004)

Na forma abreviada temos:

$$x = K[I \mid 0] X_{cam} \quad (7)$$

em que K é a matriz de parâmetros intrínsecos dada por:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A matriz K, também denominada de matriz de calibração ou matriz de parâmetros intrínsecos, parametriza as propriedades internas de uma câmera. Dado

que a origem do sistema referencial de uma imagem não coincide necessariamente com o centro perspectivo da câmera (Figura 9), faz-se necessário a aplicação dessa matriz de calibração.

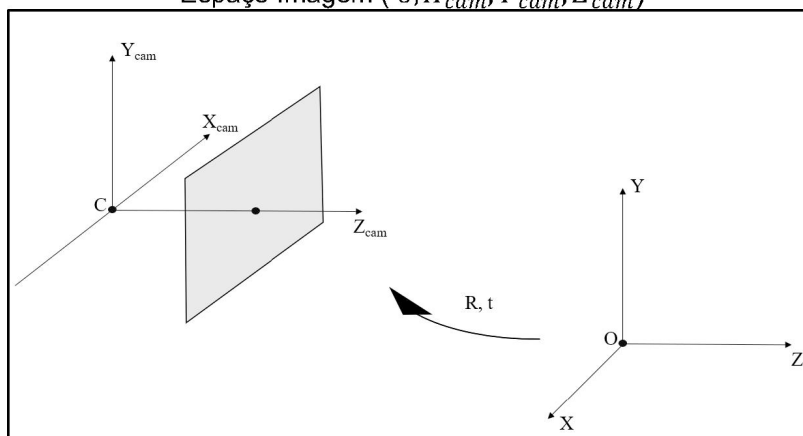
Note-se que a matriz  $K$  representa os parâmetros de orientação interior (POI) de uma câmera, ou parâmetros intrínsecos, como mencionados anteriormente, sendo  $f$  a distância focal e  $p_x, p_y$  as coordenadas do ponto principal no sistema referencial da imagem. Podemos perceber que essa é a matriz que efetivamente multiplica coordenadas de pontos 3D expressos em um referencial centrado na câmera em coordenadas 2D em sensor de imagem digital, “*Charge-Coupled Device*” (CCD) ou “*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*” (CMOS) (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004; WANG; WU, 2011). Na equação (7),  $X_{cam} = [X_m, Y_m, Z_m]^T$  são as coordenadas do *frame* da câmera.

Em casos que um ponto no espaço objeto (terreno)  $X$  é descrito tomando como referência outro sistema de coordenadas, pode-se aplicar uma transformação de rotação  $R$  e uma translação  $t$  para transformá-los para o referencial da câmera. As grandezas  $R$  e  $t$ , nesse caso, dizem respeito aos parâmetros extrínsecos ou parâmetros de orientação exterior da câmera. Em outras palavras, as grandezas  $R$  e  $t$  fazem a relação entre o referencial da câmera e um referencial inercial fixo (Figura 10). Assim podemos generalizar a equação (7) para:

$$x = K[R | t] X \quad (9)$$

em que  $[R | t]$  é a matriz de parâmetros extrínsecos.

Figura 10 – Transformação entre os Sistemas de Coordenadas do Espaço Objeto ( $O, X, Y, Z$ ) e do Espaço Imagem ( $C, X_{cam}, Y_{cam}, Z_{cam}$ )



Fonte: Adaptado de Hartley e Zisserman (2004)

O modelo de câmera *pinhole* admite que as coordenadas da imagem são euclidianas e possuem a mesma escala. Nos sensores utilizados em câmeras digitais existe a possibilidade dos pixels não serem necessariamente quadrados, com isso as distâncias nos eixos  $x$  e  $y$  não são iguais. Com isso podemos reescrever a equação (8), como:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & p_x \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

em que  $\alpha_x$  e  $\alpha_y$  se referem ao formato de pixel e  $s$  à *skew*. Para  $s$  diferente de zero, os eixos  $x$  e  $y$  não são ortogonais, e nesses casos, o modelo da câmera tem 11 graus de liberdade, sendo 5 da matriz  $K$ , 3 da matriz  $R$  e 3 do vetor  $t$  (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004; SZELISKI, 2011). Substituindo a equação (10) na equação (9), temos:

$$x = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & p_x \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R | t] X \quad (11)$$

### 2.4.3 Decomposição em Valores Singulares

Uma vez que a solução de um problema passa por um sistema de equações superabundantes, uma das maneiras consistentes de se obter essa solução é, justamente, a redução da matriz de equações, matriz  $A$ , para formas canônicas utilizando transformações ortogonais. A alternativa utilizando a decomposição em valores singulares (SVD) torna a resolução dos sistemas de equações lineares mais simples e clara (GOLUB; VAN LOAN, 1996; STRANG; Borre, 1997). De acordo com Szeliski (2011), a decomposição SVD é uma das soluções mais empregadas para a solução de sistemas lineares de equações homogêneas, aproximando a solução por mínimos quadrados.

Dado um sistema de equações lineares, em sua forma matricial, tal qual:

$$Ax = b \quad (12)$$

em que,  $A$  é uma matriz de  $m$  linhas por  $n$  colunas,  $x$  é um vetor  $n$ -dimensional e  $b$  é um vetor  $m$ -dimensional.

De acordo com Strang e Borre (1997), a decomposição SVD demonstra que sempre é possível encontrar uma matriz ortogonal  $V$  e outra matriz  $U$ , em que:

$$y = Vx \quad (13)$$

$$c = Ub \quad (14)$$

Igualando e manipulando as equações (13) e (14), temos que:

$$UAV^T Vx = Ub \quad (15)$$

Com isso pode-se perceber que, por meio da decomposição em valores singulares, qualquer matriz  $A_{m \times n}$  de números reais poderá ser escrita como:

$$A_{m \times n} = U_{m \times n} S_{n \times n} V_{n \times n}^T \quad (16)$$

A decomposição em valores singulares é de extrema importância para a solução de equações lineares, pois a expansão em séries de Taylor da matriz  $A$ , isto é:

$$A = \sum \sigma_j u_j v_j^T \quad (17)$$

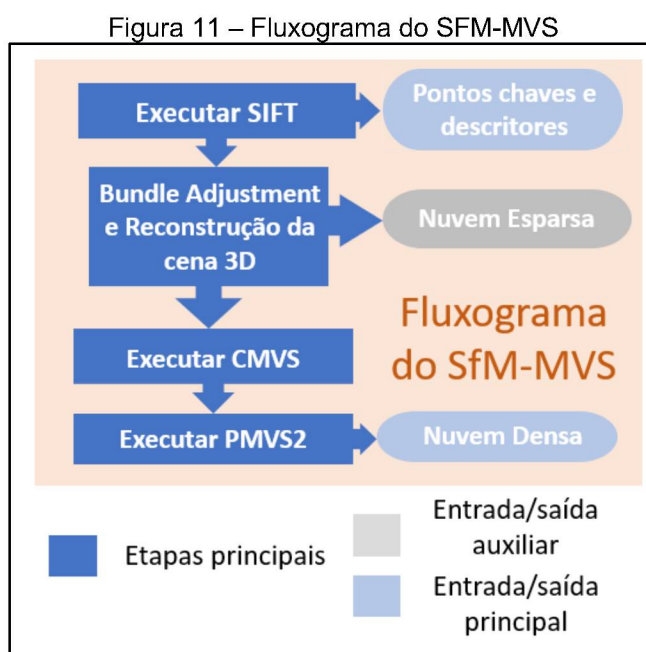
Permite obter a melhor aproximação para a solução do sistema  $Ax = b$ . Desta maneira, a decomposição SVD é amplamente aplicada para a estimativa dos parâmetros do SfM. A solução para o sistema de equações será a última coluna da matriz  $V$  (STRANG; BORRE, 1997).

#### 2.4.4 Algoritmo SfM

O procedimento SfM, de forma geral, permite estimar simultaneamente uma nuvem de pontos tridimensionais, bem como da posição e orientação das câmeras, utilizando uma sequência de imagens. Dado que existem uma variedade de

abordagens para algoritmos SfM, neste trabalho foi feita a escolha deliberada de se proceder a com uma abordagem semelhante e adaptada do algoritmo implementado no projeto *Bundler*.

De acordo com Carrivick, Smith e Quincey (2016), o SfM quando aplicado no contexto das geociências, consiste na aplicação de técnicas e algoritmos que visam obter como produto final a representação tridimensional de um objeto. A Figura 11 ilustra um fluxograma das etapas do SfM, as quais serão abordadas na sequência.



Fonte: O autor (2021)

Considerando o exposto nos parágrafos anteriores, outras câmeras poderão ser adicionadas na reconstrução, de tal maneira que pode ser definido o maior número de imagens da mesma região de estudo, para resultar o maior número de medidas redundantes.

O algoritmo largamente utilizado para o procedimento de detecção de pontos-chave e a determinação das correspondências é “*Scale Invariant Features Transform*” (SIFT).

#### 2.4.4.1 Etapas do Algoritmo SIFT

Em cada foto que é inserida na reconstrução tridimensional com o SfM, faz-se a detecção de feições locais nessas imagens. Por sua vez, essas feições são associadas a descritores que o proporcionam a descrição matemática dessa região

(*image patch*) ao redor da posição bidimensional da imagem (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004; AMISSE, 2016).

As correspondências 2D-2D entre mesmas feições nas duas imagens podem ser obtidas a partir do exposto acima. Os descritores da primeira imagem são combinados com os descritores na segunda imagem para obter um conjunto de pontos homólogos. Diversos procedimentos, no campo da Visão Computacional, usam feições e descritores obtidos com o algoritmos do SIFT, que acabou se tornando o padrão no SfM, por isso esse trabalho focará, a seguir, na abordagem dos métodos envolvido neste procedimento (AMISSE, 2016; FRAHM ET AL., 2010; SNAVELY ET AL., 2006, 2008).

O SIFT foi publicado em 1999, por David G. Lowe, o qual transforma uma imagem em um grupo de vetores locais de feições, em que cada um desses vetores é invariante à translação, escala, rotação e parcialmente invariante às alterações de luminosidades na imagem. Os vetores resultantes são designados de pontos SIFT (LOWE, 1999, 2004).

De acordo com Lowe (2004), o algoritmo SIFT é executado por meio de quatro etapas principais, a saber:

- a) Detecção de extremos em diferentes espaços-escala;
- b) Localização dos pontos-chave;
- c) Determinação da Orientação dos Descritores;
- d) Descrição dos pontos chaves.

As duas primeiras etapas descrevem o detector, e as duas partes finais descrevem a formação do descritor. A seguir serão descritas as etapas do algoritmo SIFT com base no exposto em Lowe (2004).

- a) Detecção de extremos em diferentes espaços-escala

A primeira etapa do algoritmo consiste em buscar pontos na imagem que sejam invariantes a mudança de escala, o que, por sua vez, permite a detecção de pontos na imagem, independente da distância da câmera ao fazer a capturas. Esse objetivo é alcançado aplicando uma convolução, utilizando uma função kernel gaussiana explicitada abaixo.

Dada uma imagem  $I(x, y)$ , definida no espaço-escala, a função  $L(x, y, \sigma)$  passa a defini-la quando é produzida pela convolução de uma função gaussiana  $G(x, y, \sigma)$  com esta mesma imagem.

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \times I(x, y) \quad (18)$$

em que,

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (19)$$

O filtro  $G$  é variável à escala através do parâmetro  $\sigma$ . O autor ainda explica que uma melhor eficiência na detecção de pontos de interesse, deve-se utilizar a função de Diferenças Gaussianas (DoG) para a convolução da imagem, formada por uma diferença de imagens filtradas em escalas próximas, separadas por uma constante  $k$ . O  $\sigma$  é aumentado por esse fator constante  $k$ , tal que:

$$\sigma_{i+1} = k\sigma_i \quad (20)$$

A função de Diferença de Gaussianas é dada por:

$$DoG = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (21)$$

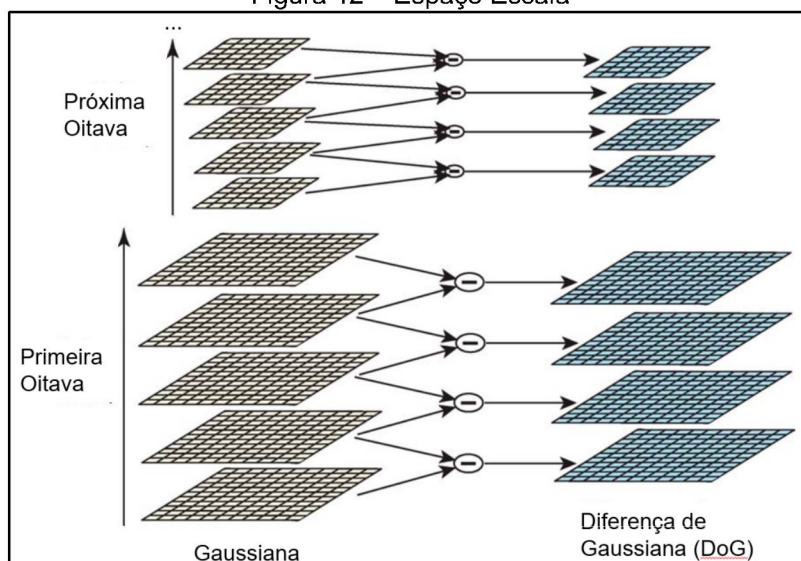
Após a aplicação uma convolução na imagem, com a função  $DoG$  o resultado é dado por:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \times I(x, y) \quad (22)$$

$$= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (23)$$

A função  $DoG$  é uma diferenciação entre as imagens consecutivas (Figura 12). A principal ideia do algoritmo é reduzir o custo computacional, o tempo de processamento realizando apenas operações apenas em pontos potenciais (e.g. regiões com intensa variação de níveis de cinza) (LOWE, 2004).

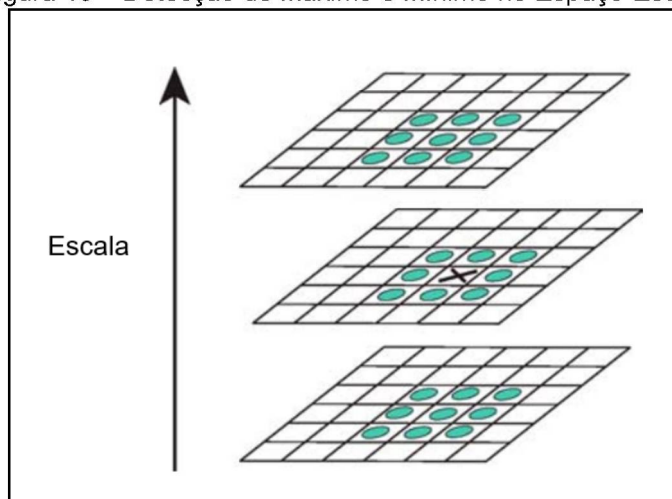
Figura 12 – Espaço Escala



Fonte: Adaptado de LOWE (2004)

Para se detectar os pontos SIFT, primeiro é preciso encontrar os pontos mínimos e máximos nas imagens obtidas pela *DoG*, e após isso, encontrar o subpixel mínimo e máximo. Primeiramente o algoritmo percorre todos os pixels e verifica a vizinhança de cada um dos pixels. De acordo com Lowe (2004), a vizinhança engloba os pixels ao redor ponto notável, na imagem anterior e na seguinte. O mínimo e máximo do *DoG* é obtido pela comparação do pixel de interesse, assinalado com X (Figura 13) com os 8 vizinhos circundantes naquela oitava (na mesma escala), e com os 9 vizinhos nas escalas logo acima e abaixo, como é mostrado na (Figura 13). Caso este ponto seja maior ou menor do que os outros, é então detectado um candidato a *keypoint*.

Figura 13 – Detecção de Máximo e Mínimo no Espaço-Escala



Fonte: Adaptado de LOWE (2004).



Dado que os pontos encontrados são considerados somente uma aproximação dos máximos e mínimos, é preciso realizar uma nova seleção com o intuito de descartar candidatos que não sejam estáveis, i. e., candidatos que não foram bem localizados em uma certa região de interesse ou que apresentam baixos contrastes, além de determinar precisamente suas localizações na imagem (LOWE, 2004).

Essa nova seleção faz-se necessária pois, como mencionado, os pixels encontrados são somente uma aproximação, e porque estes não se encontram necessariamente em um pixel, podendo situar-se entre eles, o que traz a necessidade de encontrar matematicamente o subpixel. Esse subpixel é determinado utilizando a expansão de Taylor da imagem, ao redor do ponto SIFT aproximado (LOWE, 2004).

#### b) Localização Exata dos Pontos Chaves

A posição encontrada durante a comparação com as vizinhanças deve ser refinada. A localização exata de um ponto chave  $X_0 = (x, y, \sigma)$  é determinada por um ajuste de uma função quadrática 3D, método proposto por Brown e Lowe (2002). Esta função é definida utilizando uma expansão de Taylor, deslocada da origem, de modo que a origem esteja localizada no ponto de amostragem. Desprezando-se os termos de ordem superior a 2, temos:

$$D(X) = D(X_0) + X^T \frac{fD}{fX}(X_0) + \frac{1}{2} X^T \frac{f^2 D}{fX^2}(X_0) \quad (24)$$

Para um candidato detectado, sua posição  $x$  é dada por:

$$X = \frac{\partial D^{-1}}{\partial X} \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} \quad (25)$$

O valor da função  $D(X)$  no extremo, é útil para a rejeição de extremos instáveis com baixo contraste. Essa função no extremo pode ser obtida, substituindo (25) em (24):

$$D(X) = D(X_0) + \frac{1}{2} \Delta X^T \frac{\partial D}{\partial X}(X_0) \quad (26)$$

Lowe (2004) aconselha a se rejeitar os valores de  $D(X)$  inferiores ao limiar 0,03, assumindo-se que os valores dos pixels variam entre [0, 1], em tons de cinza.

### c) Determinação da Orientação dos Descritores

Após a determinação da posição dos pontos dos candidatos, e a eliminação dos pontos instáveis no espaço-escala, o próximo passo é a atribuição da orientação dos descritores de cada ponto, de forma a descrevê-los com base nas propriedades locais de cada imagem.

O fato de se estabelecer uma orientação consistente para cada ponto chave, permite representar os descritores em relação a esta orientação, atingindo assim uma invariância quanto à rotação. O descritor é calculado com base nessa orientação. A escala do ponto chave é utilizada para selecionar a imagem  $L$ , suavizada com o filtro Gaussiano, com a escala mais próxima ao ponto chave, de tal forma, que os todos os cálculos passam a ser executados com invariância à escala (LOWE, 2004). Para cada amostragem da imagem  $L(x, y)$ , magnitude  $m(x, y)$ , e a orientação  $\theta(x, y)$  do gradiente são calculadas usando as diferenças de pixels, conforme as equações (27) e (28), a seguir:

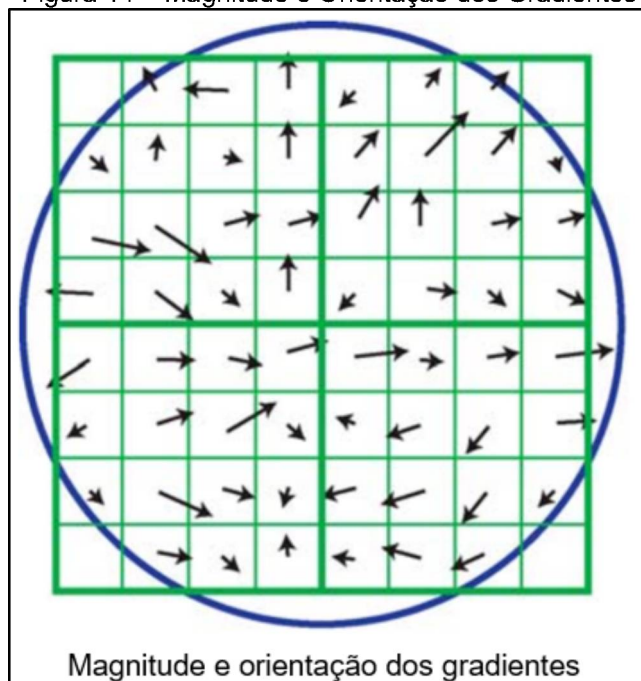
$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (27)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right) \quad (28)$$

Em seguida é criado um histograma, em que os 360 graus de orientação são divididos em 36 partes iguais. Tal procedimento é aplicado em todos os pixels ao redor do ponto chave detectado, e a orientação é determinada pelo ponto mais alto do histograma. Os valores calculados pelo procedimento anterior são ponderados de acordo com uma janela gaussiana circular (em azul na Figura 14), na qual o valor de

$\sigma$  é 1,5 vezes o valor da escala na qual o ponto de interesse está sendo amostrado (LOWE, 2004).

Figura 14 – Magnitude e Orientação dos Gradientes



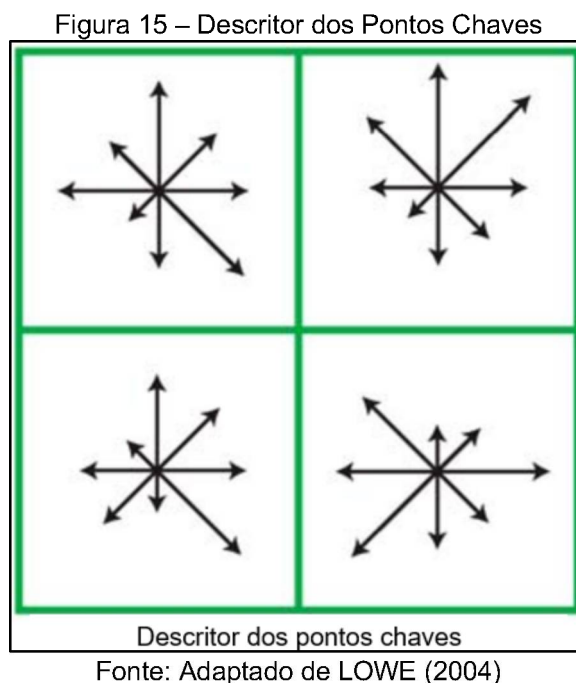
Fonte: Adaptado de LOWE (2004)

Por fim, necessita-se criar uma identificação única para cada ponto chave, em torno do qual se gera uma janela 8x8. Cada janela é subdividida em 4 janelas de dimensão 4x4, e então o gradiente de magnitude e orientação é calculado dentro de cada uma dessas 4 janelas (Figura 14). Essas orientações são colocadas em um histograma com 8 intervalos e os resultados são normalizados e colocados em forma de vetores, sendo que, esse conjunto de vetores identifica o ponto SIFT (LOWE, 2004).

#### d) Construção do Descritor Local (Descrição dos pontos chaves)

Nesta fase é computado, para cada ponto chave, um descritor local para a região da imagem, que seja invariável à iluminação e ao ponto de vista. O descritor do ponto chave é mostrado na Figura 15. Os gradientes são representados pelas pequenas setas em cada amostra da localização. Para cada região é criado um histograma de oito classes (representado graficamente pelas setas e suas direções) que é construído armazenando os valores (magnitudes) de orientação dos gradientes

dentro dessas oito classes. Os descritores são construídos utilizando estas grandezas (LOWE, 2004).



O descritor é um vetor contendo os valores que correspondem aos comprimentos das setas representadas na figura acima (Figura 15). Nela é mostrada uma matriz 2x2 com 8 orientações em cada posição, ou seja, o descritor de um ponto-chave exemplificado acima seria um vetor de 32 ( $2 \times 2 \times 8$ ) elementos. Conforme colocado por Lowe (2004), o tamanho da região utilizada para o cálculo das magnitudes e orientações pode variar conforme a necessidade da aplicação. Em seus experimentos o autor, observou que os melhores resultados foram obtidos utilizando-se 8 sub-regiões contendo 8 histogramas de 8 classes, ou seja, sendo o descritor ideal um vetor contendo 128 ( $4 \times 4 \times 8$ ) elementos.

O vetor de elementos de descritores é modificado para reduzir os efeitos da mudança de iluminação. Primeiramente, o vetor é normalizado e em seguida é feita uma mudança no contraste da imagem, em cada vetor é multiplicado por uma constante. A mudança no brilho da imagem, na qual uma constante é adicionada em cada pixel não irá afetar os valores dos gradientes, visto que eles são calculados das diferenças dos pixels. Desta maneira, o descritor é invariante a pequenas mudanças na iluminação. Contudo as mudanças de iluminação podem ocorrer devido à

saturação das câmeras ou devido a iluminação que atinge as superfícies 3D com diferentes orientações (LOWE, 2004).

Tais efeitos podem causar uma mudança significativa nas magnitudes relativas para alguns gradientes, porém afetam menos as suas orientações. O valor da influência das magnitudes significativas do gradiente pode ser reduzido aplicando-se um limiar, para que direções com magnitudes significativas dominem a representação do descritor. Lowe (2004), em seus experimentos, chegou ao valor de limiar de 0,2 e então o valor é renormalizado para a unidade de tamanho. De acordo com o autor esse valor foi obtido por meio de teste usando imagens com diferentes iluminações para o mesmo objeto tridimensional (LOWE, 2004).

Em cada imagem são construídos diversos descritores, cada um referente a um ponto chave, quando aplicamos o algoritmo SIFT, nessas imagens, temos como resultado um conjunto de descritores que serão utilizados para se fazer as correspondências entre essas duas imagens (LOWE, 2004).

#### 2.4.4.2 Matching – Busca de pontos homólogos em diferentes imagens

A estimativa de correspondências entre ponto-chaves pode ser empregada de inúmeras maneiras. De acordo com Lowe (2004), a melhor maneira de se realizar esse procedimento é realizar a correspondência entre pontos candidatos que possuam vetores descritores com a menor distância euclidiana entre si, já que de acordo com o autor, o melhor candidato a correspondência de um ponto-chave é o seu vizinho mais próximo na outra imagem da mesma cena (AMORIM, 2020).

Anteriormente a etapa dos cálculos da geometria epípolar entre os pares de imagens, faz-se necessário a utilização de rotinas para a eliminação de falsas correspondências, os *outliers*, dado que a determinação dos parâmetros da matriz fundamental não apresenta robustez a esses pontos. Esse cálculo é feito utilizando algoritmos como “*Random sample consensus*” (RANSAC).

Após as etapas da detecção e atribuição de correspondências entre os pontos-chave, e a filtragem para a remoção dos outliers, o próximo passo a ser realizado é a orientação relativa das imagens. De acordo com, Amorim (2020), na Visão Computacional este procedimento é realizado utilizando equações lineares deduzidas da Geometria Epípolar, tópico que será abordado nas próximas seções.

### 2.4.4.3 Bundle Adjustment

Conforme pode ser entendido do exposto anteriormente, a reconstrução tridimensional é um procedimento iterativo que realizado, tradicionalmente, com o uso de pares de imagens. Entretanto, no SfM a reconstrução tridimensional é realizada com um conjunto redundante de imagens que recobrem a mesma região, mas tomadas de diferentes posições e orientações, e com isso, os ruídos vão se acumulando, e os erros sistemáticos vão se propagando, e deste modo, precisam ser minimizados (MOONS ET AL., 2009). O procedimento utilizado para o ajuste global da estrutura 3D e para a otimização dos parâmetros de orientação da câmera é o *Bundle Adjustment*, já a metodologia do SfM foi desenvolvido no campo da Visão Computacional (TRIGGS ET AL., 2000).

O Bundle Adjustment, ou ajustamento por feixes, é aplicado na técnica SfM para estimar as posições e orientações da câmera, e a coordenadas tridimensionais de pontos homólogos chaves (pontos na região de "Von Gruber"), e adicionalmente os erros randômicos das medidas realizadas nas imagens são distribuídos. O *Bundle Adjustment* faz essa otimização minimizando o quadrado da soma da reprojeção dos erros na equação (29) (SNAVELY ET AL., 2008; SATTLER, 2013).

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_{ij} \|x_{ij} - P_i X_j\|_2^2 \quad (29)$$

em que  $P = K[R | \vec{T}]$  a matriz de projeção da câmera,  $K$  a matriz intrínseca,  $R$  a matriz rotação, e  $\vec{T}$  o vetor de translação,  $N$  e  $M$  os números de câmeras e de pontos 3D,  $v_{ij}$  é uma variável binária indicando a visibilidade do  $j$  – ésimo ponto  $X_j$  na  $i$  – ésima imagem, e  $x_j^i$  a projeção do ponto 3D de  $X_j$  na imagem observada no momento (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

A equação (29) mede o quadrado da soma das distâncias entre as localizações previstas e mensuráveis da imagem de uma reconstrução. De tal maneira que essa distância representa o quão corretamente às poses e a estrutura câmera relacionam-se com as informações das feições que estão nas imagens de entrada (AMISSE, 2016).

#### 2.4.4.4 CMVS e PMVS2

O conjunto de técnicas que estão envolvidas na aplicação do SfM geram uma nuvem esparsa de pontos que representam a superfície de interesse. O resultado pode ser melhorado utilizando técnicas de “*Multi-View Stereo*” (MVS) que englobam os algoritmos de densificação de nuvem de pontos, aumentando significativamente a densidade de pontos por unidade de área.

O “*Clustering for Multi-View Stereo*” (CMVS) é um programa de código aberto que possibilita a entrada de um conjunto de imagens com posições e calibrações da câmera, bem como as perspectivas e os marcadores de cada imagem tomada. O algoritmo do CMVS foi proposto e implementado por Furukawa *et al.*, (2010) e Furukawa e Ponce (2007) e funciona similarmente ao SfM, sendo que a extração de características nas imagens é realizada pelo algoritmo do SIFT. O CMVS tem suporte para dados de calibração da câmera (distância focal  $f$  e distorção radial  $k_1$  e  $k_2$ ) a partir dos dados EXIF, orientações de imagem usando o *bundle adjustment*.

O algoritmo do *Patch Multi-View Stereo* foi implementado por Furukawa; e Ponce (2007). O PMVS2 utiliza a nuvem esparsa de pontos 3D e associa-lhe uma maior densidade de pontos, gerando como resultado uma nuvem mais densa de pontos, criando assim a nuvem de pontos final da superfície ou do objeto de estudo. Essa nuvem densa de pontos pode ser exportada e manipulada em outros programas para o refinamento desse tipo estudo, como o MeshLab, CloudCompare, MatLab, entre outros.

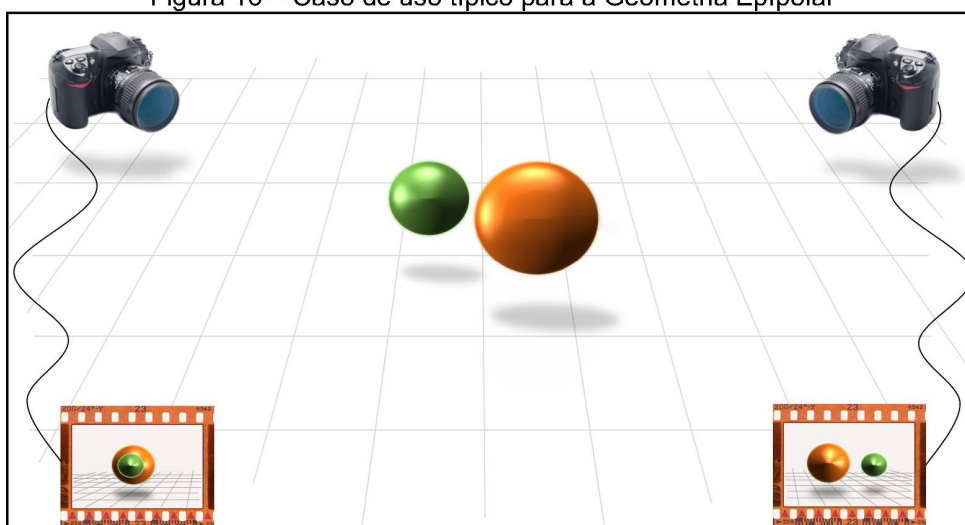
Resumidamente, nessa etapa do fluxo de trabalho, as posições da câmera derivadas do *Blunder* são utilizadas como entrada, e o CMVS decompõe as sobreposições das imagens de entrada em subconjuntos de tamanho gerenciável, enquanto o PMVS2 é utilizado independentemente para a reconstrução 3D dos dados desses subconjuntos individuais (WESTOBY *et al.*, 2012). Os resultados desse processamento adicional para densificação traz um aumento significativo na densidade dos pontos, de duas a três ordens de magnitude (WESTOBY *et al.*, 2012).

## 2.5 GEOMETRIA EPIPOLAR

A Geometria Epíolar é um conceito da literatura que permite reduzir uma busca que seria realizada em duas dimensões para uma busca em uma dimensão.

Essencialmente, esse conceito muda a busca por um ponto correspondente em uma imagem (2D), para uma busca delimitada a uma linha específica (1D). A Geometria Epíolar tem como objetivo estabelecer as relações entre as imagens capturadas de dois ou mais pontos de vistas diferentes (MENDES, 2012). Em outras palavras, considerando duas câmeras, de dois pontos de vistas diferentes, a Geometria Epíolar tenta estabelecer as relações entre as imagens (Figura 16).

Figura 16 – Caso de uso típico para a Geometria Epíolar



Fonte: O autor (2021)

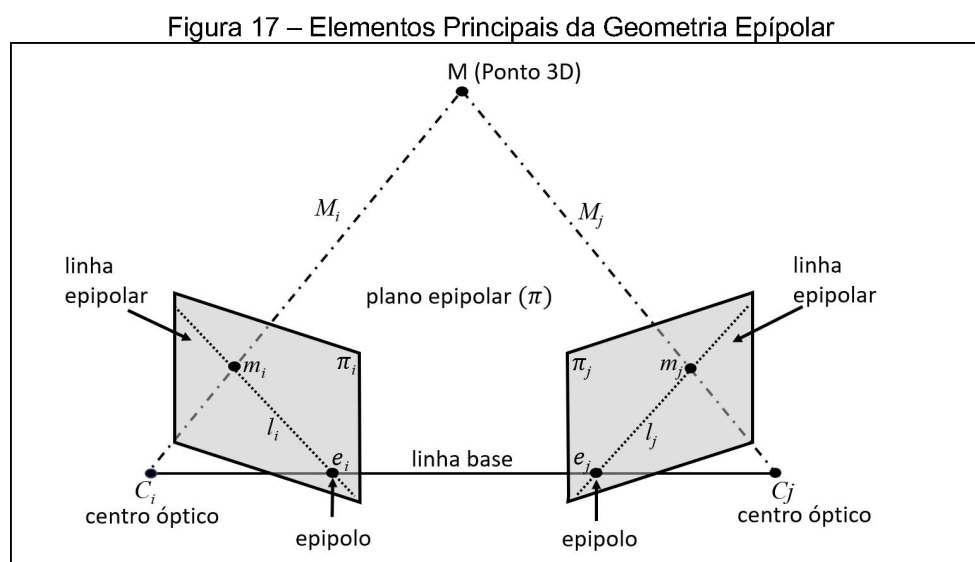
As coordenadas tridimensionais de pontos de interesse podem ser recuperadas com informações presentes em mais de uma imagem, assim como o movimento relativo, respectivos, entre as posições da câmera. A reconstrução da estrutura e do movimento pode ser feita utilizando duas câmeras que visualizam uma mesma cena simultaneamente, que é o mesmo princípio da visão estéreo, ou através de duas imagens de uma mesma cena capturada pelo mesmo sensor em diferentes posições e orientações, tendo sua estrutura e movimento determinados (MENDES, 2012).

Os dois processos descritos acima somente são possíveis de ocorrer devido às restrições geométricas entre as diferentes projeções nas imagens de um mesmo ponto no espaço objeto (3D), presente naquela cena capturada pelo sensor (MENDES, 2012). As diferentes projeções mencionadas são obtidas visualizando a mesma cena sobre duas perspectivas diferentes (Figura 16). A Geometria Epíolar, que restringe pontos em duas imagens, pode ser utilizada para recuperar o movimento relativo entre duas diferentes poses da mesma câmera relacionadas com a imagem tomada, bem como a estrutura dessa cena tridimensional capturada. A recuperação



do movimento e da estrutura da cena é feita pelos parâmetros internos da câmera e pelas correspondências obtidas das imagens, independentemente da cena visualizada.

Dada um par de imagens, um ponto  $M$  qualquer, do espaço 3D define um plano  $\pi$  que contém o ponto  $M$  e os centros óticos  $C_i$  e  $C_j$  das duas câmeras (Figura 17).



Fonte: Adaptado de AMISSE (2016 apud HARTLEY e ZISSERMAN, 2004)

O plano  $\pi$  é designado como plano epipolar e as linhas que intersectam este plano com os planos das imagens de cada câmera são  $l_i$  e  $l_j$  são definidas por linhas epipolares conjugadas. Os epípolos  $e_i$  e  $e_j$  correspondem, de maneira respectiva, à interseção das linhas epipolares  $l_i$  e  $l_j$  com a linha de base (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

Dado que o sistema de coordenadas da câmera com origem no centro ótico  $C_i$  é coincidente com o sistema de coordenadas do espaço objeto, então qualquer ponto que esteja no sistema de coordenadas da câmera com o centro ótico em  $C_j$  pode ser determinado por meio de uma rotação  $R$  e uma translação  $t$ . Dessa maneira a expressão matemática de um ponto genérico  $M$  do espaço tridimensional, nos sistemas dessas duas câmeras é dada por:

$$M_i = [I \ 0]P \quad (30)$$

$$M_j = [R \ t]P \quad (31)$$

Em que  $I$  é a matriz identidade,  $0$  é um vetor nulo e os vetores  $M_i$  e  $M_j$  contém as coordenadas dos pontos de emparelhamento entre ambas as imagens,  $m_i$  e  $m_j$  nos sistemas de coordenadas das respectivas câmeras. O produto vetorial a seguir, resulta em zero pois três  $(\overrightarrow{C_i M_i}, \overrightarrow{C_i C_j}, \overrightarrow{C_j M_j})$  vetores são coplanares

$$\overrightarrow{C_i M_i} (\overrightarrow{C_i C_j} \times \overrightarrow{C_j M_j}) = 0 \quad (32)$$

Considerando o sistema de coordenadas da câmera de centro ótico  $C_i$ , a equação (32) pode ser reformulada nos seguintes termos:

$$M_i = (t \times (RM_j)) = 0 \quad (33)$$

em que  $t$  é o vetor de translação entre as duas imagens dado por:  $(t = t_x, t_y, t_z)$ , a partir da qual definimos a matriz antissimétrica  $[t_x]$ :

$$[t_x] = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Podemos reescrever a equação (31) e, então, derivar a matriz essencial  $E$ :

$$E = [t_x]R \quad (35)$$

A matriz essencial (3X3) é uma simplificação da matriz fundamental através das normalizações das coordenadas. Seus nove coeficientes são apenas definidos por uma escala, e podem ser parametrizados pelos três graus de liberdade da matriz de rotação  $R$  e os dois graus de liberdade definido a direção do vetor de translação  $t$ .

Unindo as equações (33) e (35) chega-se a uma relação que incorpora a matriz essencial  $E$  (HUANG, 1989; LONGUET-HIGGINS, 1981).

$$M_i^T E M_j = 0 \quad (36)$$

Em casos que as câmeras não estão calibradas, modificações são impostas sobre os vetores  $M_i$  e  $M_j$ . Neste caso,  $m_i = W_i M_i$  e  $m_j = W_j M_j$ , sendo  $W_i$  e  $W_j$  as matrizes de calibração dos pontos emparelhados entre as duas imagens estéreo. Da equação (36), chegamos à matriz fundamental, de dimensão  $3 \times 3$   $F_{i,j}$ :

$$m_i^T F_{i,j} m_j = 0 \quad (37)$$

em que,  $m_i$  e  $m_j$ , estão sobre as linhas epipolares e  $l_i$  e  $l_j$ , são definidos por:

$$l_i = F_{i,j} m_j \quad (38)$$

$$l_j = F_{i,j} m_i \quad (39)$$

Luong e Faugeras (1996) mostram que a partir de (37) pode-se obter a matriz fundamental através da matriz essencial:

$$F_{i,j} = W_i^{-T} E W_j^{-1} \quad (40)$$

A matriz  $F_{i,j}$  é calculada utilizando um certo número de correspondências iniciais entre os pontos de vista  $i$  e  $j$ . Nas configurações mais gerais da câmera  $F_{i,j}$  tem 8 parâmetros desconhecidos e cada uma dessas correspondências constitui uma restrição sobre esses parâmetros. Com mais de 8 parâmetros gera-se um sistema sobre determinado de equações, a ser resolvido usando métodos robusto como, por exemplo, o algoritmo de 8 pontos, o RANSAC, entre outros (ZHANG; LOOP, 2001).

### 3. MATERIAIS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.1 ESTAÇÃO TOTAL E RECEPTOR GNSS

A estação total utilizada para o levantamento de campo dos pontos nas cumeeiras e bordas dos telhados foi uma estação Topcon, modelo GM-55 TOPBASIC (Figura 18). A Tabela 4 mostra de forma resumida as especificações da estação total.

Tabela 4 – Especificações TOPCON GM-50 Series

<b>Medição de ângulo</b>	
Resolução mínima/precisão	2"/5"
Unidade mínima de leitura	1"/5" (0,0002/0,01gon, 0,005/0,02 mil)
Duplo compensador	Compensador líquido de eixo duplo, Faixa de compensação: $\pm 6'$
<b>Medição de distância</b>	
Alcance com prisma	4.000m
Precisão com prisma	1.5mm + 2 ppm
Alcance sem prisma	500m
Precisão sem prisma	2.0mm + 2 ppm (0.2 – 200 m)
Tempo de medição	Fino: 0,9 s Rápido: 0,6 s Rastreio: 0,4 s
<b>Comunicação</b>	
BlueTooth classe 1,5	Alcance até 10m
Memória Flash USB	Máximo 32GB
Serial RS232C, USB2.0	Tipo A para memória USB
<b>Geral</b>	
Display	LCD, 192 x 80 pontos, (Selecionável) / Teclado alfanumérico/ 28 teclas com iluminação
Autonomia de bateria	Até 14 horas
Proteção contra poeira / água	IP66
Temperatura de operação	-20°C até 60°C

Fonte: Adaptado de Topcon Corporation (2019)

Figura 18 – Estação Total TOPCON GM-50 Series



Fonte: Topcon Corporation (2019)

O receptor GNSS utilizado para a obtenção das coordenadas Geodésicas marca Topcon, modelo Hiper SR, capaz de rastrear até 112 satélites (Figura 19). A Tabela 5 mostra de forma resumida as especificações do receptor utilizado.

Tabela 5 – Especificações Topcon HIPER SR

<b>Rastreamento GNSS</b>	
<b>Número de canais</b>	226, capaz de rastrear até 112 satélites
<b>Sinais rastreados</b>	L1, L2, L2C, GPS, GLONASS, SBAS, QZSS
<b>Tipo de antena</b>	Antena integrada com tecnologia Fence Antenna™
<b>Precisão</b>	
<b>Estática/Estática Rápida</b>	H: 3.0 mm + 0.4 ppm V: 5.0 mm + 0.6 ppm
<b>RTK</b>	H: 10 mm + 0.8 ppm V: 15 mm + 1.0 ppm
<b>GPS Diferencial</b>	A: 0,4 m, V: 0,6 m
<b>Comunicação</b>	
<b>Comunicações de E/S</b>	Bluetooth®, Longlink (alcance de 300 metros)
<b>Celular</b>	Integrated HSPA+/CDMA
<b>Memória</b>	
<b>Memória</b>	2 GB internos
<b>Geral</b>	
<b>Autonomia de bateria</b>	Até 20 horas
<b>Proteção contra poeira / água</b>	IP67
<b>Temperatura de operação</b>	-20 °C a 65 °C

Fonte: Adaptado de Topcon Corporation (2021)

Figura 19 – Topcon Hiper SR GNSS PP



Fonte: Topcon Corporation (2021)

### 3.2 SISTEMA LASER SCANNER PEGASUS HD500

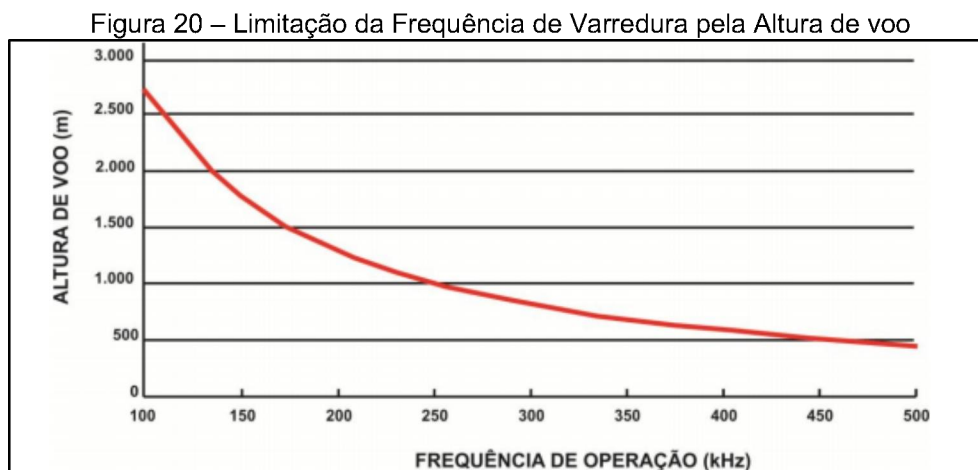
O equipamento utilizado na pesquisa foi o Laser Scanner Optech Pegasus HD500 (Figura 20), tem uma Unidade de Medida Inercial (UMI) Applanix POS AV 510. A acurácia absoluta do UMI é de  $<0,1\text{m}$  posicional, de  $<0,005^\circ$  em *Roll* e *Pitch* e de  $<0,008$  em *Yaw*. A densidade média de coleta de pontos do sistema é de 6 pontos/ $\text{m}^2$ , mais detalhes da especificação técnica ver Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações ALTM PEGASUS HD500

DESCRIÇÃO DO SISTEMA	CARACTERÍSTICAS
Modelo do equipamento	ALTM PEGASUS HD500
Fabricante do equipamento	Optech Incorporated
Ano de fabricação	2012
Frequência do pulso laser	Variável 100 - 500 kHz
Frequência de varredura	Variável 0 - 140 Hz efetivo
Ângulo de varredura (FOV)	Variável de $0^\circ$ a $\pm 65^\circ$
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix AV-POSView (Applanix Corporation)
Receptor GNSS	220-channel dual frequency GPS/GNSS/Galileo/L-Band
Capacidade de armazenamento	36 Gigabytes
Software da operação de voo	Optech FMS Planne
Software do processamento	Optech LMS
Digitizer Data Acquisition Recording Program	Digitizer Data Retrieval Program
Tipo de coleta de dados	Multipulso (múltiplos retornos) e modo Full-Waveform
Intensidade	Até 4 retornos de Intensidade para cada pulso Registro de Intensidade 12 bits
Divergência do pulso	0.25 mrad
Comprimento de onda do laser	1064 nm (Classe IV – FDA CFR 21)
Altura operacional	300 – 2.500 m (Nominal) (3.500 m Operacional)

FONTE: Adaptado de OPTECH (2020)

Na Figura 20 é demonstrado a variação da frequência que podem propiciar mais de 20 pontos por metro quadrado, esta variação está conectada diretamente da altura de voo.



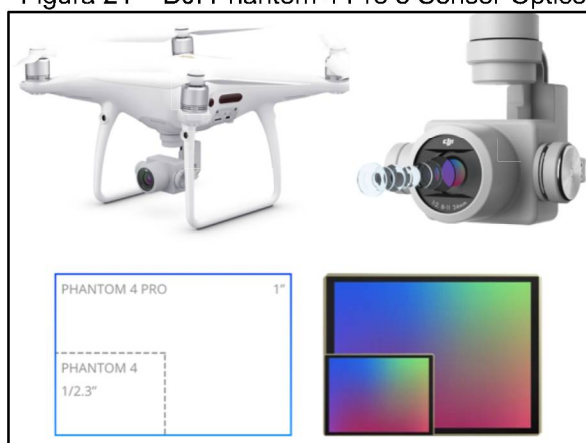
FONTE: Adaptado de (HAINOSZ, 2012)

Os voos para aquisição dos dados LiDAR utilizados na pesquisa foram realizados em duas épocas diferentes, sendo a primeira coleta no mês de Agosto de 2012 e a segunda coleta em Outubro 2019. A configuração dos voos foram as seguintes: direção das faixas no sentido Norte-Sul e Sul-Norte. A sobreposição das faixas foi de aproximadamente 45% lateralmente. A altura dos voos foi de 1.600 metros para a primeira coleta, realizado pela empresa Fiducial Engenharia e Aerolevanteamento, e 1.000 metros para a segunda coleta, realizado pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC), tendo aproximadamente a densidade de 4 ptos/m<sup>2</sup> e 6 ptos/m<sup>2</sup>, respectivamente.

### 3.3 VEÍCULO ÁEREO NÃO TRIPULADO

Para a aquisição das imagens aéreas da pesquisa foi utilizado um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) da empresa DJI, modelo Phantom 4 Pro, com quatro rotores e autonomia de voo máxima de 30 minutos. Esse VANT possui uma câmera digital, modelo FC6310, com sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) de 1" (5472 × 3648 pixels), com tamanho do pixel de 2,41 x 2,41 μm e distância focal nominal de 8,8 mm, ver Figura 21.

Figura 21 – DJI Phantom 4 Pro e Sensor Óptico

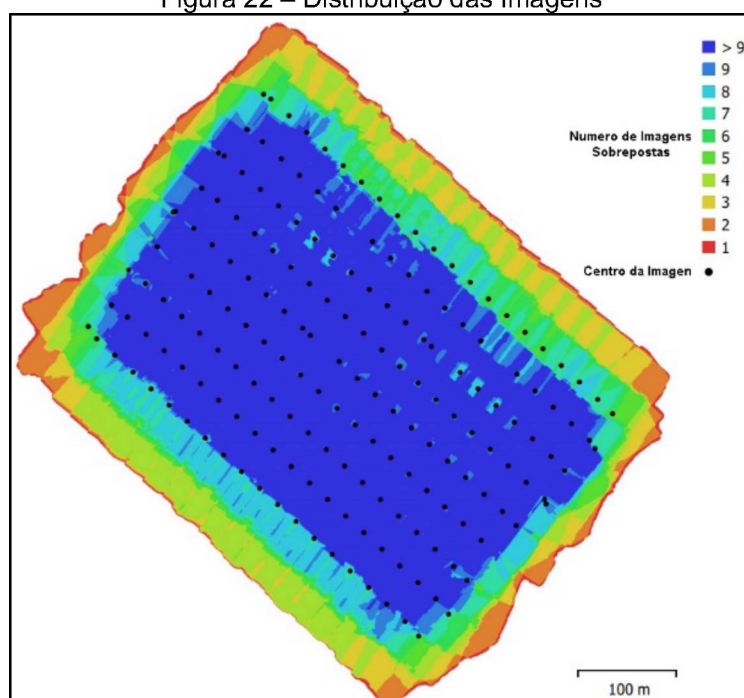


FONTE: Adaptado de DJI (2021)

As imagens digitais da pesquisa foram obtidas com uma altura de voo de 114 m, com resolução espacial de 2,6 cm, ou comumente conhecida como “*Ground Sample Distance*” (GSD). Foram coletadas 181 imagens digitais com sobreposição lateral e frontal de 80%, em nove faixas de voo e constituído um bloco fotogramétrico com área de 0,25 km<sup>2</sup> (Figura 22).

Na Figura 22 podemos observar que na área azul é onde existem mais pontos de ligação fotogramétrica e este são observados no mínimo nove vezes, pois existem inúmeras imagens com recobrimento superior a 80%. Logo, na periferia (área vermelha) praticamente não apresentam pontos de ligação.

Figura 22 – Distribuição das Imagens



FONTE: O autor (2021)



Para o processamento da nuvem de pontos e da ortofoto utilizou-se o processamento fotogramétrico com a técnica SfM, contida no programa Agisoft Metashape Professional v 1.6.4.10928 instalado em um computador com um sistema operacional Windows 10 de 64 bits, memória RAM com 8 GB, processador Intel® Core™ i7-8550U (cache de 8 M, até 4,00 GHz), e unidade de processamento gráfico (GPU) compartilhada Intel(R) UHD Graphics 620 e uma placa de vídeo Nvidia GeForce 930MX.

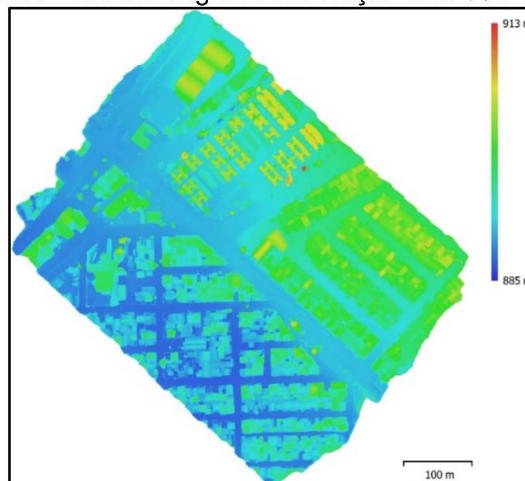
Deste processamento fotogramétrico com a técnica SfM, obteve-se os seguintes produtos: ortofoto da segunda área de pesquisa, Figura 23, que será utilizada para apoio visual; e a nuvem de pontos, “*Point Cloud Data*” (PCD), que será utilizada para a integração com o a nuvem LiDAR, “*Point Cloud LiDAR*” (PCL), com densidade aproximada de 93 ptos/m<sup>2</sup>, Figura 24.

Figura 23 – Ortofoto com Resolução Espacial de 2,6 CM



FONTE: O autor (2021)

Figura 24 – Modelo Digital de Elevação com 93 PTOS/M<sup>2</sup>



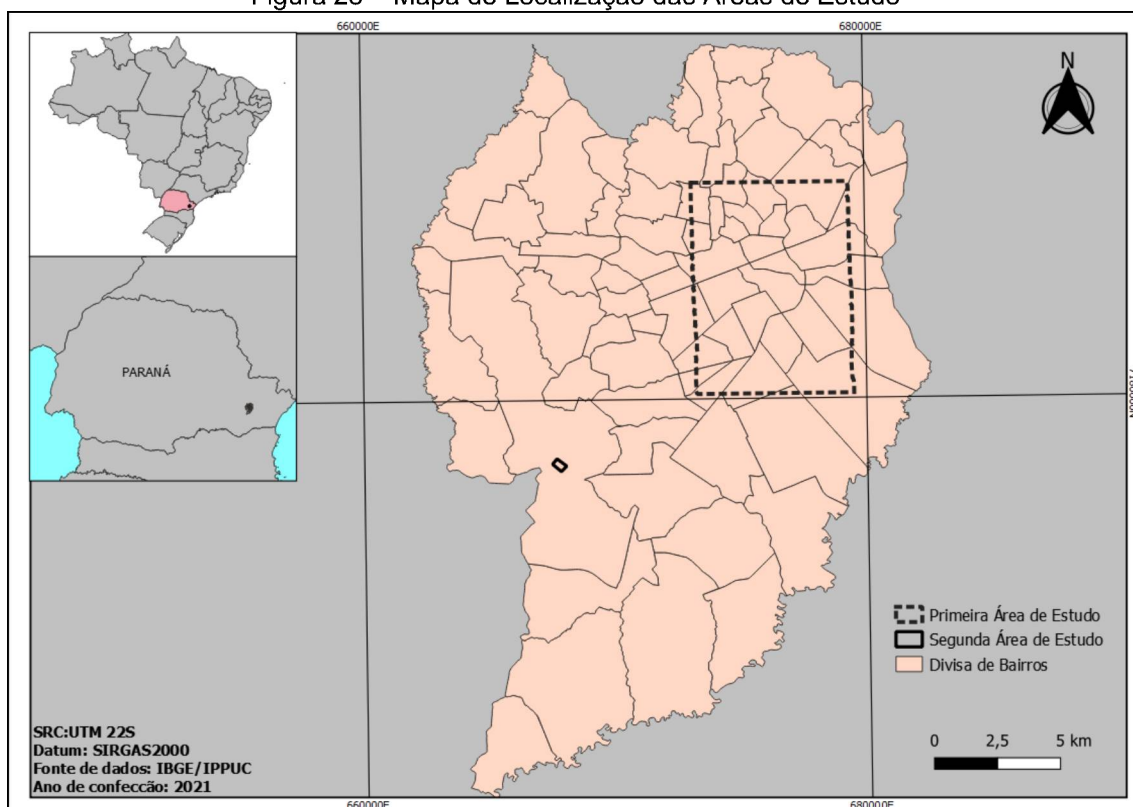
FONTE: O autor (2021)

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

Para a realização dessa pesquisa foram selecionadas duas áreas de estudo (Figura 25):

1. **Primeira área de estudo**, utilizada para o desenvolvimento da metodologia de obtenção dos pontos de controle em nuvem de pontos LIDAR (voo 2012) e sua validação por topografia em campo. Para isto foram utilizados telhados de edificações;
2. **Segunda área de estudo**, utilizada para o desenvolvimento da metodologia de integração das nuvens de pontos obtidas pelo LiDAR (voo 2019) e pelo VANT (voo 2020) com o processamento fotogramétrico utilizando a técnica SfM.

Figura 25 – Mapa de Localização das Áreas de Estudo

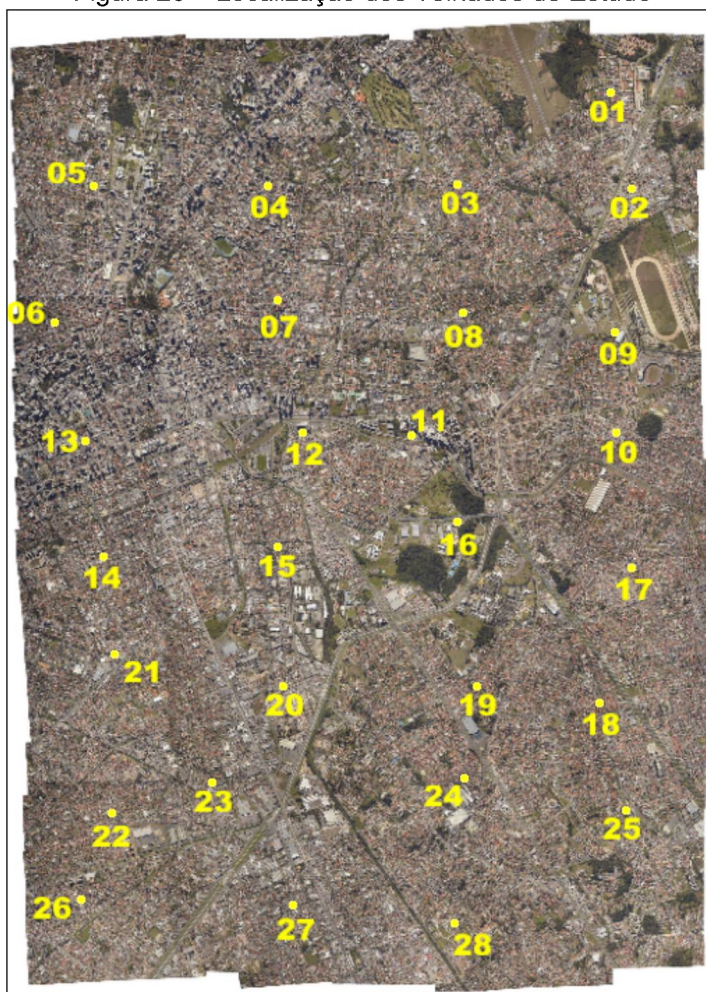


FONTE: O autor (2021)

#### 4.1 PRIMEIRA ÁREA DE ESTUDO

A Figura 26 ilustra a área de estudo em detalhes e a localização dos 28 telhados utilizados para a definição da metodologia de obtenção e validação dos pontos de controle em nuvens de ponto LiDAR. A área está localizada no Município de Curitiba, Estado do Paraná, com 76 km<sup>2</sup>, possui recobrimento aéreo LiDAR com densidade de 4 ptos/m<sup>2</sup>, obtido em agosto de 2012.

Figura 26 – Localização dos Telhados de Estudo



FONTE: O autor (2021)

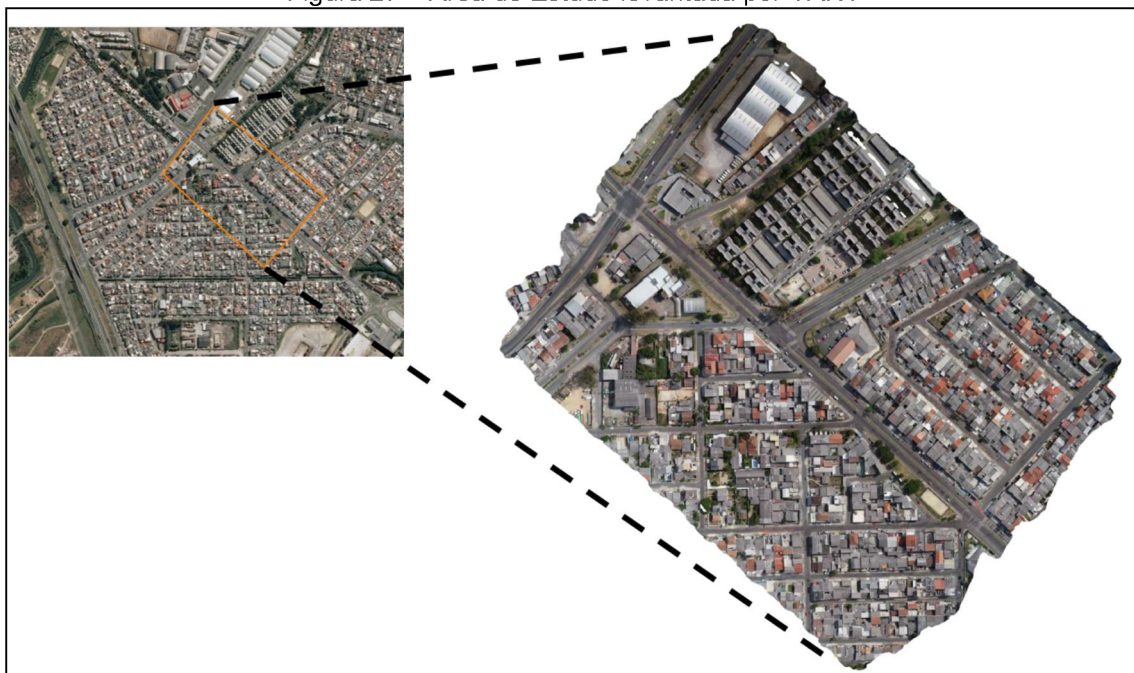
#### 4.2 SEGUNDA ÁREA DE ESTUDO

A Figura 27 ilustra com detalhes a área de estudo utilizada para a definição da metodologia de integração das nuvens de pontos obtidas pelo LiDAR e pelo VANT com processamento SfM. O levantamento aéreo realizado, localiza-se na zona urbana

do município de Curitiba, Estado do Paraná, com 0,25 km<sup>2</sup>. Os dados LiDAR e VANT desta área foram obtidos em outubro de 2019 e setembro de 2020, respectivamente.

O polígono em cor alaranjada, na parte a esquerda da Figura 27, delimita o perímetro da área de estudo de obtenção da nuvem de pontos VANT, e na parte a direita mostra em maiores detalhes essa mesma área.

Figura 27 – Área de Estudo levantada por VANT

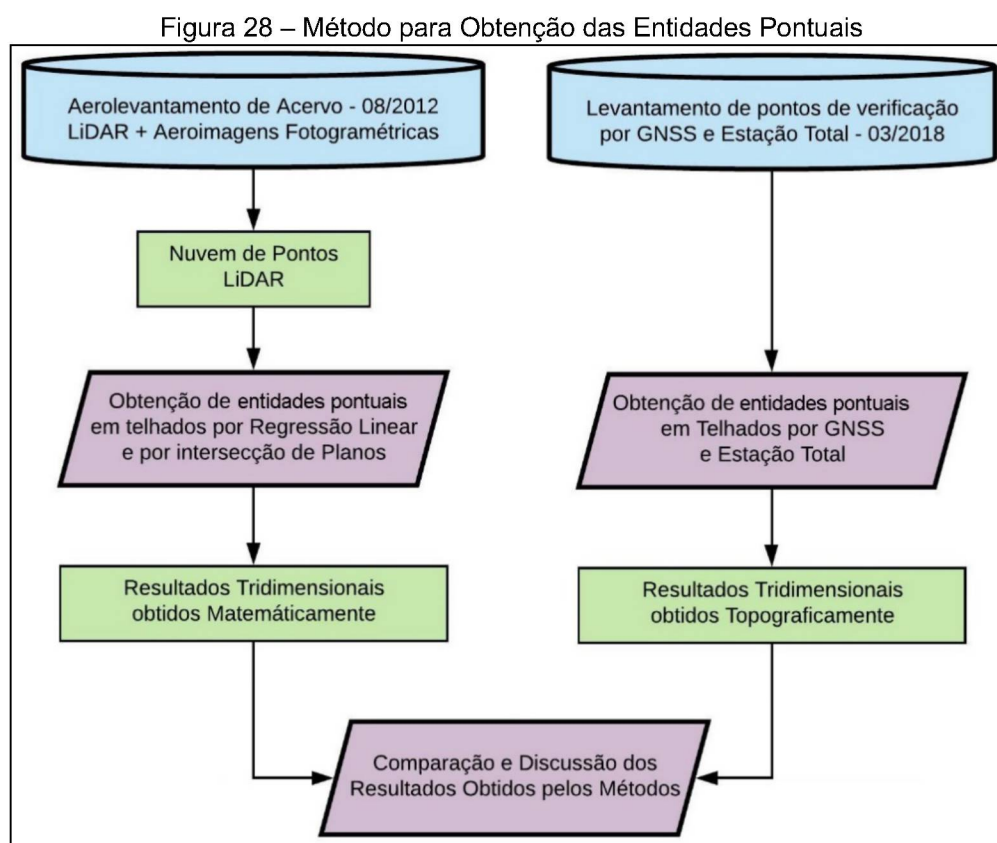


FONTE: O autor (2021)

## 5. MÉTODOS

### 5.1 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

A Figura 28 mostra as etapas da metodologia empregada para a obtenção e validação dos pontos de controle, ou seja, obtenção das entidades pontuais em nuvens de pontos LiDAR para a utilização destas como apoio fotogramétrico. Os materiais utilizados nessa etapa foram os descritos nos tópicos 3.1 e 3.2.

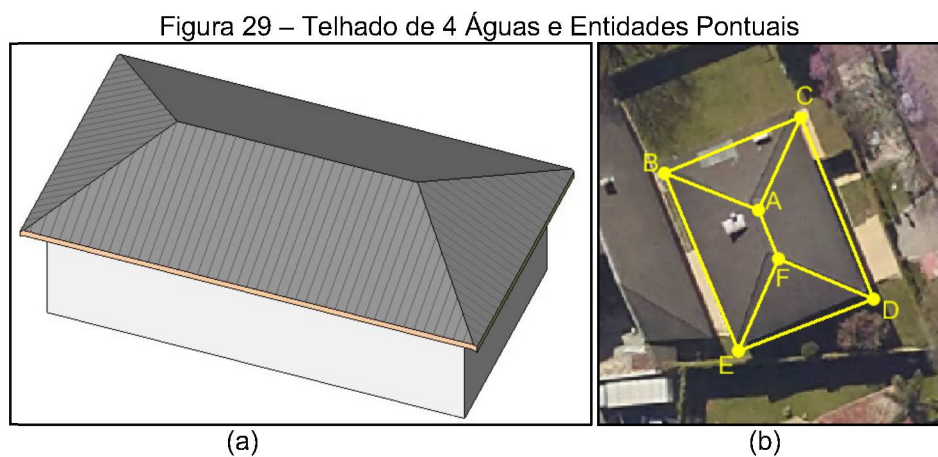


FONTE: O Autor (2021)

#### 5.1.1 Extração de Pontos para a Determinação dos Segmentos de Retas

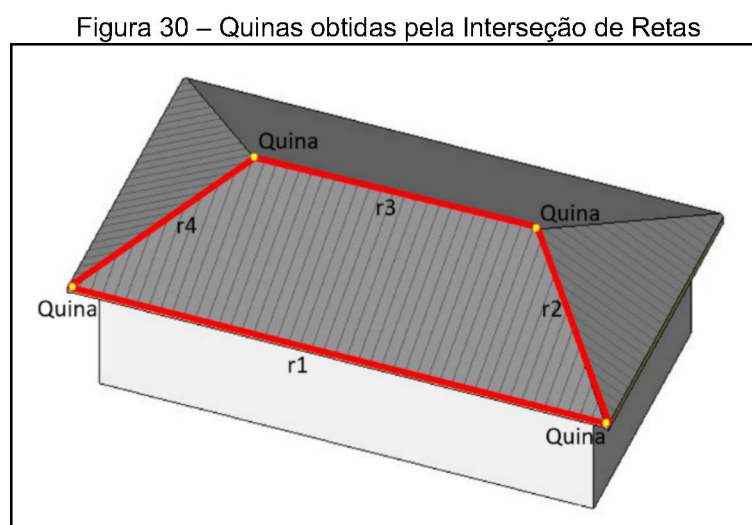
As extrações das entidades pontuais nessa pesquisa foram realizadas utilizando a interseção de retas determinadas pela Regressão Linear, onde foram selecionados um total de 28 coberturas, da primeira área de estudo, de edificações com telhados de 4 águas (Figura 26). Em cada cobertura das edificações, foram identificados nove segmentos de retas, sendo quatro, segmentos que representam os

vértices das bordas dos telhados (B, C, D, F) e um segmento que é definido pelos vértices da cumeeira (A, F). A Figura 29 (a) ilustra um exemplo dos telhados selecionados para o levantamento das entidades pontuais e a Figura 29 (b) ilustra a representação das seis entidades pontuais no telhado.



FONTE: O Autor (2020)

Considerando o contexto da extração automática de feições, a obtenção de segmentos de retas são tarefas importantes para a pesquisa. Estes segmentos no espaço 3D foram extraídos utilizando a regressão linear nos pontos da nuvem LiDAR. A partir da determinação de segmentos de retas e de sua intersecção (segmentos de retas concorrentes) pode-se, também, obter entidades pontuais. Fisicamente, essas entidades pontuais podem ser consideradas como pontos de quinas, como os apresentados na Figura 30.



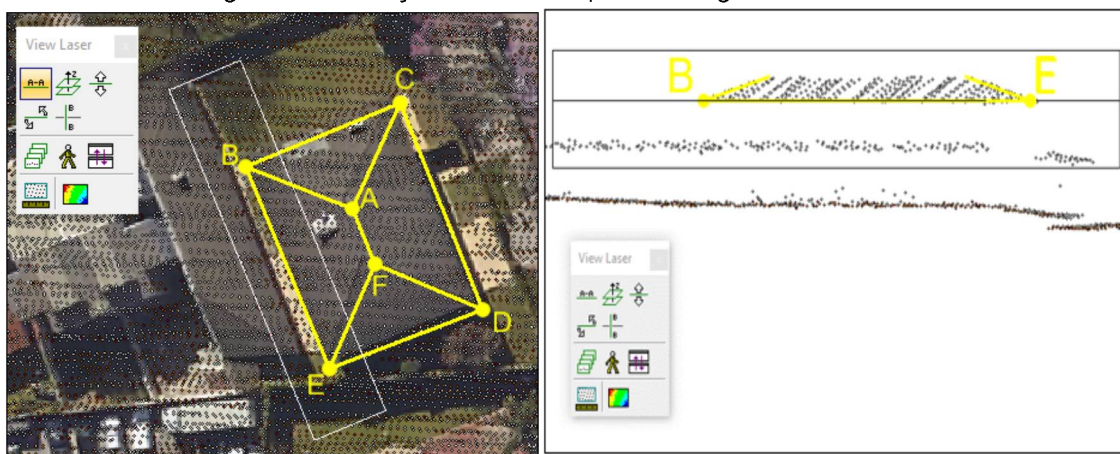
Fonte: O autor (2020)

Comumente no conjunto de pontos, obtido pelo sistema LiDAR, os segmentos de retas podem ser derivados por procedimentos matemáticos, e geralmente representam as bordas dos objetos tais como cumeeiras, bordas de telhados, prédios e viadutos.

A segmentação é a operação, que particiona, isola ou destaca objetos de mesma característica. Esse processo é entendido como uma subdivisão, de acordo com certas condições, dos objetos ou regiões que compõem os dados de estudo. O processo de segmentação semiautomática realizado na nuvem de pontos LiDAR utilizado nesta pesquisa é baseado em crescimento de região e tem o objetivo de agrupar sub-regiões com características semelhantes das bordas e cumeeiras dos telhados de estudos.

Após selecionados os telhados na nuvem de pontos LiDAR, em formato “.LAS”<sup>4</sup>, estes passaram pelo processo de segmentação no software *Microstation*, juntamente com a aplicação *TerraScan*<sup>5</sup>. Esses pontos segmentados nos telhados representam as retas que compõem as bordas e cumeeira. Esta ferramenta permite a interpretação visual das regiões de crescimento de interesse, ver Figura 31.

Figura 31 – Seleção dos Pontos para os Segmentos de Retas.



Fonte: O autor (2021).

<sup>4</sup> Maiores detalhes consultar o arquivo com as especificações do formato “.LAS”, disponibilizado na página oficial da ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing).

<sup>5</sup> TerraScan é a principal aplicação da família do software TerraSolid para o processamento de nuvens de pontos LiDAR.

### 5.1.2 Obtenção das Entidades Pontuais via Regressão com Interseção de Reta

As entidades pontuais determinadas por Regressão Linear e Interseção de Retas são os pontos A e F, pontos da cumeeira do telhado, e os pontos (B, C, D e E), quinas da borda do telhado, conforme mostrado na Figura 29.

De forma geral, a regressão linear é uma abordagem para modelar a relação entre uma resposta escalar (variável dependente) e uma ou mais variáveis explanatórias (variável independente). As relações entre as variáveis são modeladas usando funções de predição linear cujos parâmetros de modelos desconhecidos são estimados, diretamente, dos dados. Os modelos de Regressão Linear são ajustados usando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). O modelo da Regressão Linear Simples é descrito de acordo com uma equação de reta, onde,  $\alpha$  é coeficiente linear e  $\beta$  é coeficiente angular ou gradiente, conforme mostra na equação abaixo.

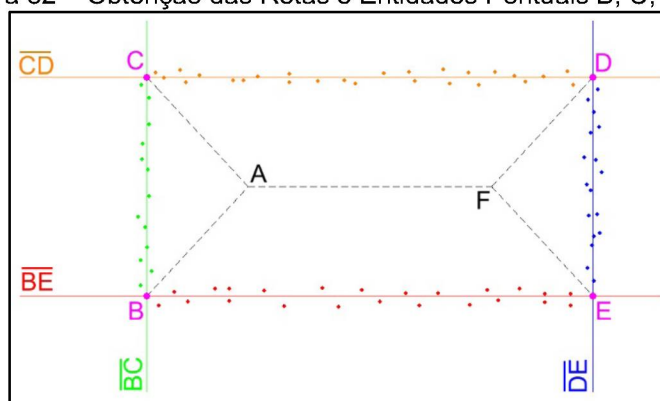
$$Y_i = \alpha + \beta X_i \quad (41)$$

Os pontos LiDAR, próximos das bordas dos telhados, foram obtidos com o processo de seleção semiautomática de pontos, explicitado no item 5.1.1. Em posse desses pontos, e com o auxílio de software de planilha de cálculo, calculou-se a média das coordenadas altimétricas para os quatro segmentos de retas (BC, CD, DE, EB). Isso permitiu estabelecer a mesma altitude para os pontos das bordas dos telhados, bem como estabelecer o desvio padrão desses pontos que definem as bordas.

Após isso, as retas que definem as bordas do telhado são obtidas por regressão linear; adicionalmente, os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e o coeficiente de determinação  $R^2$ , de cada reta, são estimados. Salienta-se que o Coeficiente foi estimado para avaliar a qualidade da Regressão Linear ou o ajustamento da reta aos pontos laser tomados como sendo de borda. Com os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ , definidores das 4 retas, estimados pelas regressões, foi realizada a interseção de retas para a determinação das entidades pontuais das bordas do telhado, ver Figura 32.



Figura 32 – Obtenção das Retas e Entidades Pontuais B, C, D e E.

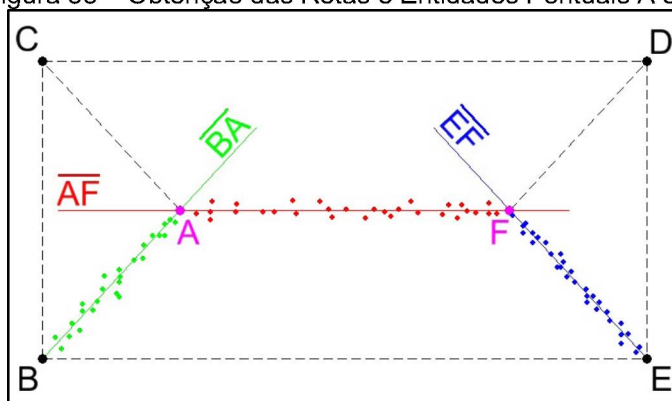


Fonte: O autor (2021).

Depois da determinação das coordenadas das bordas do telhado, a próxima fase é a determinação das coordenadas das entidades pontuais da cumeeira do telhado (A e F). Empregando o mesmo procedimento, utilizado na determinação das coordenadas das bordas, foi realizada uma seleção semiautomática dos pontos laser, próximos a reta que conecta as duas cumeeiras dos telhados (reta A-F).

Após essa seleção, como empregado nas bordas do telhado, foi calculada a média dos valores das coordenadas altimétricas desses pontos, o que permitiu estabelecer a mesma altitude para os pontos das cumeeiras dos telhados. Na sequência, a reta passante pelos pontos A e F são obtidas por regressão linear; adicionalmente, os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e o coeficiente de determinação  $R^2$ , como é no caso das bordas dos telhados. Com a estimação dessa reta e com as coordenadas dos pontos dos cantos dos telhados (B, C, D e E), já determinadas, as coordenadas tridimensionais dos pontos que definem as duas cumeeiras (A e F) são determinadas por interseção, ver Figura 33.

Figura 33 – Obtenção das Retas e Entidades Pontuais A e F.

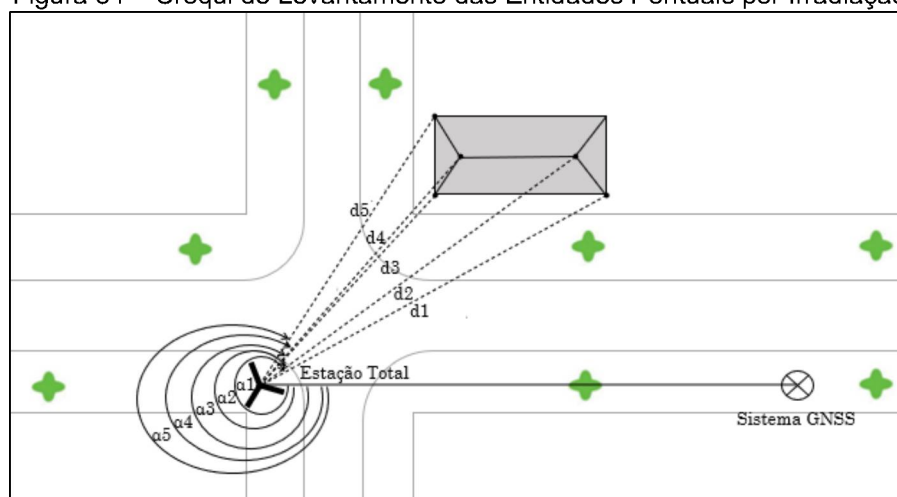


Fonte: O autor (2021).

### 5.1.3 Obtenção das entidades pontuais via Levantamento Topográfico

A interseção de retas obtidas por Regressão Linear e a Interseção de Planos foram as metodologias empregadas para a obtenção das entidades pontuais com suas coordenadas tridimensionais. Para verificar a qualidade dessas determinações, um levantamento topográfico foi realizado, utilizando uma Estação Total e um par de receptor GNSS. Este levantamento teve o objetivo principal de obter as entidades pontuais que serão empregados como sendo a verdade de campo ou pontos de verificação das coordenadas tridimensionais, obtidas com as metodologias propostas para a extração da entidade pontual em nuvem de pontos laser scanner. A Figura 34 ilustra o levantamento por irradiação topográfica executado em campo.

Figura 34 – Croqui de Levantamento das Entidades Pontuais por Irradiação



Fonte: O autor (2021).

Durante o levantamento de pontos em campo observou-se que a presença de elementos como árvores e cabos da rede elétrica do município prejudicaram a aquisição de dados, pois estes ficavam na linha de visada da estação. Desta forma, nem todos as quinas da borda do telhado foram levantadas. Salienta-se também, que nem todas as cumeeiras, das edificações utilizadas nesse estudo, foram mensuradas, pois a metodologia empregada no levantamento topográfico apresentou dificuldade de visada ou de localização precisa do detalhe pontual.

A Figura 35 e Figura 36 ilustram o procedimento de campo realizado para o levantamento dos pontos. A Figura 35 ilustra a instalação do receptor GNSS e da Estação Total para a utilização da técnica de Irradiação Topográfica, e a Figura 36 as

visadas das entidades pontuais, nas bordas e na cumeeira do telhado, respectivamente, da cobertura em questão.

Figura 35 – Levantamento Topográfico Convencional por Irradiação.



Fonte: O autor (2021).

Figura 36 – Leitura das Entidades Pontuais na Borda e Cumeeira



Fonte: O autor (2021).

#### 5.1.4 Avaliação das entidades pontuais pelo teste tendência e precisão

Uma das etapas mais importantes na extração de dados geoespaciais é a sua avaliação de qualidade. No Brasil o estimador, geralmente, empregado para essa finalidade é o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Nesta pesquisa, além do PEC, foi utilizada a análise estatística de tendência (t) e análise de precisão ( $\chi^2$ ).

##### 5.1.4.1 Análise de Tendência

A análise de tendência foi proposta como método de avaliação estatística complementar para a análise do PEC. Essa avaliação tem o intuito de verificar a precisão e a existência de tendência na análise de medições das coordenadas dos dados geoespaciais. A verificação da tendência existente é realizada utilizando a

análise de exatidão, que consiste na verificação de que a média das discrepâncias pode ser considerada igual a zero. As discrepâncias tridimensionais, neste estudo, são as diferenças de coordenadas, obtidas com as metodologias propostas e com as medidas em campo pelo levantamento topográfico proposto, consideradas como a verdade ou pontos de verificação (vide item 5.1.3).

O procedimento adotado para se aplicar a análise de tendência é a utilização do teste t de *student*, adequado para comparação de médias em um teste de hipóteses. Serão avaliadas as seguintes hipóteses:

$$H_0: \mu_{\Delta E, \Delta N, \Delta H} = 0 \text{ (Hipótese Nula)} \quad (42)$$

$$H_1: \mu_{\Delta E, \Delta N, \Delta H} \neq 0 \text{ (Hipótese Alternativa)} \quad (43)$$

O valor de  $\mu_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}$  correspondente a média das discrepâncias amostrais para o conjunto de pontos analisados  $(E_i; N_i; H_i)_{i=1}^n$ , sendo n igual ao número de pontos de verificação na amostra. O teste t de *student* é feito pelo cálculo da variável aleatória T equação (44) que possui distribuição t quando  $\mu$  tem distribuição normal. A hipótese nula equação (42) será aceita quando o valor de módulo de T calculado for menor que ao valor da distribuição t para um nível de significância  $\alpha$  e com n-1 graus de liberdade equação (45). Caso contrário a hipótese alternativa será aceita equação (43).

$$t = \frac{\mu_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}}{S_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}} \cdot \sqrt{n} \quad (44)$$

$$t < t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \quad (45)$$

#### 5.1.4.2 Análise do PEC

A segunda análise que foi realizada diz respeito à exatidão das coordenadas das entidades pontuais, determinadas por Regressão Linear e Interseção de Retas. Esta análise se baseia em comparar o desvio padrão da amostra com o erro padrão, previsto no decreto nº 89.817 de junho de 1984, ou com o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) definido, atualizado para o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) pela Diretoria do Serviço Geográfico em 2016 (DSG, 2016). Nesse estudo, os valores utilizados são os do PEC-PCD, Classe A (Tabela 7), tanto para a planimetria quanto para a altimetria.

Tabela 7 – Valores do PEC-PCD para a Classe A

Classe A				
	Planimetria (m)		Altimetria (m)	
Escala	$\sigma_{E,N}$	PEC	$\sigma_H$	PEC-PCD
1/1.000	0,17	0,28	0,17	0,27
1/2.000	0,34	0,56	0,17	0,27
1/3.000	0,51	0,84	0,20	0,32
1/4.000	0,68	1,12	0,26	0,41
1/5.000	0,85	1,40	0,34	0,54
1/6.000	1,02	1,68	0,44	0,69

Fonte: Adaptado de DSG (2016).

Para analisar a precisão utiliza-se de um teste de comparação entre são, a hipótese nula, em que o desvio padrão calculado ( $S_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}^2$ ) é igual ao desvio padrão preconizado ( $\sigma_{\chi}^2$ ) no decreto ET-PCDG, e a hipótese alternativa, em que o desvio padrão calculado ( $\sigma_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}^2$ ) é diferente do desvio padrão preconizado ( $\sigma_{\chi}^2$ ).

$$H_0: S_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}^2 = \sigma_{\chi}^2 \text{ (Hipótese Nula)} \quad (46)$$

$$H_1: S_{\Delta E, \Delta N, \Delta H}^2 \geq \sigma_{\chi}^2 \text{ (Hipótese Alternativa)} \quad (47)$$

O teste entre as variâncias feito com o cálculo da variável aleatória de teste equação (48), em que terá distribuição qui-quadrado ( $\chi^2$ ), quando a variável aleatória (discrepância das coordenadas nos três eixos) tem distribuição normal. O valor da variável de teste é então comparado com o valor tabelado  $\chi^2$  com um grau de liberdade ( $\nu - 1$ ) e nível de significância  $\alpha$  inequação (49). A hipótese nula equação (46) será aceita se a desigualdade se mantiver verdadeira, caso contrário a hipótese alternativa é aceita:

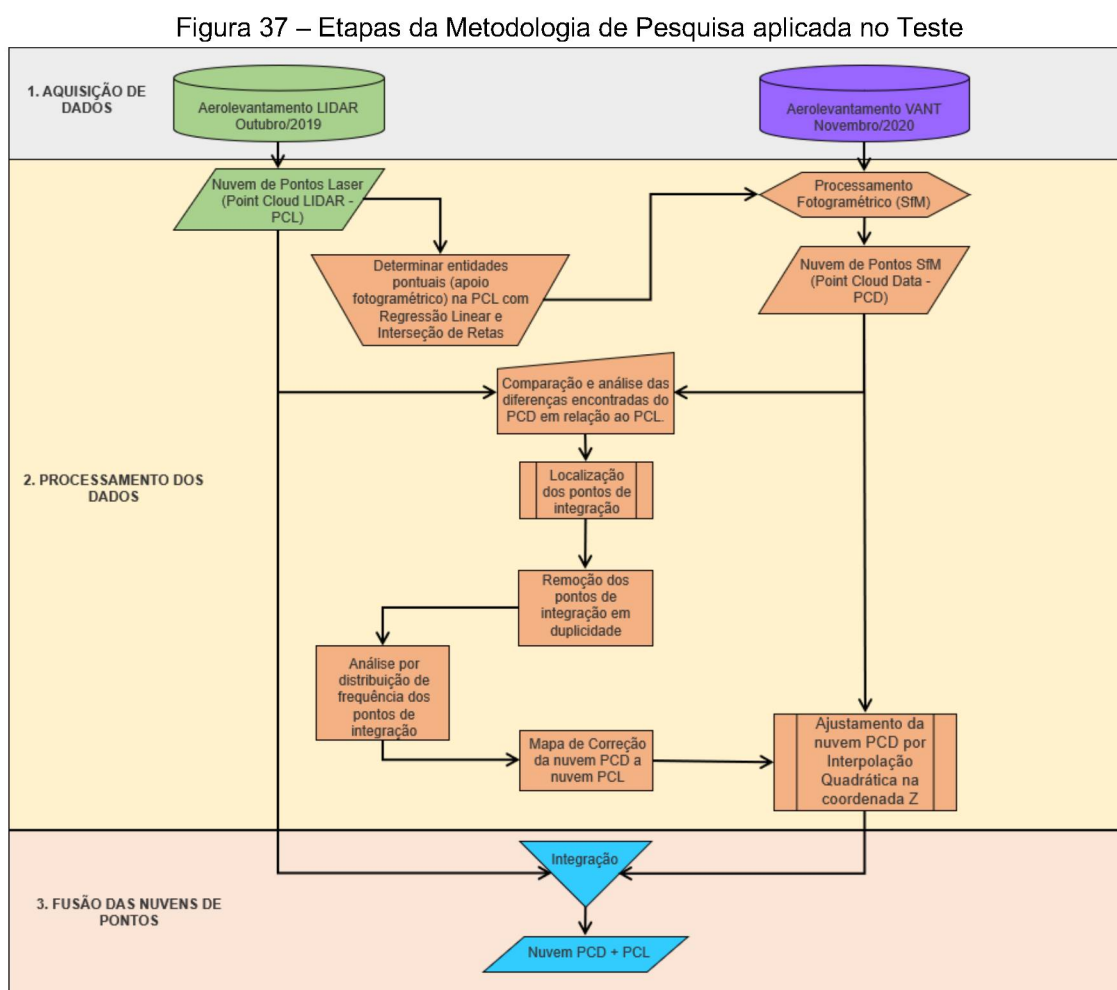
$$\chi_{E,N,H}^2 = (n - 1) \cdot \left( \frac{S_{\Delta E} \cdot \sqrt{2}}{\sigma_{\Delta E, N, H}} \right) \quad (48)$$

$$\chi_0^2 \leq \chi_{(\nu-1, \alpha)}^2 \quad (49)$$

## 5.2 METODOLOGIA PARA INTEGRAÇÃO DAS NUVENS LIDAR E VANT

Neste tópico será abordada a metodologia utilizada para a integração das nuvens de pontos obtidas pelo LiDAR e pelo VANT. Essas nuvens de pontos dos sistemas, respectivamente, são apresentadas nos tópicos 3.2 e 3.3.

A Figura 37 apresenta as etapas, em fluxograma, empregada para a realização da integração. Esse fluxograma foi dividido em três partes: a primeira parte é a aquisição de dados, a segunda parte é o processamento de dados, e a terceira parte, compreende a fusão das nuvens de pontos.



FONTE: O Autor (2021)

### 5.2.1 Aerolevantamento LiDAR e VANT

Do aerolevantamento LiDAR realizado em outubro de 2019 utilizou-se a nuvem de pontos, os detalhes técnicos estão no tópico 3.2, e para esta etapa da pesquisa a nuvem foi denominada de Point Cloud LiDAR (PCL) no formato “.LAS”.

Do aerolevantamento VANT realizado em novembro de 2020 utilizou-se as imagens digitais, no formato TIFF, os detalhes técnicos estão no tópico 3.3.

### 5.2.2 Processamento Fotogramétrico

Para o processamento fotogramétrico das imagens digitais com o SfM, o único parâmetro disponibilizado pelo fabricante do VANT é a distância focal de 8,8 mm. Dado isso, os Parâmetros de Orientação Interior (POI) não foram estabelecidos inicialmente, ou seja, foram deixados livres para que fossem estimados automaticamente no ajustamento realizado diretamente no software Agisoft Metashape, definido no tópico 3.3.

No processamento foi adotado o modelo de Conrady-Brown para a orientação interior do sensor, considerando, os POIs a serem determinados, que são os seguintes: a distância focal ( $f$ ), as coordenadas do ponto principal ( $x_0$ ,  $y_0$ ) e os coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ) e de distorção descentrada ( $p_1$  e  $p_2$ ).

As observações fotogramétricas dos pontos de ligação, ou seja, “*tie points*”, são feitas pelo algoritmo SIFT, mais detalhes sobre o algoritmo ver tópico 2.4.4, que possibilitam a identificação, correspondência e mensuração dos pontos homólogos. Esse algoritmo está implementado no processamento fotogramétrico utilizando a técnica SfM para a obtenção de nuvem de pontos no software Agisoft Metashape.

Visando a integração das nuvens de pontos LiDAR e VANT, principalmente na parte planimétrica, foram incluídos os 12 pontos de controle, ou seja, 12 entidades pontuais extraídas da nuvem LiDAR, no ajustamento (*bundle adjustment*), já que as imagens digitais do VANT foram observadas apenas as coordenadas do centro perspectivo ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ) dos Parâmetros de Orientação Externa (POE). Ver exemplo da obtenção das entidades pontuais na Figura 38.

Figura 38 – Obtenção das Entidades Pontuais



FONTE: O Autor (2021)

A figura abaixo (Figura 39) ilustra a posição dos pontos de controle (entidades pontuais) escolhidos como pontos de apoio para o processamento fotogramétrico SfM.

Figura 39 – Distribuição dos Pontos de Controle



FONTE: O Autor (2021)

Para não sobrecarregar o processamento foi definido o nível “Médio” para as observações dos “*tie points*”, ou seja, ainda seria possível obter mais pontos de ligação, porém apenas deixaria o processamento mais lento sem melhorias para o



processo. Estes pontos que darão origem a uma nuvem esparsa fotogramétrica. Após isso, a última parte do processamento da nuvem de pontos, consiste na densificação da nuvem de pontos, utilizando como inicialização a orientação do sensor e a posição tridimensional dos pontos obtidos na reconstrução tridimensional da superfície pelo SfM.

Esta densificação é feita com o uso do algoritmo de *Multi-View Stereo* (MVS), esse algoritmo possibilita o aumento do número de pontos em inúmeros graus de magnitude, comparativamente à nuvem esparsa, possibilitando uma reconstrução tridimensional da superfície com maior qualidade e menos ruídos.

Com essa densificação é gerada a nuvem de pontos VANT que será utilizada a partir desse ponto na pesquisa como "*Point Cloud Data*" (PCD) no formato ".LAS".

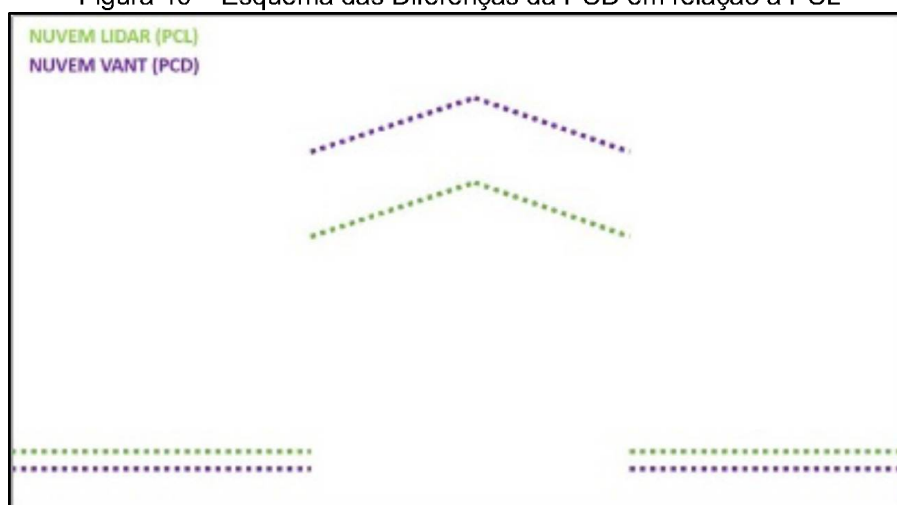
### 5.2.3 Comparação das diferenças entre PCD em relação à PCL

Com as duas nuvens de pontos, PCL e PCD, processadas a etapa que foi realizada a seguir consistiu na análise das diferenças encontradas entre ambas. Dado que a nuvem de pontos oriunda do LiDAR é considerada como a verdade de campo, ou seja, será tomada como referência. Desta maneira as operações a serem realizadas serão executadas sobre a nuvem de pontos oriunda do VANT.

Para a análise das diferenças das duas nuvens de pontos, foi realizada uma busca de uma maneira semiautomática, e deu-se por meio da verificação das diferenças apresentadas ao longo da PCD e em relação a PCL. A Figura 40 ilustra um esquema representativo das diferenças encontradas durante a análise realizada.

Como pode ser observado na Figura 40, as discrepâncias que ocorreram entre as duas nuvens, ficaram apenas no eixo altimétrico (coordenada Z), já que o alinhamento planimétrico foi realizado com a utilização dos pontos de controle obtidos pelas entidades pontuais na nuvem de pontos do LiDAR, ver tópico 5.1.

Figura 40 – Esquema das Diferenças da PCD em relação à PCL



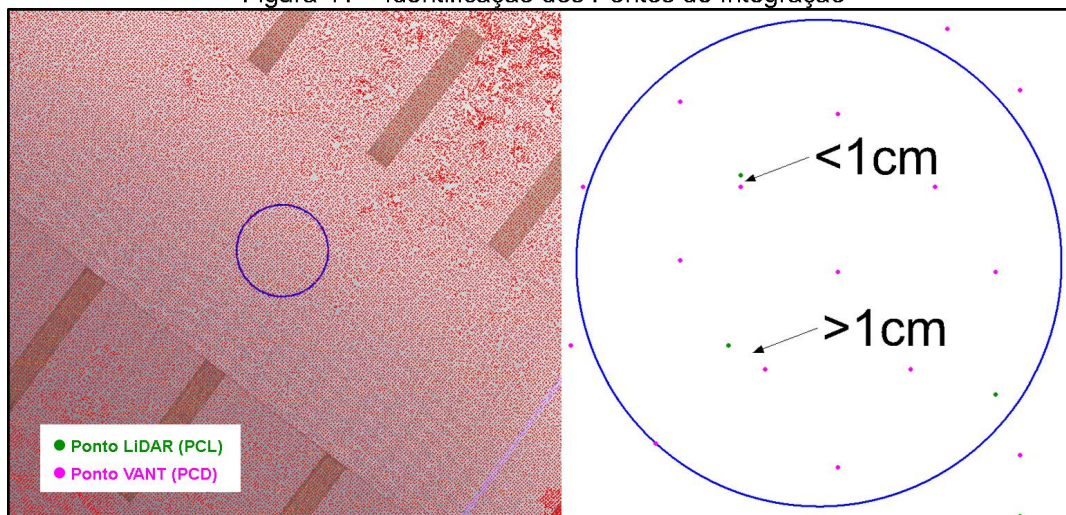
FONTE: O Autor (2021)

#### 5.2.4 Busca dos pontos de integração

Para dar continuidade as etapas propostas para a pesquisa, foi realizada a identificação automática de pontos na PCD que planimetricamente estavam muito próximos aos pontos da PCL.

O critério utilizado para definir a proximidade é que o ponto na PCD esteja próximo ao ponto da PCL no máximo a 1 cm (Figura 41), já que a precisão dos levantamentos está na ordem do centímetro. Desta maneira, a etapa consistiu na identificação de pontos na PCD que possuíssem as mesmas coordenadas planimétricas na PCL, ou seja, pontos coincidentes planimetricamente doravante chamados de integração.

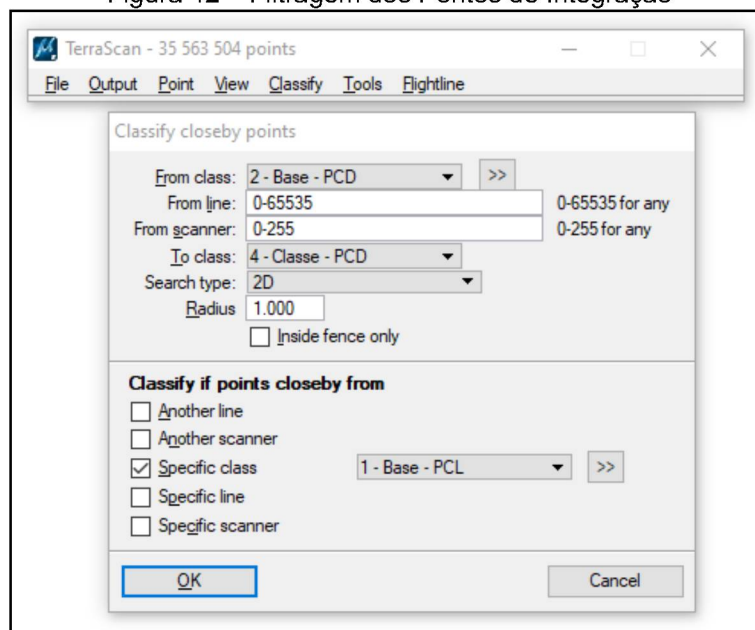
Figura 41 – Identificação dos Pontos de Integração



FONTE: O Autor (2021)

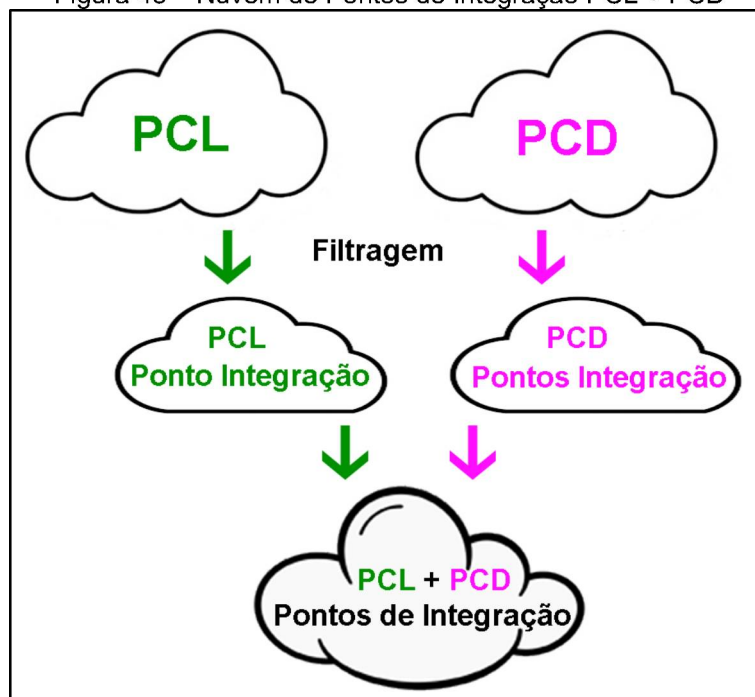
A filtragem dos pontos de integração na PCD e na PCL foram realizadas de maneira automática no software TerraScan (Figura 42) e retornou os valores das coordenadas planimétricas dos pontos de integração, os quais foram exportados para uma nova nuvem de pontos de integração PCL+PDC, ver Figura 43, e na Tabela 8 ilustra uma amostra desta nuvem de pontos de integração.

Figura 42 – Filtragem dos Pontos de Integração



FONTE: O Autor (2021)

Figura 43 – Nuvem de Pontos de Integração PCL + PCD



FONTE: O Autor (2021)

Tabela 8 – Amostra de pontos de integração localizados na PCD e na PCL

Pontos de Integração da PCL			Pontos de Integração da PCD		
E (m)	N(m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
667.432,06	7.177.176,20	887,50	667.432,06	7.177.176,20	887,72
667.432,26	7.177.170,66	887,71	667.432,26	7.177.170,66	888,09
667.432,73	7.177.179,25	887,46	667.432,73	7.177.179,25	889,10
667.436,64	7.177.176,68	887,60	667.436,64	7.177.176,68	887,85

FONTE: O Autor (2021)

### 5.2.5 Remoção dos pontos de integração em duplicidade

Nessa etapa da metodologia foi realizada a remoção da duplicidade de pontos de integração resultantes das nuvens PCD e PCL.

Com os pontos de integração da PCD e da PCL filtrados foi realizada uma análise nessa filtragem. Com essa operação foi possível observar que o resultado dos pontos oriunda do VANT, apresentou mais de um ponto com coordenadas iguais na planimetria, esse problema é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Pontos em duplicidade na nuvem de pontos de integração

LiDAR (PCL)			VANT (PCD)		
E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
667.441,68	7.177.225,61	887,39	667.441,68	7.177.225,61	887,63
667.442,25	7.177.226,76	887,40	667.441,68	7.177.225,61	887,63
667.442,43	7.177.186,73	887,61	667.441,68	7.177.225,61	887,63
667.442,95	7.177.229,33	887,36	667.441,68	7.177.225,61	887,63
667.443,04	7.177.227,18	887,40	667.442,25	7.177.226,76	887,55

FONTE: O Autor (2021)

Como pode ser observado, na filtragem realizada, foi retornado mais de uma vez o mesmo ponto para a PCL. Para contornar essa questão, foi necessário realizar uma limpeza nesses dados, eliminando assim os pontos que apareciam mais de uma vez nos resultados da PCD.

Para lograr êxito nessa limpeza dos pontos, foi aplicado um critério de classificação nos pontos da PCD, com base no cálculo da distância euclidiana bidimensional, equação (50), das coordenadas planas dos seus pontos, resultantes da filtragem dos pontos de integração da etapa anterior.

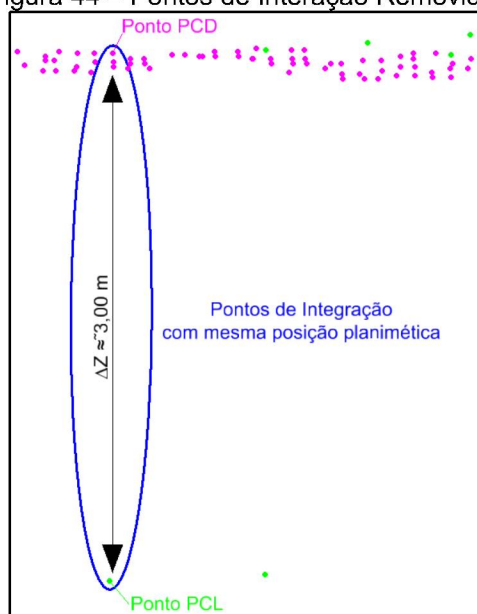
$$d = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (50)$$

O critério aplicado para a classificação dos pontos foi o seguinte: caso  $d = 0$ , ou seja, caso as coordenadas de um ponto  $p$  na linha  $i$  fossem iguais a de um ponto  $q$  na linha  $j$ , esse ponto seria classificado com o valor “REPETIDO”, se não, caso o  $d \neq 0$ , o valor atribuído para a classificação seria igual a “CORRETO”.

#### 5.2.6 Avaliação por distribuição de frequência dos pontos de integração

Para realizar a avaliação estatística por distribuição de frequência, primeiramente temos que remover pontos que planimetricamente são coincidentes, porém altimetricamente estão com afastamento superior a três desvios padrões, ver Figura 44. Estes pontos, segundo Gemael (1994), podem ser considerados como erros grosseiros e devem ser rejeitados das observações. Desta maneira, esses pontos serão removidos da análise estatística, pois são pontos que não representam a integração das nuvens.

Figura 44 – Pontos de Interação Removidos



FONTE: O Autor (2021)

Após removidos os pontos com desvios superiores a três vezes o desvio padrão da nuvem de integração, iniciou-se a distribuição de frequência das discrepâncias altimétricas ( $\Delta Z$ ) encontradas nos pontos de integração. O objetivo dessa etapa foi

aprimorar os resultados para que posteriormente fosse gerado o mapa de correção entre as nuvens PCL e PCD.

Com os pontos de integração organizados em uma tabela, foi realizada a análise de distribuição de frequência (absoluta e relativa) das discrepâncias resultantes da etapa anterior.

Para a construção da tabela de frequência foram utilizadas classes de valores para a classificação dos dados. O critério para definir as classes foi a Regra de Sturges (Regra do Logaritmo) para a determinação da quantidade de classes e do intervalo entre dessas classes.

A fórmula da regra de Sturges diz que:

$$k = 1 + 3,322 \log n \quad (51)$$

em que,

$k$  = número de classes;

$n$  = quantidade total da amostra;

Foram calculadas as medidas de posição, como a Moda, Mediana e a Média Aritmética. Também foram aplicadas as medidas de dispersão como a amplitude, o desvio padrão, desvio médio, e variância com a finalidade de encontrar valores que resumam a variabilidades dos dados.

### 5.2.7 Geração do mapa de correção entre a PCD e a PCL

A etapa anterior permitiu que a nuvem de pontos de integração fosse devidamente filtrada e limpa. As análises realizadas possibilitaram a retirada de pontos que se repetiram quando realizada a filtragem dos pontos de integração entre a PCD e PCL, além de eliminar os pontos com diferenças de três desvios padrões, pois estes pontos estatisticamente são considerados como erros grosseiros.

Com esses métodos aplicados sobre a nuvem de integração, gerou-se duas tabelas, sendo a primeira (Tabela 10) com coordenadas (E, N, H) das nuvens PCL e PCD e a segunda (Tabela 11) somente com as coordenadas (E, N,  $\Delta H$ ) para a geração do mapa de correção entre a PCD e a PCL, ver Figura 45.

Tabela 10 – Exemplo da Nuvem de Integração

Posição	PCL (NUVEM LiDAR)			PCD (NUVEM VANT)			Correção $\Delta H$ (m)
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)	
Solo	667.432,06	7.177.176,20	887,72	667.432,06	7.177.176,20	887,50	0,22
Telhado	667.432,73	7.177.179,25	887,46	667.432,73	7.177.179,25	888,41	-0,95

FONTE: O Autor (2021)

Tabela 11 – Exemplo dos Pontos Utilizados para o Mapa de Correção

Posição	Correção		
	E (m)	N (m)	$\Delta H$ (m)
Solo	667.432,06	7.177.176,20	0,22
Telhado	667.432,73	7.177.179,25	-0,95

FONTE: O Autor (2021)

Figura 45 – Diferença Altimétrica dos Pontos do Mapa de Correção



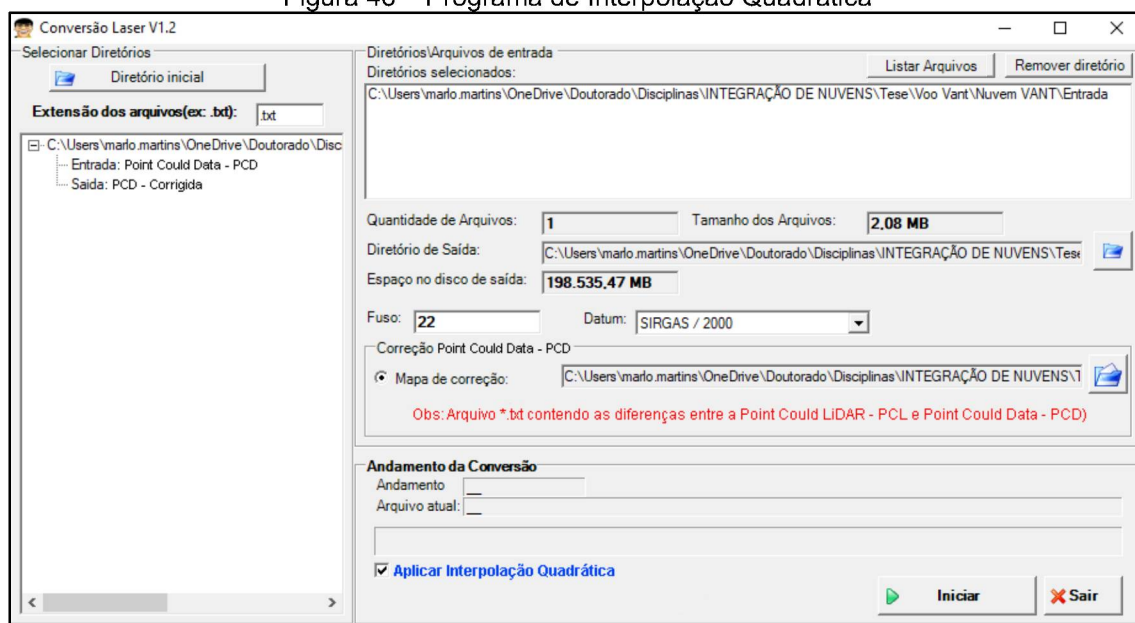
FONTE: O Autor (2021)

### 5.2.8 Aplicação do mapa de correção na nuvem PCD

Após a análise estatística por distribuição de frequência é gerado o mapa de correção, arquivo final em \*.TXT, deste mapa foi possível aplicar uma interpolação quadrática para as coordenadas altimétricas e assim obtendo um ajustamento da nuvem PCD.

Para utilizar este mapa de correção foi desenvolvido um programa para entrar com a nuvem PCD e o arquivo do mapa de correção, tendo como arquivo final a nuvem PCD ajustada em relação a nuvem PCL, ver Figura 46.

Figura 46 – Programa de Interpolação Quadrática



FONTE: O Autor (2021)

A técnica de interpolação é uma das técnicas mais aplicadas para a aproximação de valores. Antes do advento computacional a interpolação era amplamente utilizada para o cálculo de valores de funções transcendentais. Mesmo com o passar do tempo a técnica de interpolação não perdeu sua importância, pois é a base de inúmeros algoritmos numéricos, por exemplo, o da diferenciação, da quadratura, da integração, de equações diferenciais, entre outros.

A interpolação utilizada nesta pesquisa foi a de polinômios, ou seja, foi tratado do problema de aproximar uma função  $f(x)$  por um polinômio  $P_n(x)$  de grau menor ou igual a  $n$ , tal qual  $P_n(x_k) = f(x_k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ , em que os  $(n + 1)$  pontos  $(x_k, f(x_k))$  são conhecidos. Os métodos de aproximação são, principalmente, aplicados quando:

- a)  $f(x)$  é extremamente complicado e de difícil manipulação;
- b) a expressão analítica de  $f(x)$  não é conhecida, e sabe-se somente o valor de alguns pontos, e deseja determinar-se a função;
- c) para obtenção de valores intermediários do conjunto de dados.

Dentre os diversos métodos utilizado para a aproximação com polinômios, tais como, interpolação utilizando funções trigonométricas e expansão por séries, o escolhido para este trabalho foi o de interpolação polinomial, mais especificamente o de interpolação quadrática (52).



$$P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (52)$$

### 5.2.9 Integração das nuvens de pontos PCD e PCL

A terceira e última parte da metodologia proposta refere-se a fusão das nuvens de pontos PCD e PCL. Essa etapa consiste na unificação das nuvens de pontos PCD e PCL. Ou seja, as coordenadas altimétricas de ajuste dos pontos de integração foram calculadas pela interpolação quadrática e essas correções foram aplicadas na nuvem PCD para que a mesmas se encaixasse com a PCL, como será mostrado a frente, no capítulo de Resultados e Discussões.

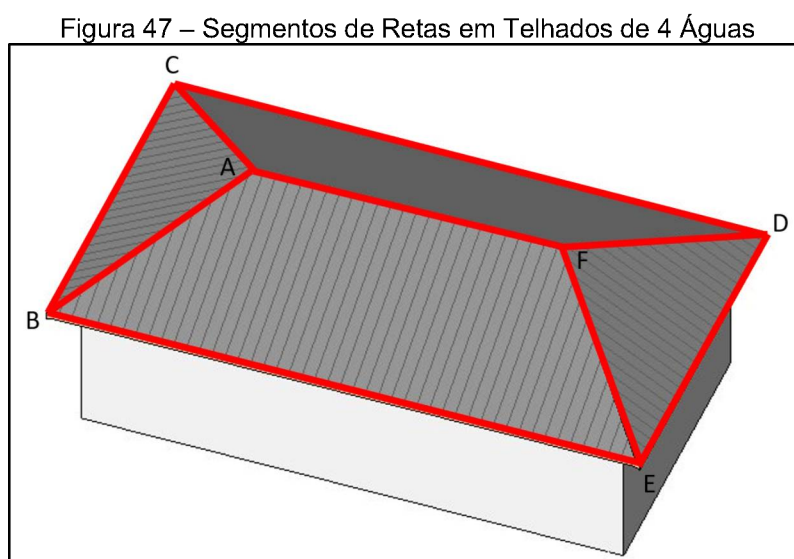
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados durante a realização dessa pesquisa. Primeiramente serão mostrados os resultados da obtenção e validação das entidades pontuais, ou seja, pontos de controle, utilizando a primeira área de pesquisa e em seguida, mostrará os resultados encontrados nos procedimentos para fusão das nuvens de pontos PCD e PCL utilizando a segunda área de pesquisa.

### 6.1 RESULTADOS PARA OBTENÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

#### 6.1.1 Resultados da Obtenção das Entidades Pontuais por Regressão e Intersecção

Este tópico discorrerá os resultados da definição dos segmentos de retas dos telhados, ver Figura 47, utilizados na pesquisa. Os segmentos que serão definidos são os pontos da cumeeira (AF), e os pontos das quinas da borda (BC, CD, DE e EB).



FONTE: O Autor (2021)

Como os resultados são extensões e com muitas tabelas utilizaremos com exemplo de resultado apenas o telhado número 8 da Figura 26 do tópico 4.1, porém

estes resultados são similares para os demais telhados, totalizado 28 telhados observados.

Após o exposto acima, os pontos laser do telhado número 8, da primeira área da pesquisa, foram obtidos com o processo de seleção semiautomática de pontos, explicitado no item 5.1.1. Em posse desses pontos, e com o auxílio de planilhas de cálculo, calculou-se a média das coordenadas altimétricas para os quatro segmentos de retas (BC, CD, DE, EB). Isso permitiu estabelecer a mesma altitude para os pontos das bordas do telhado, bem como estabelecer o desvio padrão desses pontos que definem as bordas. Desta maneira o telhado em questão possui o seguinte valor de 0,056 m no desvio padrão.

Após isso, as retas que definem as bordas do telhado são obtidas por regressão linear; adicionalmente, os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e o coeficiente de determinação  $R^2$ , de cada reta, são estimados.

Na Tabela 12 são apresentados os valores estimados para as quatro retas do telhado que foi tomado para a obtenção da entidade pontual, ou seja, do ponto de controle. Salienta-se que o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) foi estimado para avaliar a qualidade da Regressão Linear ou o ajustamento da reta aos pontos laser tomados como sendo de borda.

Tabela 12 – Coeficientes Calculados para as Bordas do Telhado Número 8

Coeficiente	Seguimentos de Retas			
	BC	BE	ED	CD
$\beta$	0,41189735	-2,40341302	0,38672217	-2,47862095
$\alpha$	6.907.674,70 m	8.814.444,95 m	6.924.702,49 m	8.865.426,11 m
$R^2$	99,00 %	98,15 %	96,30 %	98,29 %

FONTE: O Autor (2021)

Como pode ser visto na Tabela 12, os valores dos Coeficientes de Determinação foram de 96% a 99%, mostrando resultados precisos dos ajustamentos das retas aos pontos definidos como sendo os de bordas do telhado. Com os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ , definidores das 4 retas, estimados pelas regressões, foi realizada a interseção de retas para a determinação das entidades pontuais das bordas do telhado. A Tabela 13 mostra as coordenadas das entidades pontuais de borda do telhado número 8.

Tabela 13 – Coordenadas das Entidades Pontuais das Quinas das Bordas

Entidade Pontual	Coordenadas Finais do Pontos de Apoio na Borda		
	E (m)	N (m)	h (m)
B	677.285,98	7.186.647,00	916,47
C	677.301,17	7.186.653,26	916,47
D	677.309,33	7.186.633,02	916,47
E	677.294,23	7.186.627,18	916,47

FONTE: O Autor (2021)

Após a determinação das coordenadas das bordas do telhado, a próxima fase é a determinação das coordenadas das entidades pontuais da cumeeira do telhado (pontos A e F, Figura 47). Empregando o mesmo procedimento, utilizado na determinação das coordenadas das bordas, foi realizada uma seleção semiautomática dos pontos laser, próximos a reta que conecta as duas cumeeiras do telhado.

Após essa seleção, foi calculada a média dos valores das coordenadas altimétricas desses pontos, o que permitiu estabelecer a mesma altitude para os pontos da cumeeira do telhado. A reta passante pelos pontos A e F são obtidas por regressão linear; adicionalmente, os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e o coeficiente de determinação  $R^2$ , como é no caso das bordas do telhado, ver Tabela 14.

Tabela 14 – Coeficientes Calculados para as Cumeeiras do Telhado Número 8

Coeficientes	Seguimentos de Retas		
	AF	AB	AC
$\beta$	-2,34702373	-0,59610199	-0,24514842
$\alpha$	8.776.273,76 m	4.284.891,10 m	1.762.713,16 m
$R^2$	93,05 %	98,83 %	99,63 %

FONTE: O Autor (2021)

Com a estimação dessa reta e com as coordenadas dos pontos dos cantos dos telhados (B, C, D e E), já determinadas, as coordenadas tridimensionais dos pontos que definem as duas cumeeiras (A e F) são determinadas por interseção.

A Tabela 15 mostram os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $R^2$  e as coordenadas dos pontos da cumeeira.

Tabela 15 – Coordenadas das entidades pontuais na Cumeeira

Entidade Pontual	Coordenadas Finais do Pontos de Apoio na Cumeeira		
	E (m)	N (m)	h (m)
A	677.296,476	7.186.642,861	918,983
F	677.298,763	7.186.637,492	918,983

FONTE: O Autor (2021)

Após calculado todas as entidades pontuais do telhado número 8 escolheu apenas duas entidades pontuais para utilizar como pontos de análises, nesse caso, foram o ponto C da quina e o ponto A da cumeeira do telhado. As entidades pontuais dos 28 telhados estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Coordenadas das Entidades Pontuais das Quinas e Cumeeiras dos 28 Telhados

Nº	QN	E (m)	N (m)	H (m)	CM	E (m)	N (m)	H (m)
1	B	678.701,55	7.188.724,76	911,38	A	678.686,03	7.188.716,24	913,85
2	B	678.892,42	7.187.800,87	900,04	A	673.822,63	7.187.831,18	915,87
3	D	677.237,64	7.187.840,41	921,11	A	675.465,00	7.187.836,56	914,54
4	E	675.466,89	7.187.853,37	913,29	A	677.240,99	7.187.849,00	922,67
5	D	673.826,47	7.187.837,19	913,66	F	678.895,22	7.187.809,91	902,04
6	D	673.450,90	7.186.558,53	932,65	F	673.447,30	7.186.551,33	935,78
7	C	675.547,63	7.186.770,35	908,13	A	675.552,71	7.186.763,54	910,36
8	C	677.301,17	7.186.653,26	916,47	A	677.296,48	7.186.642,86	918,98
9	B	678.729,83	7.186.454,61	906,25	F	678.737,68	7.186.456,54	908,39
10	B	678.739,85	7.185.522,42	908,03	F	673.740,35	7.185.437,58	917,71
11	E	676.813,53	7.185.478,60	919,13	F	675.785,94	7.185.515,62	904,57
12	E	675.778,05	7.185.515,49	902,13	A	676.809,29	7.185.483,83	920,85
13	E	673.748,11	7.185.434,68	915,84	A	678.742,60	7.185.515,25	909,46
14	C	673.920,25	7.184.353,73	905,36	A	673.909,34	7.184.344,33	906,62
15	C	675.558,05	7.184.444,17	895,35	A	675.554,80	7.184.436,21	896,47
16	D	677.241,78	7.184.681,69	936,79	A	677.249,76	7.184.675,42	938,78
17	D	678.879,66	7.184.234,75	906,92	A	678.888,43	7.184.233,71	908,18
18	E	678.574,65	7.182.963,50	919,95	F	674.017,99	7.183.427,23	928,67
19	D	677.432,90	7.183.123,92	928,44	A	675.603,81	7.183.124,90	895,48
20	B	675.611,10	7.183.121,93	893,42	A	677.431,73	7.183.117,29	929,95
21	C	674.020,28	7.183.448,22	928,44	A	678.583,06	7.182.959,83	922,67
22	B	673.997,64	7.181.911,64	904,32	F	673.988,86	7.181.922,10	906,20
23	B	674.935,94	7.182.208,19	895,35	F	674.938,70	7.182.215,48	898,17
24	E	677.316,42	7.182.246,76	927,25	F	677.308,54	7.182.248,26	928,72
25	E	678.844,46	7.181.965,46	926,64	A	678.834,80	7.181.954,36	928,79
26	D	673.702,71	7.181.112,97	905,20	A	673.697,03	7.181.115,89	906,81
27	D	675.707,54	7.181.047,48	896,01	A	675.693,60	7.181.055,95	901,14
28	C	677.231,72	7.180.882,89	892,65	A	677.223,90	7.180.883,00	894,45

FONTE: O Autor (2021), Quina (QN) e Cumeeira (CM).

### 6.1.2 Resultados da Obtenção das Entidades Pontuais por Topografia

Seguindo a metodologia do tópico 5.1.3 obteve-se a Tabela 17 das quinas e cumeeiras por levantamento topográfico.

Tabela 17 – Coordenadas das Entidades Pontuais das Quinas e Cumeeiras dos 28 Telhados

Nº	QN	E (m)	N (m)	H (m)	CM	E (m)	N (m)	H (m)
1	B	678.701,83	7.188.724,82	911,37	A	678.686,03	7.188.716,61	913,94
2	B	678.892,72	7.187.800,85	899,97	A	673.822,53	7.187.831,23	915,74
3	D	677.237,72	7.187.840,51	921,16	A	675.465,18	7.187.836,43	914,60
4	E	675.466,73	7.187.853,60	913,29	A	677.240,46	7.187.849,15	922,65
5	D	673.826,10	7.187.837,54	913,67	F	678.894,91	7.187.809,86	902,09
6	D	673.450,48	7.186.558,81	932,77	F	673.448,15	7.186.551,32	935,85
7	C	675.547,49	7.186.770,49	908,10	A	675.552,76	7.186.763,76	910,38
8	C	677.301,26	7.186.653,26	916,50	A	677.296,55	7.186.642,60	918,84
9	B	678.730,11	7.186.454,50	906,22	F	678.738,08	7.186.456,93	908,43
10	B	678.740,14	7.185.522,25	908,00	F	673.740,65	7.185.437,84	917,77
11	E	676.813,55	7.185.478,56	919,17	F	675.785,69	7.185.515,47	904,71
12	E	675.777,93	7.185.515,52	902,07	A	676.809,41	7.185.483,36	920,91
13	E	673.747,72	7.185.434,86	915,86	A	678.742,11	7.185.514,78	909,21
14	C	673.919,90	7.184.353,82	905,32	A	673.909,83	7.184.344,25	906,55
15	C	675.557,91	7.184.444,14	895,24	A	675.554,87	7.184.436,08	896,40
16	D	677.241,86	7.184.681,56	936,94	A	677.249,32	7.184.675,72	938,83
17	D	678.879,96	7.184.234,47	906,88	A	678.888,86	7.184.233,47	908,26
18	E	678.574,91	7.182.963,15	920,00	F	674.017,76	7.183.427,68	928,61
19	D	677.433,01	7.183.123,66	928,54	A	675.603,57	7.183.124,73	895,60
20	B	675.610,97	7.183.121,81	893,30	A	677.431,72	7.183.117,31	930,11
21	C	674.019,93	7.183.448,24	928,54	A	678.583,10	7.182.960,14	922,65
22	B	673.997,29	7.181.911,55	904,27	F	673.988,58	7.181.922,24	906,02
23	B	674.935,71	7.182.208,05	895,24	F	674.938,85	7.182.215,93	898,26
24	E	677.316,51	7.182.246,45	927,34	F	677.308,91	7.182.248,09	928,67
25	E	678.844,75	7.181.965,02	926,72	A	678.834,52	7.181.954,65	928,75
26	D	673.702,32	7.181.112,84	905,15	A	673.696,78	7.181.116,17	906,77
27	D	675.707,42	7.181.047,20	895,91	A	675.694,61	7.181.056,28	901,20
28	C	677.231,80	7.180.882,49	892,52	A	677.224,07	7.180.883,38	894,44

FONTE: O Autor (2021), Quina (QN) e Cumeeira (CM).

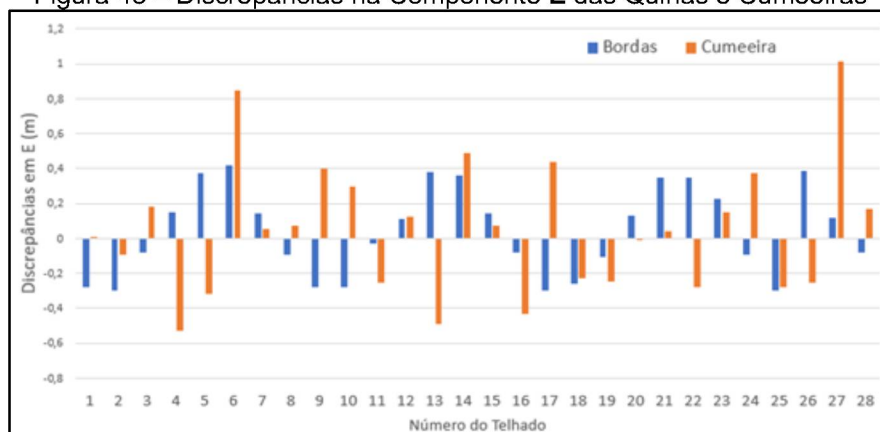
### 6.1.3 Avaliação das Entidades pontuais da Quina versus a Cumeeira do Telhado Comparados pela Topografia

Neste tópico é apresentado o estudo que foi realizado para verificar o desempenho do uso da Regressão Linear e Interseção de Retas na extração de entidades pontuais do canto de telhado e da cumeeira em uma nuvem de pontos LiDAR quando comparados pelo levantamento topográfico.

Aqui se discute-se a comparação dos resultados das discrepâncias ( $\Delta E$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta H$ ) de pontos das entidades pontuais mencionadas na Tabela 16 quando

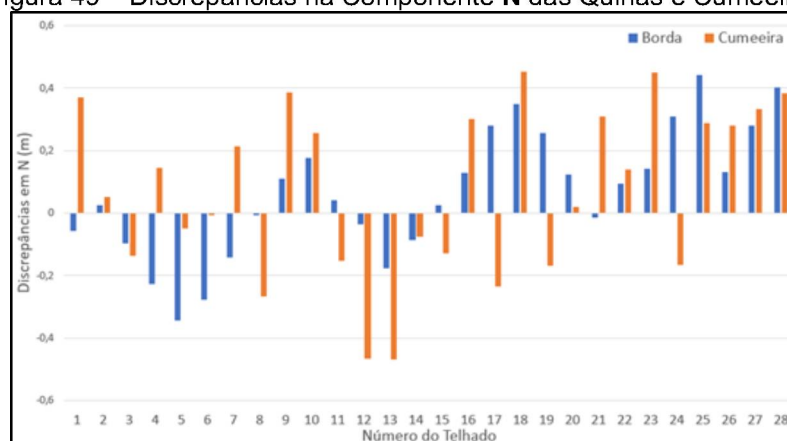
confrontados com a Tabela 17. Inicialmente, apresentam-se as Figura 48, Figura 49, Figura 50 das discrepâncias tridimensionais que foram obtidas nas 28 entidades pontuais, das quinas e das cumeeiras dos telhados.

Figura 48 – Discrepâncias na Componente **E** das Quinas e Cumeeiras



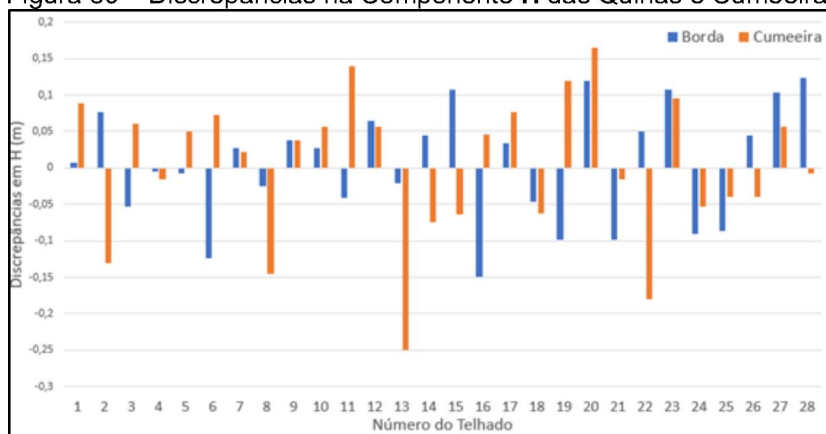
FONTE: O Autor (2021)

Figura 49 – Discrepâncias na Componente **N** das Quinas e Cumeeiras



FONTE: O Autor (2021)

Figura 50 – Discrepâncias na Componente **H** das Quinas e Cumeeiras



FONTE: O Autor (2021)

Tabela 18 – Estatística das Discrepâncias das Entidades Pontuais de Quinas e Cumeeiras

	QUINAS				CUMEEIRAS			
	DE (m)	DN (m)	DP(m)	DH (m)	DE (m)	DN (m)	DP(m)	DH (m)
<b>Média</b>	0,04	0,07	0,30	0,01	0,05	0,07	0,41	0,00
<b><math>\sigma</math></b>	0,25	0,20	0,13	0,08	0,37	0,27	0,21	0,10
<b>RMSE</b>	0,25	0,21	0,33	0,08	0,37	0,28	0,47	0,10

FONTE: O Autor (2021)

Analisando o gráfico de discrepâncias, na componente E (Figura 48), pode se verificar que os valores das discrepâncias das entidades pontuais de quinas, encontram-se no intervalo que varia de, aproximadamente, -0,5 a 1,00 m. Entretanto, as maiores discrepâncias, nessa componente E, estão relacionadas com a entidade pontual de cumeeiras, como pode ser comprovado pelos valores de erros quadráticos médios (RMSE), apresentados na Tabela 18, de 0,37 m para cumeeiras e 0,25 m para quina.

No caso das discrepâncias na componente N (Figura 49), a variação se deu no intervalo aproximado de -0,50 a 0,50 m, mas de forma similar, as maiores discrepâncias estão conectadas com as entidades pontuais de cumeeiras, resultando erros quadráticos médios (RMSE) de 0,27 m para cumeeiras e 0,21 m para quinas.

Na componente H, os valores de discrepâncias (DH) estão em um intervalo menor se comparadas com as componentes planimétricas, variando, aproximadamente de -0,25 m a 0,16 m, como pode ser observado na Figura 50. Entretanto, de forma similar as maiores discrepâncias estão conectadas com as entidades pontuais de cumeeira, como pode ser visto na Tabela 18, os valores de erros quadráticos médios (RMSE) de 0,10 m para cumeeiras e 0,08 m para quinas.

Desta forma, pode se concluir, com base nos resultados apresentados nas Figura 48, Figura 49 e Figura 50, e Tabela 18 que as entidades pontuais, de quinas, possuem maior exatidão planimétrica que as entidades pontuais de cumeeiras. Esta maior exatidão nas quinas se dá pela dificuldade de se medir o detalhe pontual da cumeeira por irradiação topográfica, logo, pode se concluir que seja a principal causa de ocorrência de maiores discrepâncias planimétricas nessa entidade pontual.



## 6.1.4 Análise de Tendência e PEC para entidades pontuais de Quinas

### 6.1.4.1 Análise de Tendência

Os testes de tendência, foram realizados nas coordenadas tridimensionais das entidades pontuais das quinas de telhados. Os resultados do teste de tendência são apresentados na Tabela 19 e são valores booleanos (sim ou não) e indicam se a componente das coordenadas (eixo) apresenta uma tendência ou não.

Os valores calculados de tendência foram comparados com o valor limite t para averiguar a tendência. O valor do limite t, encontrado na tabela padrão de student, para 90% de confiança foi de 1,31, logo, se o valor calculado for maior que 1,31, conclui-se que existe tendência na componente (eixo), retornando um valor “sim” na respectiva célula de resultado (Tabela 19), e no caso de ser menor, não existe uma tendência, retornando um valor “não” na respectiva célula de resultado.

Tabela 19 – Análise de Tendência nas Quinas do Telhado

t	DE	DN	DH
<b>Topografia x Regressão Linear e Interseção de Retas</b>			
Resultado	0,80	1,71	0,31
Tendência	não	sim	não

FONTE: O Autor (2021)

Pelos resultados apresentados na Tabela 19, verifica-se a existência de tendência a componente N. Essa tendência pode ser observada na Figura 49, onde a maioria das discrepâncias (DN) são positivas, mas de dimensões aceitáveis se comparadas com a precisão do levantamento LiDAR.

### 6.1.4.2 Análise do PEC

A análise do PEC foi realizada de acordo com a metodologia apresentada no item 5.1.4.2 dessa pesquisa e está fundamentada na comparação de valores de estatísticas calculado com valores críticos da distribuição do Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ).

O valor do limite de variância, encontrado na tabela padrão do Qui-Quadrado, para um nível de significância de 90% e com 27 graus de liberdade foi de 37,90. Desta forma, se os valores calculados ( $\chi_{E,N,H}^2$ ) forem menores que 37,90, a exatidão

tridimensional das coordenadas das entidades pontuais das quinas dos telhados, esses atenderam à exatidão estabelecida pelo PEC, caso contrário as coordenadas não atenderam o PEC. Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos no teste estatístico mencionado.

Tabela 20 – Análise, Classe A, para a Precisão das Quinas dos Telhados

Escala	Análise $\chi^2$	DE	DN	DH
1/1.000	Não	118,83	77,61	11,31
1/2.000	Sim	29,71	19,40	2,83
1/3.000	Sim	13,20	8,62	1,26
1/4.000	Sim	7,43	4,85	0,71
1/5.000	Sim	4,75	3,10	0,45

FONTE: O Autor (2021)

Na Tabela 20 nota-se que os resultados encontrados no teste estatísticos foram abaixo do esperado para a escala 1/2.000, o que permite sua classificação como classe A para essa escala ou escala maiores.

#### 6.1.5 Análise de Tendência e PEC para entidades pontuais de Cumeeiras

##### 6.1.5.1 Análise de Tendência

Assim como tratado no tópico 6.1.4.1 o resultado da análise de tendência t é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Análise de Tendência nas Cumeeira dos Telhados

t	DE	DN	DH
<b>Topografia x Regressão Linear e Interseção de Retas</b>			
Resultado	0,17	1,24	0,02
Tendência	não	não	não

FONTE: O Autor (2021)

Os resultados apresentados na Tabela 21 mostram que a obtenção de coordenadas planimétricas sem tendências. Resultado diferente daquele, obtido no estudo de tendências com as coordenadas planimétricas, de entidades pontuais das quinas dos telhados, que apresentou uma pequena tendência planimétrica na componente (N).

Entretanto, como pode-se ver na Tabela 21, o valor da estatística (1,24), para a componente (N) aproxima-se do valor de não aceitação da hipótese de inexistência da tendência.

#### 6.1.5.2 Análise do PEC

Assim como tratado no tópico 6.1.4.2, o resultado da análise do PEC pelo Qui-Quadrado ( $\chi^2$ ) é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise, Classe A, para a Precisão das Cumeeiras dos Telhados

<b>Escala</b>	<b>Análise <math>\chi^2</math></b>	<b>DE</b>	<b>DN</b>	<b>DH</b>
<b>1/1.000</b>	Não	265,55	137,66	18,14
<b>1/2.000</b>	Não	66,39	34,42	4,54
<b>1/3.000</b>	Sim	29,51	15,30	2,02
<b>1/4.000</b>	Sim	16,60	8,60	1,13
<b>1/5.000</b>	Sim	10,62	5,51	0,73

FONTE: O Autor (2021)

Os resultados apresentados na Tabela 22 mostram que a exatidões das coordenadas tridimensionais, de entidades pontuais de cumeeiras, obtidas com o procedimento de Regressão Linear e Interseção de Retas, permitem enquadrar no PEC Classe A na escala 1/3.000, e nas escalas menores.

## 6.2 RESULTADOS PARA INTEGRAÇÃO DAS NUVENS LIDAR E VANT

Este tópico versará sobre os resultados encontrados nos procedimentos para fusão das nuvens de pontos PCD e PCL, de acordo com a metodologia descrita no tópico 5.2, utilizando os dados obtidos para a segunda área de pesquisa, ver tópico 4.2.

### 6.2.1 Resultados do Processamento Fotogramétrico

Utilizando a metodologia do tópico 5.1, já validada pelos resultados do tópico 6.1, foram obtidas as entidades pontuais na nuvem PCL, ver Tabela 23, para utilizar como pontos de controle no processamento fotogramétrico, assim não havendo a necessidade de levantar pontos topográfico por GNSS. Estes pontos estão distribuídos conforme Figura 52. A utilização destas entidades pontuais também são a garantia que planimetricamente a nuvem PCL e PCD sejam compatíveis, assim realizando a primeira etapa de integração.

Tabela 23 – Entidades Pontuais obtidas na PCL.

<b>Pontos de Controle</b> (Entidades Pontuais)	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>H (m)</b>
01	667.541,66	7.177.212,74	891,83
02	667.623,63	7.177.318,44	892,80
03	667.742,87	7.177.426,23	892,06
04	667.647,88	7.177.169,01	891,69
05	667.816,22	7.177.204,87	897,35
06	667.864,90	7.177.311,48	898,32
07	667.694,01	7.177.069,10	889,27
08	667.948,77	7.177.226,12	901,05
09	667.769,40	7.176.990,97	892,08
10	667.805,45	7.176.907,52	891,44
11	667.943,17	7.177.015,72	894,59
12	668.063,40	7.177.147,48	901,32

FONTE: O Autor (2021)

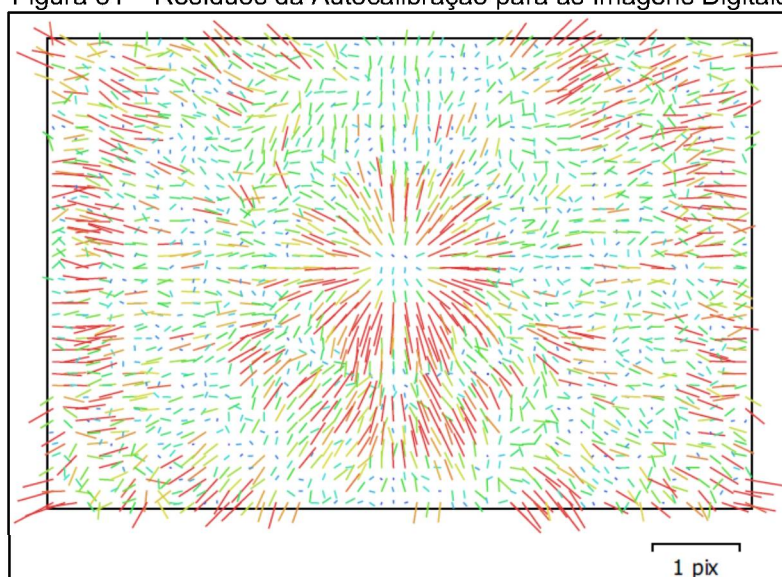
O primeiro resultado deste processamento foram os POIs, ou seja, distância focal ( $f$ ), coordenadas do ponto principal ( $x_0$ ,  $y_0$ ), coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ) e coeficientes distorção descentrada ( $p_1$  e  $p_2$ ). Os valores desses parâmetros e seus respectivos desvios-padrão, estimados no processamento de autocalibração são apresentados na Tabela 24 e na Figura 51 é apresentado os resíduos para as imagens digitais.

Tabela 24 – POIs estimados na autocalibração.

POI	Valor (pixel)	Desvio-Padrão (pixel)
F	4031,15	2,10
Cx	-1,55	0,04
Cy	21,16	0,05
K1	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
K2	$-9,83 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
K3	$01,36 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$
P1	$6,79 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$
P2	$-2,89 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$

FONTE: O Autor (2021)

Figura 51 – Resíduos da Autocalibração para as Imagens Digitais



FONTE: O Autor (2021)

Como podemos observar na Tabela 24, para os valores apresentados nos POI, todos os respectivos desvios padrões foram menores que seus respectivos valores.

Posteriormente, a exatidão geral do processamento pode ser vista na Tabela 25 e demonstrada na Figura 52. Os resíduos dos 12 pontos de controle individualizada pode ser vista na Tabela 26. Nos resultados são apresentados os principais valores relacionados a essa discrepância, como o erro médio quadrático (REMQ) para as coordenadas E, N e H.

Tabela 25 – REMQ Total dos Pontos de Controle

E	REMQ (cm)			
	N	H	Dist. Planimetria	Total
2,94	1,64	4,18	3,36	5,37

FONTE: O Autor (2021)

Figura 52 – Distribuição dos Pontos de Controle com os Resíduos

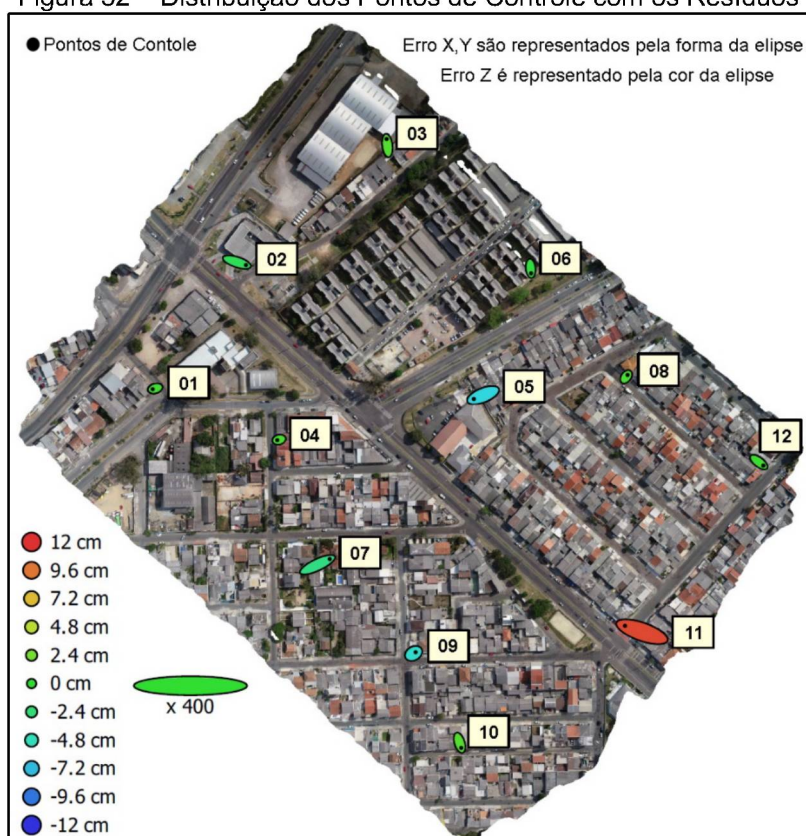


Tabela 26 – REMQ dos Pontos de Controle

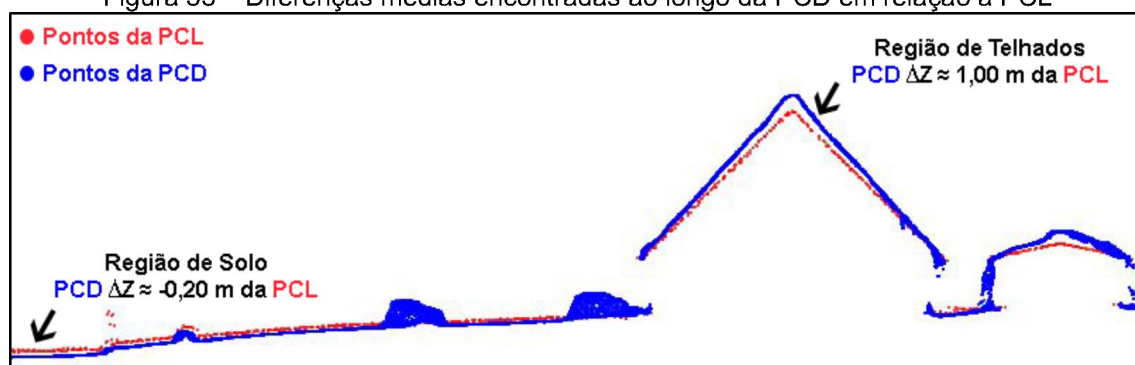
Ponto	REMQ (cm)			Total
	E	N	H	
01	-1,01	-0,29	0,57	1,19
02	3,64	-1,17	-1,34	4,05
03	-0,31	2,61	1,23	2,90
04	-0,73	-0,19	0,81	1,10
05	-3,70	-1,51	-6,25	7,42
06	0,18	-1,93	-0,52	2,01
07	4,89	2,29	-2,84	6,10
08	0,57	0,77	0,87	1,30
09	0,81	0,49	-5,46	5,54
10	0,65	-2,07	1,28	2,52
11	-6,80	2,37	11,21	13,32
12	1,80	-1,36	0,43	2,30

FONTE: O Autor (2021)

### 6.2.2 Análise das diferenças encontradas entre a PCD em relação à PCL

A primeira análise das diferenças das duas nuvens de pontos foi por meio da verificação visual apresentadas ao longo da PCD e da PCL. A Figura 53, ilustra um esquema das diferenças encontradas durante a esta análise realizada, tendo como os valores médios de diferença entre as duas nuvens.

Figura 53 – Diferenças médias encontradas ao longo da PCD em relação à PCL



FONTE: O Autor (2021)

Analisando a Figura 53, podemos observar que, aproximadamente, as diferenças encontradas durante a análise das nuvens de pontos mantiveram dentro de um limiar constante. A nuvem PCD (em azul) ao ser comparada com a PCL (em vermelho), na região do solo, mostraram uma discrepância negativa de aproximadamente vinte centímetros. Já para a região dos telhados, o que foi observado é que os pontos na PCD apresentaram uma discrepância positiva, de aproximadamente um metro.

Observando a comparação das nuvens PCL e PCD utilizando as entidades pontuais extraídas da nuvem LiDAR (PCL), como ponto de controle, apresentam diferenças altimétricas, pois as entidades conseguiram resolver somente a planimetria da nuvem VANT (PCD), como pode ser visto na Figura 53. Desta maneira, podemos acreditar que uma das possíveis causas deste problema está no fato do aerolevanteamento ser realizado por VANT, pois as câmaras utilizadas nestes equipamentos apresentam distâncias focais muito pequenas o que podem ocasionar este efeito de escala na altimetria das nuvens VANT, porém devem-se realizar estudos mais aprofundados para a identificação destas diferenças altimétrica, já que esta pesquisa está focada apenas na solução da diferença altimétrica entre as nuvens PCL e PCD.

### 6.2.3 Resultado da Localização dos Pontos de Integração

Seguiu a metodologia do tópico 5.2.4, para a localização dos pontos de integração nas nuvens PCD e PCL, foi possível obter a Tabela 27, porém esta tabela apresenta 15.537 linhas e para reduzir o tamanho de apresentação foram colocadas apenas 15 linhas.

Na Tabela 27 podemos observar que a localização de pontos de integração na PCL resultou em um total de 14.215 pontos e na PCD resultou em um total de 15.535 pontos.

Tabela 27 – Amostra dos Pontos de Integração

PCL (NUVEM LiDAR) – 14.215 Ptos			PCD (NUVEM VANT) – 15.535 Ptos		
E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
667.432,06	7.177.176,20	887,50	667.432,06	7.177.176,20	887,72
667.432,26	7.177.170,66	887,71	667.432,26	7.177.170,66	888,09
667.432,73	7.177.179,25	887,46	667.432,73	7.177.179,25	889,10
667.436,64	7.177.176,68	887,60	667.436,64	7.177.176,68	887,85
667.437,74	7.177.176,30	887,64	667.437,74	7.177.176,30	887,76
667.438,56	7.177.184,87	887,54	667.438,56	7.177.184,87	887,88
667.441,24	7.177.178,95	887,68	667.441,24	7.177.178,95	887,85
667.441,68	7.177.225,61	887,39	667.441,68	7.177.225,61	887,63
			667.441,68	7.177.225,61	887,63
			667.441,68	7.177.225,61	887,63
			667.441,68	7.177.225,61	887,63
667.442,25	7.177.226,76	887,40	667.442,25	7.177.226,76	887,55
667.442,43	7.177.186,73	887,61	667.442,43	7.177.186,73	887,93

FONTE: O Autor (2021)

Na Tabela 27 também podemos observar que existe uma diferença na quantidade de pontos das nuvens de 1.320 pontos, onde verificamos que na nuvem PCD existem pontos repetidos que estão destacados em vermelhos e isto se repete ao longo de toda a nuvem PCD.

#### 6.2.4 Resultados da Remoção dos Pontos de Integração em Duplicidade

Nessa etapa foi executada a remoção dos pontos que apresentarem duplicidade na nuvem PCD conforme tópico 5.2.5. A Tabela 28 mostra um exemplo desta duplicidade de pontos.

Tabela 28 – Exemplo da duplicidade de pontos e a classificação da PCD

LiDAR (PCL)		VANT (PCD)		Classe
E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	
667.441,68	7.177.225,61	667.441,68	7.177.225,61	<b>CORRETO</b>
		667.441,68	7.177.225,61	<b>REPETIDO</b>
667.442,25	7.177.226,76	667.442,25	7.177.226,76	<b>CORRETO</b>

FONTE: O Autor (2021)



Como pode ser observado na Tabela 28, os pontos na nuvem PCD que possuem as coordenadas planimétricas iguais ao anterior foram classificados como “REPETIDO”, já os pontos com coordenadas diferentes foram classificados com “CORRETO”.

Com os pontos classificados, o decorrer das atividades é a limpeza dos pontos repetidos na nuvem PCD. Dessa maneira, os pontos com a classificação “REPETIDO” foram eliminados, restando somente os pontos com a classe “CORRETO”.

É válido colocar que após esta remoção dos pontos repetidos houve uma redução de aproximadamente 8,5% dos pontos de integração na nuvem PCD. Desta maneira, a nuvem PCD e PCL ficaram com a mesma quantidade de pontos, ou seja, cada nuvem ficou com 14.215 pontos de integração.

#### 6.2.5 Análise Estatística dos Pontos de Integração

Após essa redução de pontos em duplicidade, foi realizada uma nova remoção de pontos conforme o tópico 5.2.6. Nesta etapa foram eliminados os pontos que possuíam uma discrepância na coordenada altimétrica maior que três desvios padrões, já que estatisticamente estes pontos podem ser considerados como erros grosseiros. Essa etapa consistiu na verificação dos valores das diferenças das coordenadas H entre os pontos da PCD e da PCL.

Os valores eliminados nessa etapa, foram aqueles que apresentaram uma discrepância superior a  $\pm 1,38$  m, já que o desvio padrão de todas as discrepâncias altimétricas foi de  $\pm 0,46$  cm. Com esta remoção de pontos as nuvens PCL e a PCD ficaram com 11.420 pontos cada, ou seja, redução de 24,5%.

Após esta remoção estatística foi realizada a distribuição de frequência para os pontos de integração e organizados na Tabela 29. Analisando esta tabela é possível observar que foram calculados um total de 14 classes pela regra de Sturges, começando em -1,38 e indo até 1,42 metros, sendo que o intervalo entre as classes é de 0,20m. Os maiores valores de frequência absoluta podem ser observados entre a terceira e décima classe, sendo que esses valores representam um total de 88,3% dos dados, ou seja, considerando os valores que não estão entre a terceira e décima classe, temos uma frequência absoluta de 11,7%.

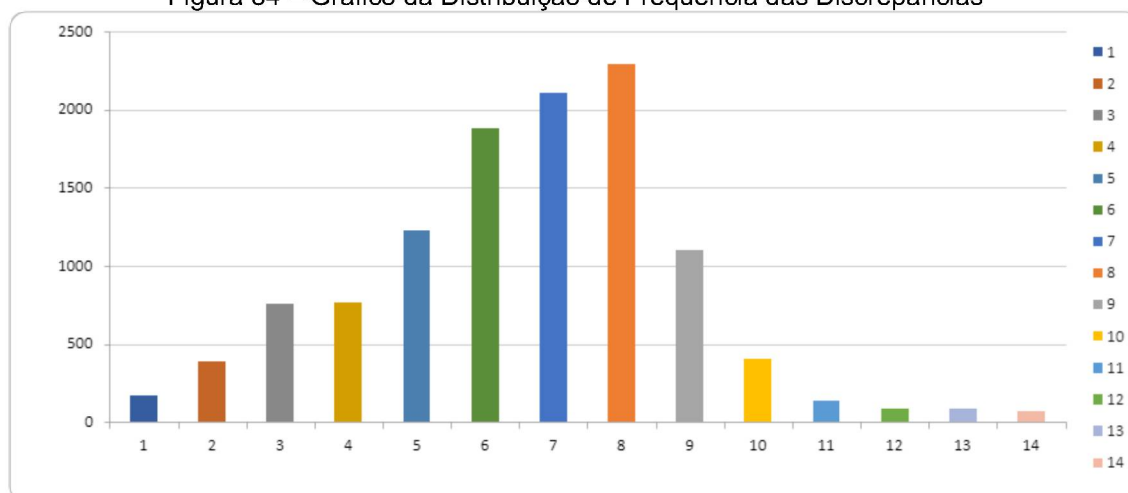
Tabela 29 – Distribuição de Frequência das Discrepâncias.

Classes (m)				Ponto Médio (m)	Absoluta	Relativa	Absoluta Acumulada	Relativa Acumulada
1 <sup>a</sup>	-1,38	-----	-1,18	-1,28	171	1,49%	171	1,49%
2 <sup>a</sup>	-1,18	-----	-0,98	-1,08	388	3,44%	388	3,44%
3 <sup>a</sup>	-0,98	-----	-0,78	-0,88	754	6,68%	1142	10,12%
4 <sup>a</sup>	-0,78	-----	-0,58	-0,68	767	6,79%	1909	16,91%
5 <sup>a</sup>	-0,58	-----	-0,38	-0,48	1226	10,86%	3135	27,77%
6 <sup>a</sup>	-0,38	-----	-0,18	-0,28	1879	16,64%	5014	44,41%
7 <sup>a</sup>	-0,18	-----	0,02	-0,08	2104	18,63%	7118	63,04%
8 <sup>a</sup>	0,02	-----	0,22	0,12	2293	20,31%	9411	83,35%
9 <sup>a</sup>	0,22	-----	0,42	0,32	1097	9,72%	10508	93,07%
10 <sup>a</sup>	0,42	-----	0,62	0,52	408	3,61%	10916	96,68%
11 <sup>a</sup>	0,62	-----	0,82	0,72	138	1,22%	11054	97,90%
12 <sup>a</sup>	0,82	-----	1,02	0,92	83	0,74%	11137	98,64%
13 <sup>a</sup>	1,02	-----	1,22	1,12	86	0,76%	11223	99,40%
14 <sup>a</sup>	1,22	-----	1,42	1,32	68	0,60%	11291	100,00%

FONTE: O Autor (2021)

Podemos observar que a maior frequência dos valores das discrepâncias encontra-se nas classes 6, 7 e 8, que vão de -0,38 a 0,22 m. Também podemos observar na Tabela 30 que as medidas de posição, média aritmética, mediana e moda, com seus valores de -0,17 m, -0,13 m e 0,12 m, respectivamente, encontram-se distribuídas por essas três classes supracitadas. A Figura 54 ilustra o gráfico da distribuição de frequência das discrepâncias.

Figura 54 – Gráfico da Distribuição de Frequência das Discrepâncias



FONTE: O Autor (2021)

Já para as medidas de dispersão, temos os valores do desvio médio, desvio padrão, erro máximo e a variância, sendo, respectivamente, 0,36 m, 0,46 m e 1,38 m.

Tabela 30 – Medidas de Posição e Dispersão das discrepâncias

<b>Medidas de Posição (m)</b>	
Média Aritmética	-0,17
Mediana	-0,13
Moda	0,12
<b>Medidas de Dispersão (m)</b>	
Desvio Médio	0,36
Desvio Padrão	0,46
Erro Máximo	1,38
Variância	0,21

FONTE: O Autor (2021)

Dado que somente uma pequena porcentagem das discrepâncias ficou concentrada nas bordas da distribuição (11,7%), foi realizada mais uma filtragem nos dados para o refinamento dos resultados. Os dados que estavam nas bordas da distribuição foram suprimidos e uma nova tabela de distribuição de frequência foi gerada, ver Tabela 31. Também podemos observar que esta tabela apresentou resultados similares ao observado no tópico 6.2.2, e na Figura 53.

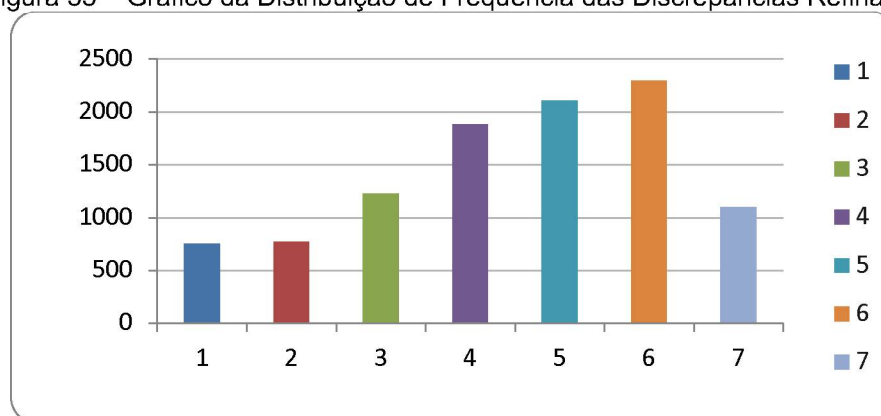
Tabela 31 – Distribuição de Frequência das Discrepâncias Refinada

<b>Classes (m)</b>				<b>Ponto Médio (m)</b>	<b>Absoluta</b>	<b>Relativa</b>	<b>Absoluta Acumulada</b>	<b>Relativa Acumulada</b>
1ª	-0,98	-----	-0,78	-0,88	754	7,45%	754	7,45%
2ª	-0,78	-----	-0,58	-0,68	767	7,58%	1521	15,03%
3ª	-0,58	-----	-0,38	-0,48	1226	12,11%	2747	27,14%
4ª	-0,38	-----	-0,18	-0,28	1879	18,57%	4626	45,71%
5ª	-0,18	-----	0,02	-0,08	2104	20,79%	6730	66,50%
6ª	0,02	-----	0,22	0,12	2293	22,66%	9023	89,16%
7ª	0,22	-----	0,42	0,32	1097	10,84%	10120	100,00%

FONTE: O Autor (2021)

Nesse caso foram calculadas um total de sete classes com o intervalo de 0,20 m entre elas. É possível notar que a maioria dos resultados se encontram no intervalo de classe entre 0,02 e 0,22 metros, com uma frequência relativa de 22,66%, seguido, pela classe quinta classe de -0,18 a 0,02 metros, com uma frequência relativa de 20,79%, acompanhado pela quarta classe com uma frequência relativa de 18,57%.

Figura 55 – Gráfico da Distribuição de Frequência das Discrepâncias Refinadas



FONTE: O Autor (2021)

Dos 10.120 pontos que foram analisados após o refinamento, podemos perceber, na Figura 55, que as menores frequências estão nas bordas da distribuição de frequência, nas classes 1 e 2, com as respectivas frequências relativas 7,45% e 7,58%.

As medidas de posição e dispersão são apresentadas na Tabela 32, sendo que a média aritmética de -0,19 metros, a mediana de -0,14 metros e a moda de 0,12 metros.

Tabela 32 – Medidas refinadas de Posição e Dispersão das discrepâncias

<b>Medidas de Posição (m)</b>	
Média Aritmética	-0,19
Mediana	-0,14
Moda	0,12
<b>Medidas de Dispersão (m)</b>	
Desvio Médio	0,28
Desvio Padrão	0,34
Erro Máximo	1,02
Variância	0,12

FONTE: O Autor (2021)

Os valores das medidas de dispersão para a frequência refinada foram para o desvio médio de 0,26 metros, para o desvio padrão de 0,34 metros, para o erro máximo de 1,02 metros e para a variância de 0,12 m.

#### 6.2.6 Correção Altimétrica por Interpolação Quadrática

Com as nuvens PCD e PCL filtradas na etapa anterior, foi possível gerar a Tabela 33 com a correção da diferença altimétrica entre a nuvem PCD e a PCL,

conforme t3pico 5.2.7. A Tabela 33 apresenta 10.121 linhas e para reduzir o tamanho de apresenta33o foram colocadas apenas 8 linhas para exemplificar este resultado.

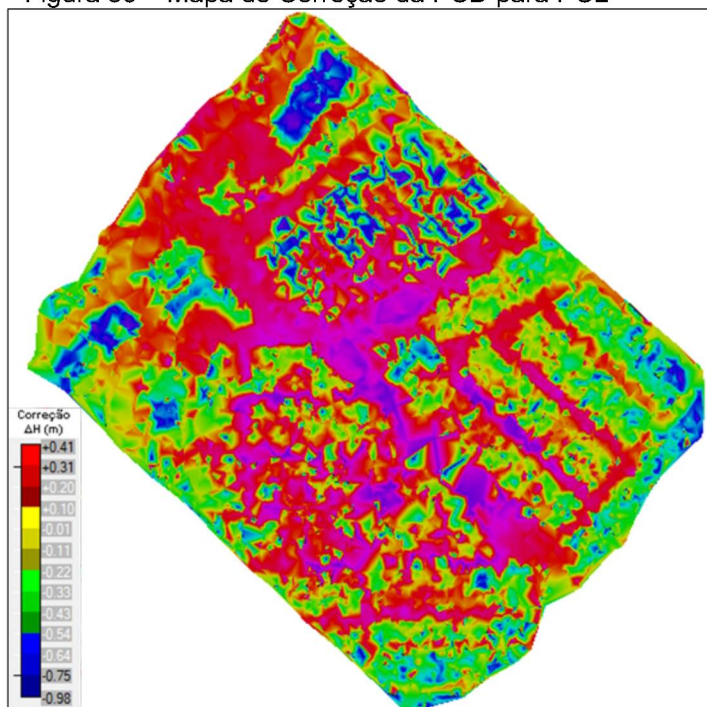
Tabela 33 – Amostra da Diferen33a Altim33trica entre a Nuvem PCD e a PCL

E (m)	N (m)	Corre33o (m)
667.494,62	7.177.214,18	-0,98
...		
667.941,33	7.177.106,76	-0,05
...		
667.798,33	7.177.438,38	0,41

FONTE: O Autor (2021)

Da Tabela 33 foi poss33vel gerar o mapa de corre33o da nuvem da PCD para a PCL, ver Figura 56. Podemos observar que a regi33o azul do mapa 33 a regi33o dos telhados com maior corre33o altim33trica, na nuvem PCD, e a regi33o vermelha 33 a regi33o do solo com menor corre33o altim33trica, na nuvem PCD.

Figura 56 – Mapa de Corre33o da PCD para PCL

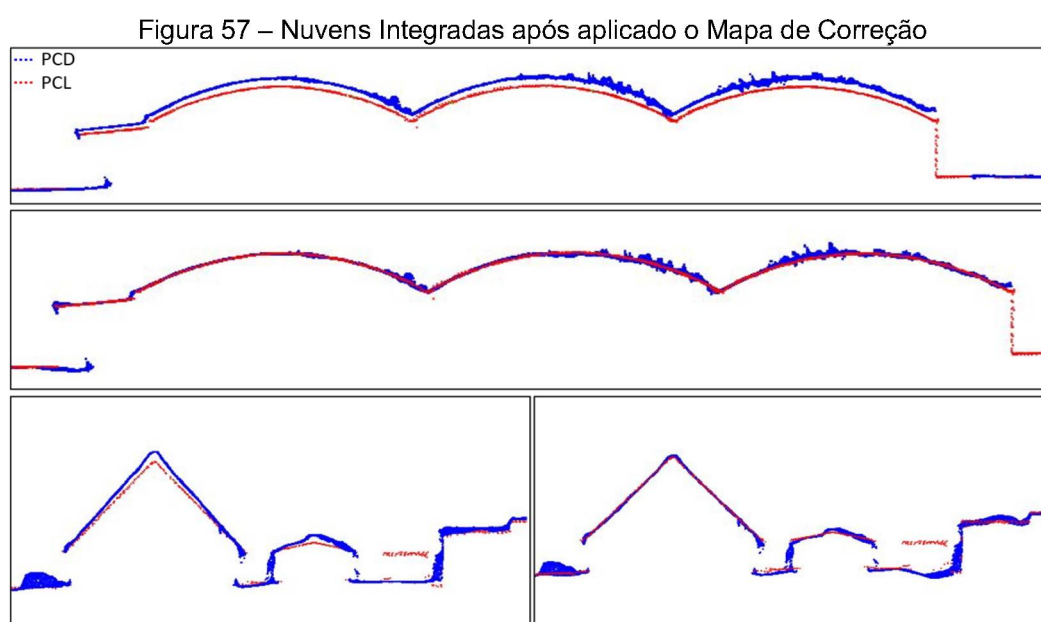


FONTE: O Autor (2021)

### 6.2.7 Integração das Nuvens de Pontos

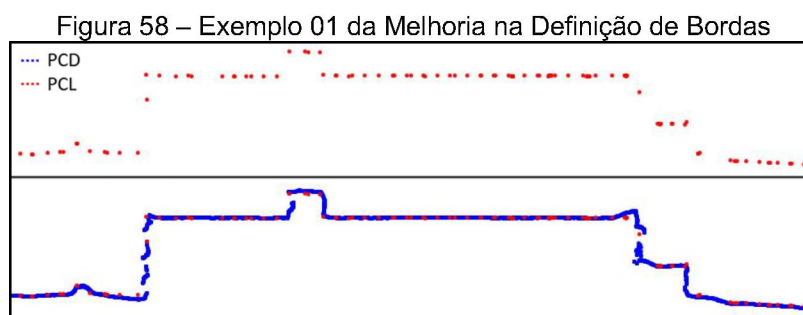
Essa etapa consiste na obtenção dos resultados da integração de nuvens de pontos por meio da aplicação do mapa de correção, gerado anteriormente, na nuvem PCD, para que a mesma possa ser ajustada na nuvem PCL, conforme tópico 5.2.8.

A Figura 57 demonstra a aplicação do mapa de correção gerado. Como podemos perceber a nuvem de pontos oriunda do VANT, a PCD em azul, foi corrigida e ajustada a nuvem de pontos oriunda do LiDAR, a PCL em vermelho compreendida nesse trabalho como a verdade em campo.



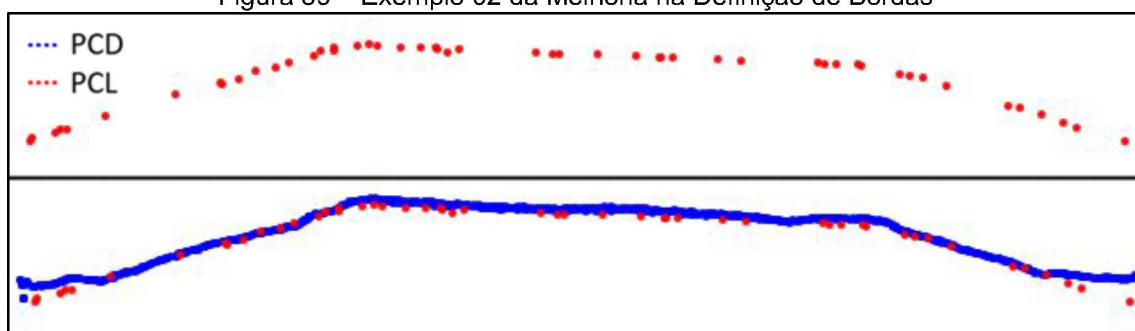
FONTE: O Autor (2021)

Nas seguintes figuras (Figura 58, Figura 59 e Figura 60) podemos ver que a integração das nuvens (PCD e PCL) **melhorou significativamente a definição de bordas das edificações** para uma futura reconstrução 3D.



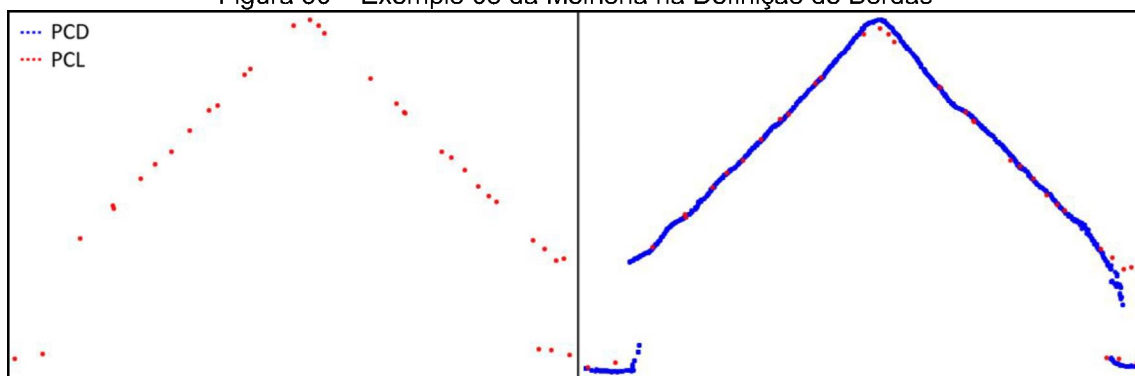
FONTE: O Autor (2021)

Figura 59 – Exemplo 02 da Melhoria na Definição de Bordas



FONTE: O Autor (2021)

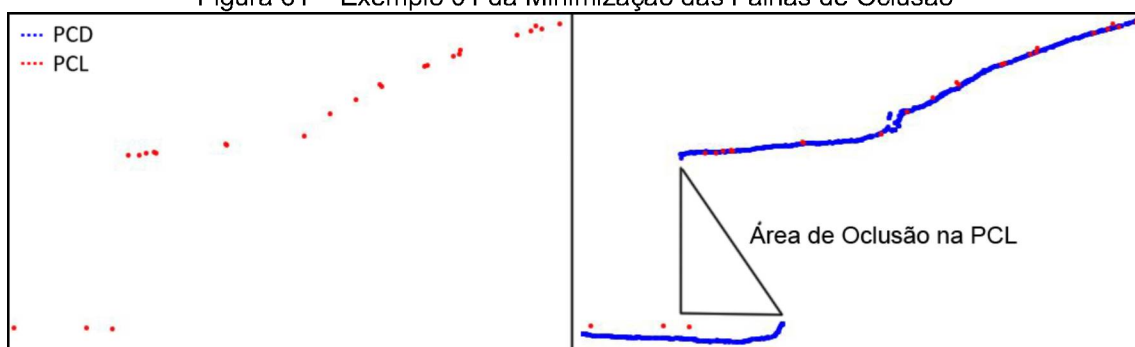
Figura 60 – Exemplo 03 da Melhoria na Definição de Bordas



FONTE: O Autor (2021)

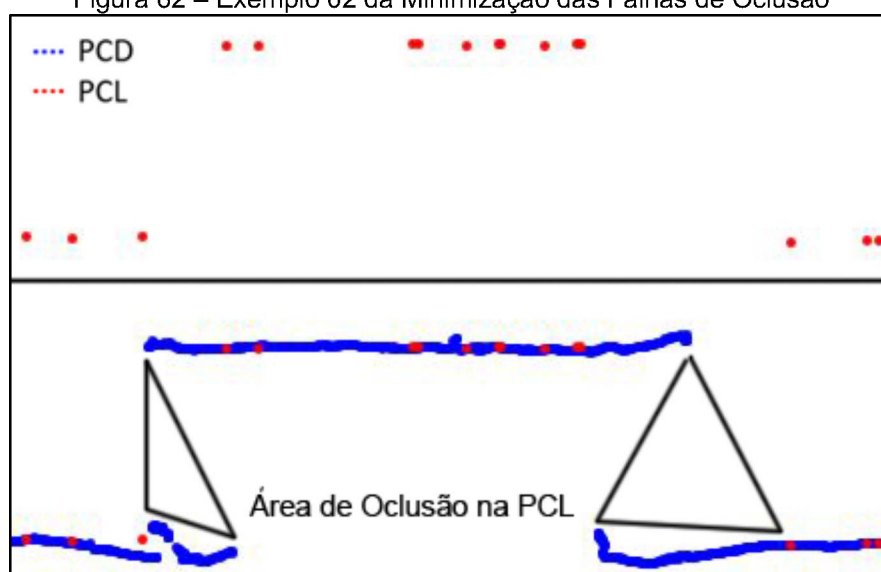
Nas seguintes figuras (Figura 61 e Figura 62) podemos ver que a integração das nuvens (PCD e PCL) **minimizou significativamente as falhas de oclusão** para uma futura reconstrução 3D.

Figura 61 – Exemplo 01 da Minimização das Falhas de Oclusão



FONTE: O Autor (2021)

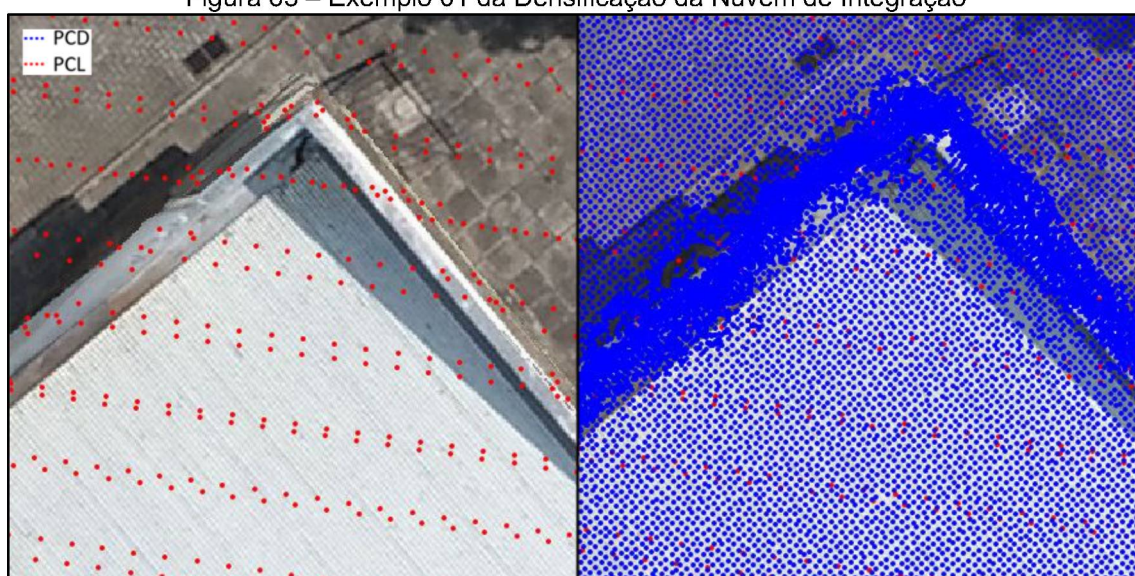
Figura 62 – Exemplo 02 da Minimização das Falhas de Oclusão



FONTE: O Autor (2021)

Nas seguintes figuras (Figura 63 e Figura 64) podemos ver que a integração das nuvens (PCD e PCL) **houve uma densificação significativa**, inicialmente a nuvem PCL tinha 2.110.626 pontos, ou seja, 7,7 ptos/m<sup>2</sup>, já a nuvem PCD inicialmente tinha 33.452.878 pontos, ou seja, 132,7 ptos/m<sup>2</sup>. Com essa fusão das nuvens obtivemos uma nuvem com 35.563.504 pontos, ou seja, 140,4 ptos/m<sup>2</sup>.

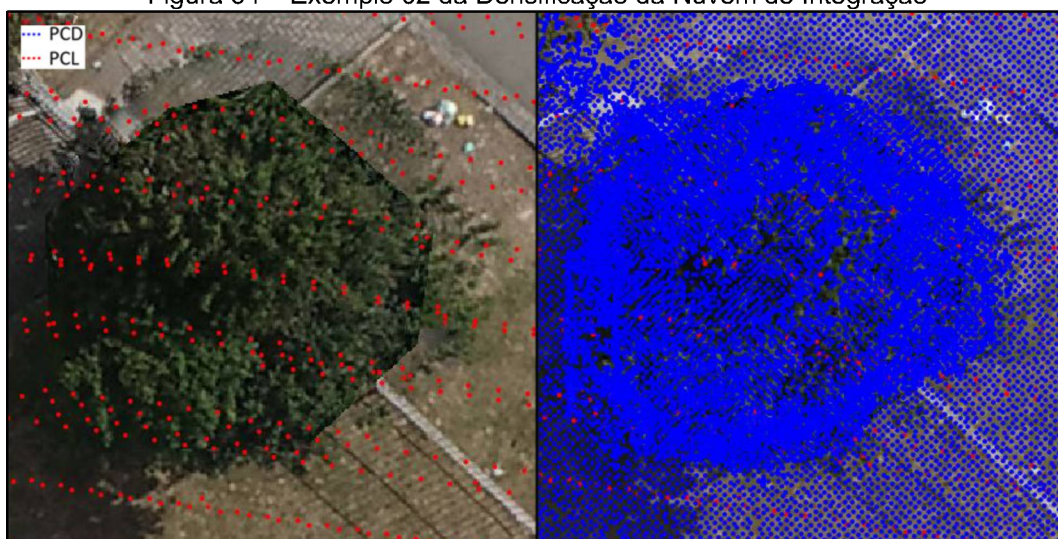
Figura 63 – Exemplo 01 da Densificação da Nuvem de Integração



FONTE: O Autor (2021)



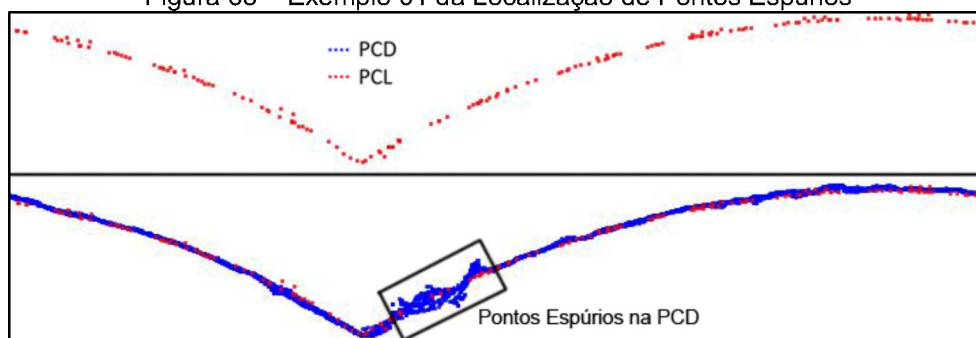
Figura 64 – Exemplo 02 da Densificação da Nuvem de Integração



FONTE: O Autor (2021)

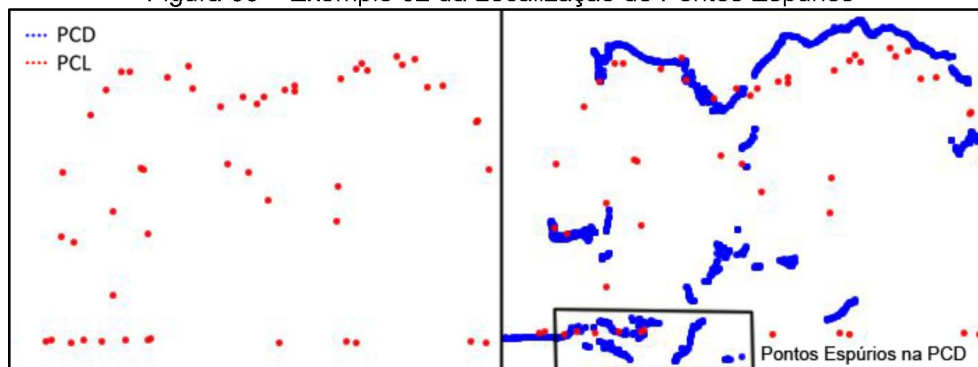
Nas seguintes figuras (Figura 65 e Figura 66) podemos ver que a integração das nuvens (PCD e PCL) **possibilitou localizar os pontos espúrios na nuvem PCD** com maior facilidade, desta maneira melhorando significativamente a classificação das nuvens de pontos para uma futura reconstrução 3D.

Figura 65 – Exemplo 01 da Localização de Pontos Espúrios



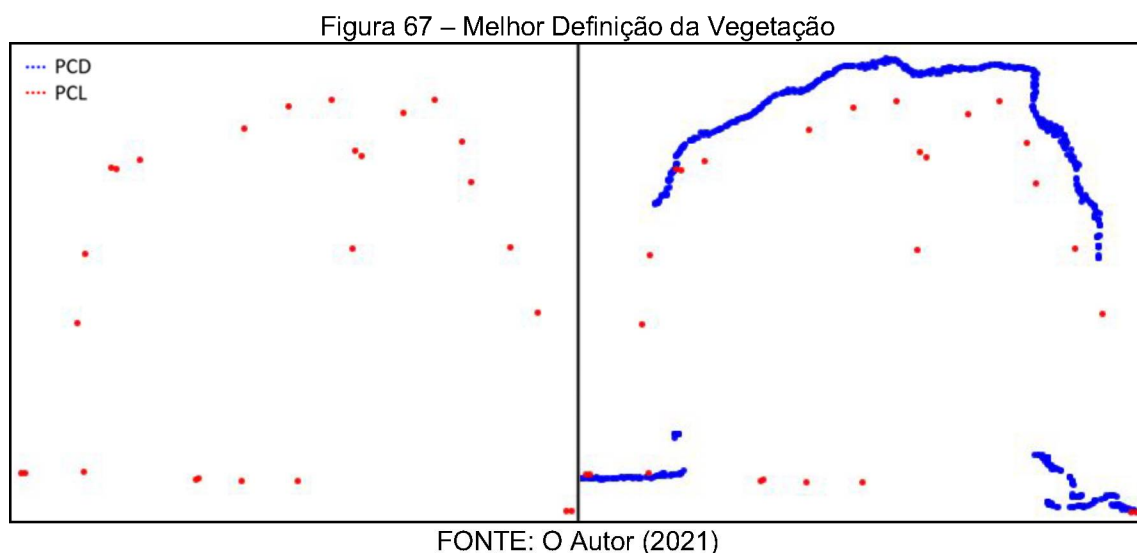
FONTE: O Autor (2021)

Figura 66 – Exemplo 02 da Localização de Pontos Espúrios

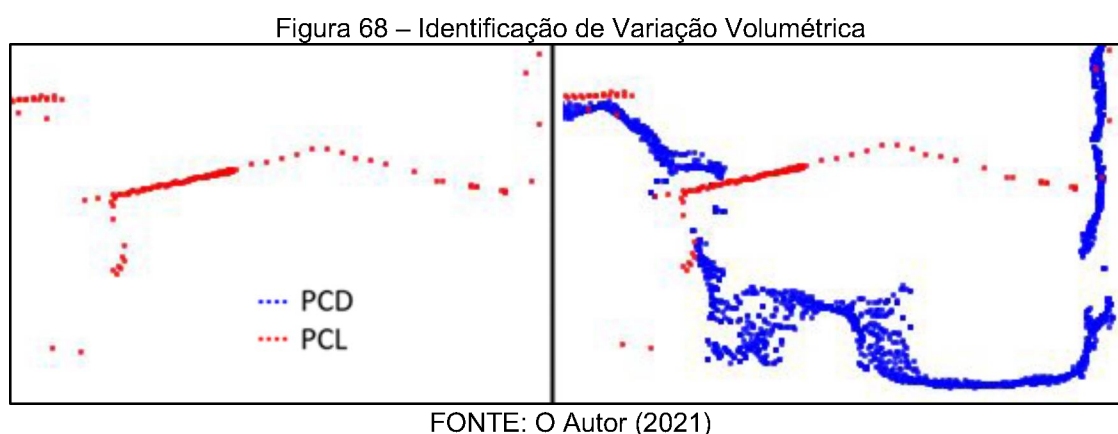


FONTE: O Autor (2021)

Na Figura 67 podemos ver que a integração das nuvens (PCD e PCL) **definiu a forma da copa da árvore com maior precisão**, desta maneira melhorando significativamente a classificação da vegetação e por consequente a melhoria da modelagem tridimensional de árvores nas áreas urbanas.



Na Figura 68 podemos ver que a integração das nuvens (PCD e PCL) **auxiliou para encontrar alterações nas edificações**, neste caso uma remoção de edificação, e assim identificando variações volumétricas nas nuvens PCL e PCD.



## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A primeira parte da pesquisa apresentou uma metodologia para extrair coordenadas tridimensionais da nuvem de pontos LIDAR, para obtenção de entidades pontuais, empregando Regressão Linear e Interseção de Retas. Essas entidades pontuais, identificáveis no terreno, foram cantos de cobertura de telhado e cumeeiras de edificações retangulares com quatro águas.

Adicionalmente, as coordenadas tridimensionais de entidades pontuais, extraídas com o procedimento proposto pela pesquisa foram comparadas com as coordenadas obtidas por levantamento topográfico (verdade de campo), onde este levantamento foi empregado para a verificação das exatidões das entidades pontuais extraídas pela Regressão Linear e Interseção de Retas.

Com base no estudo realizado nesta primeira parte, apresentam-se as seguintes conclusões e recomendações:

- a) A partir dos resultados obtidos da experimentação realizada, conclui-se que as coordenadas tridimensionais das entidades pontuais de cantos de telhados, extraídas com o procedimento de Regressão Linear e Interseção de Retas, foram mais precisas que as coordenadas de entidades pontuais de cumeeiras obtidas como o mesmo procedimento;
- b) Imprecisões nas coordenadas nos pontos de verificação de cumeeiras, devido as dificuldades de medida no campo ou visada do detalhe pontual por irradiação topográfica, pode ser a causa mais provável da menor exatidão tridimensional nas coordenadas dessa entidade pontual, extraída com a metodologia proposta;
- c) Testes estatísticos detectaram a existência uma pequena tendência a componente N das coordenadas pontuais de cantos de telhados, extraídas com o procedimento proposto, mas de dimensões aceitáveis se comparadas com a precisão planimétrica nominal de levantamento LiDAR;
- d) As exatidões planialtimétricas das coordenadas tridimensionais das entidades pontuais de cantos de telhados permitiram o enquadramento para escalas de partir de 1/2.000 do PEC-PCD, Classe A, e inferiores;

e) As exatidões das coordenadas tridimensionais, de entidades pontuais de cumeeiras, obtidas com o procedimento de Regressão Linear e Interseção de Retas, permitiram enquadramento no PEC-PCD, Classe A na escala 1/3.000, e nas escalas menores, e no caso da utilização das exatidões das coordenadas tridimensionais.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados nesse estudo mostram que o método, proposto de Regressão Linear e Interseção de Retas, para a extração de entidades pontuais em uma nuvem de pontos LiDAR, pode ser recomendado em importantes aplicações das Engenharias para uso em processos fotogramétricos de mapeamentos em escalas do PEC-PCD, Classe A de 1/2.000, e inferiores. Entretanto, a metodologia proposta apresenta a desvantagem de utilizar método semiautomático para a seleção de pontos laser scanner, próximos as bordas de telhados e cumeeiras.

Em trabalhos futuros, metodologias para a seleção automática desses pontos serão estudadas e implantadas para a automação do método proposto para a extração de entidades pontuais de cantos de telhados e de cumeeiras.

Um ponto importante a se considerar nesta primeira parte da pesquisa é a viabilidade da utilização destas entidades pontuais para apoiar levantamentos de dados tridimensionais oriundos de VANT, sem a necessidade de se realizar um levantamento utilizando ponto de controle por topografia (GNSS).

Espera-se que com a utilização desta metodologia a precisão do levantamento seja melhorada, e a utilização de VANT para a atualização de bases cartográficas existente seja cada vez mais usual e com mais rapidez nas atualizações uma vez que voos VANT são mais rápido de ser realizados que voo fotogramétricos tradicionais. Visando esta possibilidade e um ganho na modelagem das áreas urbanas esta pesquisa continua os trabalhos para uma integração de nuvem de pontos VANT com nuvem de pontos LiDAR.

A segunda parte da pesquisa apresentou uma metodologia para de integração de nuvem de pontos VANT com LiDAR, utilizando a metodologia do de obtenção de entidades pontuais, para obter os pontos de controle no processamento fotogramétrico. Com base no estudo realizado nesta primeira parte, apresentam-se as seguintes conclusões e recomendações:

- a) Essa utilização das entidades pontuais foram a garantia de que planimetricamente a nuvem VANT e LiDAR fossem compatíveis em planimetria, assim realizando a integração das nuvens em planimetria;
- b) A exatidão geral do processamento fotogramétrico apresentou baixos resíduos para as coordenadas X, Y e Z (valores centimétricos), demonstrando que a utilização das entidades pontuais atendeu a necessidade para a integração das nuvens de pontos VANT e LiDAR;
- c) As diferenças das nuvens de pontos VANT e LiDAR antes da integração apresentam um padrão, onde a nuvem VANT, ao nível do solo, tem uma discrepância negativa em média de vinte centímetros e para o caso dos telhados, foi observado que os pontos que reconstituem tal feição na nuvem VANT apresentou uma discrepância no sentido positivo, em média de um metro, logo, podemos concluir que o processamento fotogramétrico do VANT apresentou um fator de escala na componente Z;
- d) Para corrigir este fator de escala utilizou-se pontos de integração, estes pontos foram localizados em ambas as nuvens VANT e LiDAR, porém estes pontos precisam de uma filtragem estatística, que ao final desta podemos concluir que a tabela de distribuição de frequência dos pontos de integração apresentou resultados similares ao observado na comparação visual das nuvens;
- e) Com as nuvens VANT e LiDAR filtradas, foi possível gerar uma correção da diferença altimétrica entre as nuvens, ou seja, o mapa de correção entre as nuvens. Logo, podemos concluir que utilizando este mapa com a interpolação quadrática foi possível corrigir este fator de escala apresentado em Z na nuvem de pontos VANT.

Esta pesquisa apresenta uma metodologia completa para a integração das nuvens VANT e LiDAR, que para o futuro seja programado um algoritmo de integração de nuvens automático, facilitado para que os usuários possam integrar nuvens rapidamente e já partam para a classificação e modelagem.

Esta integração permitiu obter uma nuvem de pontos mais densa que a nuvem do LiDAR, minimizando as falhas de oclusão, melhoram a definição de bordas das edificações, a reduzindo os pontos espúrios e obtende do uma nuvem de pontos com melhor condições geométricas para a extração e modelagem dos elementos cartográficos.

Para trabalhos futuro sugere-se que sejam realizados outros testes de integração, como por exemplo, Transformação Isogonal de sete parâmetros, que seja investigado o problema da variação altimétrica na nuvem de pontos geradas por aerolevante VANT, que sejam aplicadas técnicas de modelagem na nuvem integrada para avaliar a performace deste ganho na densidade da nuvem LiDAR (PCL) com a nuvem VANT (PCD) e que sejam realizados teste de classificação de pontos na nuvem integrada para avaliar a melhoria na densificação.

## REFERÊNCIAS

AGÜERA-VEGA, F. *et al.* Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry. [s. l.], 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.062>. Acesso em: 2 mar. 2021.

AMISSE, C. **Modelagem 3D de telhados de edificações singulares a partir de imagens UAV para estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial**. 105 ff. 2016. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Available at: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/55199/R-D-CAISSE-AMISSE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 jan. 2021.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003.

BALSA-BARREIRO, J.; FRITSCH, D. Generation of visually aesthetic and detailed 3D models of historical cities by using laser scanning and digital photogrammetry. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, [s. l.], v. 8, p. 57–64, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.12.001>

BESL, P. J.; MCKAY, N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 239–256, 1992. Available at: <https://doi.org/10.1109/34.121791>. Acesso em: 29 jan. 2021.

BIN, X. *et al.* LASER FOOTPRINT SIZE AND POINTING PRECISION ANALYSIS FOR LIDAR SYSTEMS WG I/2-SAR and LiDAR Systems. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing, v. XXXVII, n. Part B1, p. 331–336, 2008. Available at: [https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/55.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/55.pdf). Acesso em: 30 nov. 2020.

BOLLES, R. C.; BAKER, H. H.; MARIMONT, D. H. Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion. **International Journal of Computer Vision**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 7–55, 1987. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00128525>. Acesso em: 17 dez. 2020.

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: Computer Vision with the Opencv Library**. 1. ed. [S. l.]: O'Reilly Media, Inc., 2008. *E-book*.

BRENNER, C. Building reconstruction from images and laser scanning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 6, n. 3–4, p. 187–198, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.006>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BROWN, J.; IGWE, C. F.; ADEKUNLE, I. Modelling and Assessment of Coastal Changes at Golspie Beach, Scotland, UK; An Integration of Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetric Techniques, for an Effective Coastal Land use Management. **International Journal of Scientific Research in Science and Technology**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 361–371, 2016. Available at: <https://doi.org/10.32628/IJSRST162394>. Acesso em: 5 mar. 2021.

BROWN, M.; LOWE, D. Invariant Features from Interest Point Groups. **BRITISH MACHINE VISION CONFERENCE**, [s. l.], v. 4, p. 656–665, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1.1.1.8475>. Acesso em: 17 jan. 2021.

BRYSON, M. *et al.* Kite Aerial Photography for Low-Cost, Ultra-high Spatial Resolution Multi-Spectral Mapping of Intertidal Landscapes. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. e73550, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073550>. Acesso em: 17 fev. 2021.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from Motion in the Geosciences**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781118895818>. Acesso em: 12 jan. 2021.

CAWOOD, A. J. *et al.* LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. **Journal of Structural Geology**, [s. l.], v. 98, p. 67–82, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.04.004>. Acesso em: 2 mar. 2021.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

COOPER, S. *et al.* Examination of the Potential of Terrestrial Laser Scanning and Structure-from-Motion Photogrammetry for Rapid Nondestructive Field Measurement of Grass Biomass. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 531, 2017. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs9060531>. Acesso em: 2 mar. 2021.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema laser scanning: conceitos e princípios de funcionamento**. [S. l.]: UFPR, 2003.

DJI. **DJI PHANTOM 4 PRO**. [S. l.], 2021. Available at: <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro-v2>. Acesso em: 29 mar. 2021.

DRESCH, G. **AVALIAÇÃO AUTOMÁTICA DA ACURÁCIA RELATIVA DE DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO**. 106 ff. 2015. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Available at: [https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/40083/R\\_DRESCH.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/40083/R_DRESCH.pdf?sequence=2&isAllowed=y). Acesso em: 28 jan. 2021.

EISENBEISS, H. Eisenbeiss The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping. *In:* , 2011, Wichmann Verlag, Heidelberg. **Fritsch/Spiller (eds.): Photogrammetric Week 2011**. Wichmann Verlag, Heidelberg: [s. n.], 2011. p. 135–145. Available at: <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/140Eisenbeiss.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2020.

EISENBEISS, H. **UAV photogrammetry**. 236 f. 2009. - ETH Zürich, [s. l.], 2009. Available at: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264>. Acesso em: 3 dez. 2020.

FIORILLO, F. *et al.* 3d Surveying and modelling of the Archaeological Area of Paestum, Italy. **Virtual Archaeology Review**, [s. l.], v. 4, n. 8, p. 55, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4995/var.2013.4306>. Acesso em: 2 mar. 2021.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Graphics and Image Processing Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. [s. l.], 1981. Available at: <http://www.cs.ait.ac.th/~mdailey/cvreadings/Fischler-RANSAC.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2021.

FLENER, C. *et al.* Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography. **Remote Sens**, [s. l.], v. 5, p. 6382–6407, 2013. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs5126382>. Acesso em: 3 mar. 2021.

FRAHM, J. M. *et al.* Building Rome on a cloudless day. *In:* COMPUTER VISION, ECCV 2010 - 11TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION, PROCEEDINGS. Part 4ed. Heraklion, Crete, Greece: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. v. 6314 LNCS, p. 368–381. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-15561-1\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15561-1_27). Acesso em: 15 jan. 2021.

FRIEDMAN, J. H.; BENTLEY, J. L.; FINKEL, R. A. An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time. **ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 209–226, 1977. Available at: <https://doi.org/10.1145/355744.355745>. Acesso em: 29 jan. 2021.

FURUKAWA, Y. *et al.* Towards internet-scale multi-view stereo. *In:* , 2010, San Francisco, USA. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**. San Francisco, USA: [s. n.], 2010. p. 1434–1441. Available at: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5539802>



FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *In:* , 2007, Minneapolis, USA. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)**. Minneapolis, USA: [s. n.], 2007. p. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383246>

GALLAY, M. *et al.* Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domic Cave, Slovakia. **International Journal of Speleology**, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 277–291, 2015. Available at: <https://doi.org/10.5038/1827-806X.44.3.6>. Acesso em: 2 mar. 2021.

GEMAEEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994.

GOINAROV, A. R. **The acquisition of photographs using a radio control model helicopter for aerial photogrammetry**. 1997. - Ryerson University, [s. l.], 1997.

GOLUB, G. H.; VAN LOAN, C. F. **Matrix Computations**. Baltimore and London: Johns Hopkins University Press, 1996. *E-book*.

GRUEN, A.; BALTSAVIAS, E.; HENRICSSON, O. **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)**. 7. ed. [S. l.]: Birkhäuser Basel, 1997. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8906-3>. Acesso em: 25 jan. 2021.

GRUEN, A.; KUEBLER, O.; AGOURIS, P. **Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial Space Images**. 5. ed. [S. l.]: Birkhäuser Basel, 1995. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9242-1>. Acesso em: 25 jan. 2021.

HABIB, A. F.; ZHAL, R.; KIM, C. Generation of complex polyhedral building models by integrating stereo-aerial imagery and lidar data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, [s. l.], v. 76, n. 5, p. 609–623, 2010. Available at: <https://doi.org/10.14358/PERS.76.5.609>

HAINOSZ, F. S. **INFLUÊNCIAS DE CALIBRAÇÕES AÉREAS DE UMA CÂMARA DIGITAL INTEGRADA COM UM SLSA NA ACURÁCIA DE ORTOIMAGENS CURITIBA 2012**. 126 f. 2012. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Available at: [https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/29733/R - D - FABIANO SCHEER HAINOSZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/29733/R-D-FABIANO SCHEER HAINOSZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 4 out. 2020.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. 2ªed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511811685>. Acesso em: 8 jan. 2021.

HEEL, J. Direct Estimation of Structure and Motion from Multiple Frames. [s. l.], 1990. Available at: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6004>. Acesso em: 17 dez. 2020.

HORN, B. K. P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. **Journal of the Optical Society of America A**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 629, 1987. Available at: <https://doi.org/10.1364/josaa.4.000629>. Acesso em: 29 jan. 2021.

HUANG, T. S.; FAUGERAS, O. D. Some Properties of the E Matrix in Two-View Motion Estimation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 1310–1312, 1989. Available at: <https://doi.org/10.1109/34.41368>. Acesso em: 12 jan. 2021.

JAVERNICK, L.; BRASINGTON, J.; CARUSO, B. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. **Geomorphology**, [s. l.], v. 213, p. 166–182, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. Available at: [www.parentese.com.br](http://www.parentese.com.br). Acesso em: 3 dez. 2020.

JOHNSON, K. *et al.* Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. **Geosphere**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 969–986, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1130/GES01017.1>. Acesso em: 17 fev. 2021.

JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R. Y.; CARMO, R. B. do. Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações em Agricultura de Precisão no Brasil. *In:* , 2011, Curitiba. (L. André de Castro Jorge, R. Yassushi Inamasu, & R. Borges do Carmo, Org.) **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. Curitiba: [s. n.], 2011. p. 399–406. Available at: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.12.17.38/doc/p1484.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2020.

KHAN, A. *et al.* Low Power Greenhouse Gas Sensors for Unmanned Aerial Vehicles. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 1355–1368, 2012. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs4051355>. Acesso em: 3 dez. 2020.

KLAPYTA, P.; KOLECKA, N. Combining LiDAR data with field mapping and Schmidt-hammer relative age dating—Examples from Babia Góra range (Western Carpathians, Poland). **Geomorphometry for Geosciences**. Jasiewicz, J., Zwoliński, Z., Mitasova, H., Hengl, T. Eds., [s. l.], p. 217–220, 2015.

KOREŇ, M.; MOKROŠ, M.; BUCHA, T. Accuracy of tree diameter estimation from terrestrial laser scanning by circle-fitting methods. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 63, p. 122–128, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.07.015>

KWON, S. *et al.* Smart Merging Method for Hybrid Point Cloud Data using UAV and LIDAR in Earthwork Construction. *In:* , 2017. **Procedia Engineering**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2017. p. 21–28. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.168>

LALIBERTE, A. S. *et al.* Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: Image processing workflows and applications for rangeland environments. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 3, n. 11, p. 2529–2551, 2011. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs3112529>. Acesso em: 3 dez. 2020.

LATO, M. *et al.* Rock bench: Establishing a common repository and standards for assessing rockmass characteristics using LiDAR and photogrammetry. **Computers and Geosciences**, [s. l.], v. 50, p. 106–114, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.014>

LESLAR, M. Integrating Terrestrial LiDAR with Point Clouds Created from Unmanned Aerial Vehicle Imagery. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Toronto, Canada, v. 40, n. 1, p. 97–101, 2015. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-97-2015>. Acesso em: 19 fev. 2021.

LESLAR, M. **The Use of Unmanned Aircraft in Vehicle Collision Reconstruction**. 2001. - Ryerson University, [s. l.], 2001.

LONGHITANO, G. A. **VANTS PARA SENSORIAMENTO REMOTO: APLICABILIDADE NA AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DE IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR ACIDENTES COM CARGAS PERIGOSAS**. 163 f. 2010. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Available at: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10012011-105505/publico/Dissertacao\\_George\\_Alfredo\\_Longhitano.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10012011-105505/publico/Dissertacao_George_Alfredo_Longhitano.pdf). Acesso em: 2 dez. 2020.

LONGUET-HIGGINS, H. C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. **Nature**, [s. l.], v. 293, n. 5828, p. 133–135, 1981. Available at: <https://doi.org/10.1038/293133a0>. Acesso em: 12 jan. 2021.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>. Acesso em: 17 dez. 2020.

LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. *In:* , 1999, Kerkyra, Greece. **Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision**. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999. p. 1150–1157. Available at: <https://doi.org/10.1109/iccv.1999.790410>. Acesso em: 15 jan. 2021.

LUCIEER, A.; JONG, S. M. d.; TURNER, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 97–116, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>

LUHMANN, T. *et al.* **Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging**. 2. ed. Göttingen, Germany: De Gruyter, 2013. *E-book*.

LUONG, Q. T.; FAUGERAS, O. D. The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis. **International Journal of Computer Vision**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 43–75, 1996. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00127818>. Acesso em: 12 jan. 2021.

MADER, D. *et al.* UAV-Based acquisition of 3D point cloud - A comparison of a low-cost laser scanner and SfM-tools. *In:* , 2015. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. [S. l.]: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015. p. 335–341. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-335-2015>

MALLET, C.; BRETAR, F. **Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art**. [S. l.: s. n.], 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007>

MANCINI, F. *et al.* Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 6880–6898, 2013. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs5126880>

MATAS, J. State-of-the-art RANSAC. **IEEE Computer Vision and Patter Recognition (CVPR)**, [s. l.], 2011. Available at: [http://www.imgfsr.com/CVPR2011/Tutorial6/RANSAC\\_CVPR2011.pdf](http://www.imgfsr.com/CVPR2011/Tutorial6/RANSAC_CVPR2011.pdf)

MENDES, C. C. T. **Navegação de robôs móveis utilizando visão estéreo**. 2012. - Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Available at: <https://doi.org/10.11606/D.55.2012.tde-18062012-162436>. Acesso em: 9 jan. 2021.

MONTGOMERY, D. C. ; RUNGER, G. C. **Estatística e probabilidade aplicada para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MOON, D. *et al.* Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 98, p. 322–331, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.020>. Acesso em: 30 nov. 2020.

MOONS, T.; VAN GOOL, L.; VERGAUWEN, M. 3D reconstruction from multiple images part 1: Principles. **Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 287–404, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1561/0600000007>

MOSTAFA, M.; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems: How do they work? What is the attainable accuracy. **Proceedings, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting**, [s. l.], p. 11, 2001. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.574.9559>. Acesso em: 28 nov. 2020.

NEUGIRG, F. *et al.* Quantification, analysis and modelling of soil erosion on steep slopes using LiDAR and UAV photographs. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, [s. l.], v. 367, p. 51–58, 2015. Available at: <https://doi.org/10.5194/piahs-367-51-2015>. Acesso em: 3 mar. 2021.

NOUWAKPO, S. K.; WELTZ, M. A.; MCGWIRE, K. Assessing the performance of structure-from-motion photogrammetry and terrestrial LiDAR for reconstructing soil surface microtopography of naturally vegetated plots. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 308–322, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1002/esp.3787>

OKAMOTO, A. Orientation and Construction of Models Part I: The Orientation Problem in Close-Range Photogrammetry\*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, [s. l.], v. 47, n. 10, p. 1437–1454, 1981. Available at: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1981journal/oct/1981\\_oct\\_1437-1454.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1981journal/oct/1981_oct_1437-1454.pdf). Acesso em: 17 dez. 2020.

OLARIU, M. I. *et al.* Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. **Geosphere**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 247–259, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1130/GES00139.1>

OLIVEIRA JUNIOR, E. M. DE. **PROPOSTA DE UM MÉTODO ADAPTATIVO PARA REGISTRO DE DADOS RGB-D**. 97 f. 2015. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Available at: [https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/40985/R - D - ELIZEU MARTINS DE OLIVEIRA JUNIOR.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/40985/R-D-ELIZEU-MARTINS-DE-OLIVEIRA-JUNIOR.pdf?sequence=2&isAllowed=y). Acesso em: 29 jan. 2021.

OPTECH, T. **Pegasus-HD500-SpecSheet**. [S. l.], 2020. Available at: <http://www.teledyneoptech.com/en/support/legacy-products/>. Acesso em: 3 out. 2020.

OUÉDRAOGO, M. M. *et al.* The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. **Geomorphology**, [s. l.], v. 214, p. 339–355, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.016>. Acesso em: 3 mar. 2021.

PERSSON, Å. *et al.* Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data. **IN THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES**, [s. l.], v. XXXVI, p. 103–108, 2005. Available at: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/103.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.

QU, Y.; HUANG, J.; ZHANG, X. Rapid 3D Reconstruction for Image Sequence Acquired from UAV Camera. **Sensors**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 225, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/s18010225>. Acesso em: 17 fev. 2021.

ŠAŠAK, J. *et al.* Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry in Mapping Alpine Terrain. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 11, n. 18, p. 2154, 2019. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs11182154>. Acesso em: 5 mar. 2021.

SATTLER, T. **Efficient & Effective Image-Based Localization**. 214 f f. 2013. - RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2013. Available at: <http://publications.rwth-aachen.de/record/444921/files/5031.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. *E-book*.

SIMON, D. A. **Fast and Accurate Shape-Based Registration**. 216 f f. 1996. - Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1996. Available at: [https://ri.cmu.edu/pub\\_files/pub1/simon\\_david\\_1996\\_1/simon\\_david\\_1996\\_1.pdf](https://ri.cmu.edu/pub_files/pub1/simon_david_1996_1/simon_david_1996_1.pdf). Acesso em: 29 jan. 2021.

SMITH, M. J.; CHANDLER, J.; ROSE, J. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: Kite aerial photography. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 155–161, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1002/esp.1702>

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the world from Internet photo collections. **International Journal of Computer Vision**, [s. l.], v. 80, n. 2, p. 189–210, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>. Acesso em: 14 jan. 2021.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. **ACM Transactions on Graphics**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 835–846, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1145/1141911.1141964>. Acesso em: 14 jan. 2021.

SOUDARISSANANE, S. *et al.* Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 389–399, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005>

SRINIVASAN, S. *et al.* Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 1877–1896, 2015. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs70201877>

STRANG, G.; BORRE, K. **LINEAR ALGEBRA, GEODESY, AND GPS**. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 1997. *E-book*.

SZABÓ, S. *et al.* Automated registration of potential locations for solar energy production with Light Detection and Ranging (LiDAR) and small format photogrammetry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 3820–3829, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.117>. Acesso em: 22 fev. 2021.

SZELISKI, R. **Computer Vision - Algorithms and Applications**. London: Springer-Verlag, 2011. ISSN 1868-0941. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0_1). Acesso em: 8 jan. 2021.

TOMMASELLI, A. M. **Fotogrametria básica**. Presidente Prudente: UNESP, 2009.

TOPCON CORPORATION. **Hiper SR: Especificações**. [S. l.], 2021. Available at: <https://www.topconpositioning.com/br/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-sr#panel-product-specifications>. Acesso em: 3 jun. 2021.

TOPCON CORPORATION. **Topcon GM-50 Series Geodetic Measurement Station**. [S. l.], 2019. Available at: [https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/GM-50\\_TOPbasic\\_E.pdf](https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/GM-50_TOPbasic_E.pdf). Acesso em: 3 jun. 2021.

TRIGGS, B. *et al.* Bundle adjustment – a modern synthesis. *In*: TRIGGS B.; ZISSERMAN A.; SZELISKI R. (org.). **Vision Algorithms: Theory and Practice. IWVA 1999. Lecture Notes in Computer Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2000. v. 1883, p. 298–372. Available at: [https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7\\_21](https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21). Acesso em: 15 jan. 2021.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 1392–1410, 2012. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs4051392>. Acesso em: 3 dez. 2020.

ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a Biological character. Royal Society (Great Britain)**, [s. l.], v. 203, n. 1153, p. 405–426, 1979. Available at: <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>

VAN BLYENBURGH, P. **2013–2014 RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014**. Paris: BLYENBURGH & co., 2014.

VAN BLYENBURGH, P. **2018 RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective**. 15. ed. Paris: BLYENBURGH & co., 2018. *E-book*.

VAN BLYENBURGH, P. UAVs: an overview. **Air & Space Europe**, [s. l.], v. 1, n. 5–6, p. 43–47, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1016/s1290-0958\(00\)88869-3](https://doi.org/10.1016/s1290-0958(00)88869-3)

VERICAT, D. *et al.* Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: LOW-cost tools for mapping river corridors. **River Research and Applications**, [s. l.], v. 25, n. 8, p. 985–1000, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.1198>

VOSSelman, G.; MAAS, H. G. **Airborne and terrestrial laser scanning**. 1. ed. Twente: CRC Press, 2010. ISSN 1753-8947. *E-book*.

WALLACH, H.; O'CONNELL, D. N. The kinetic depth effect. **Journal of Experimental Psychology**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 205–217, 1953. Available at: <https://doi.org/10.1037/h0056880>. Acesso em: 17 dez. 2020.

WANG, G.; WU, Q. M. J. **Guide to Three Dimensional Structure and Motion Factorization**. London: Springer-Verlag, 2011. ISSN 2191-6586.(Advances in Pattern Recognition). Available at: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-046-5>. Acesso em: 8 jan. 2021.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning - An introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 54, n. 2–3, p. 68–82, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8). Acesso em: 28 nov. 2020.

WESTOBY, M. J. *et al.* “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, [s. l.], v. 179, p. 300–314, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>. Acesso em: 16 fev. 2021.

WILKINSON, M. W. *et al.* A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. **Geosphere**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1865–1880, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1130/GES01342.1>

XU, Z. *et al.* Tridimensional reconstruction applied to cultural heritage with the use of camera-equipped UAV and terrestrial laser scanner. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 6, n. 11, p. 10413–10434, 2014. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs61110413>

ZANDONA, D. F. **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. 92 f. 2013. - UFPR, Curitiba, 2013. Available at: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/11999>. Acesso em: 30 nov. 2020.

ZHANG, Z.; LOOP, C. Estimating the fundamental matrix by transforming image points in projective space. **Computer Vision and Image Understanding**, [s. l.], v. 82, n. 2, p. 174–180, 2001. Available at: <https://doi.org/10.1006/cviu.2001.0909>. Acesso em: 12 jan. 2021.