



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA

CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

PAULO HENRIQUE LIMA DE OLIVEIRA

**Utilização de Drones e Análise Comparativa de Métodos de Aquisição: Fotogrametria e
Laser Scanner - Estudo de Caso Oficina Francisco Brennand**

RECIFE
2022

PAULO HENRIQUE LIMA DE OLIVEIRA

Utilização de Drones e Análise Comparativa de Métodos de Aquisição: Fotogrametria e Laser Scanner - Estudo de Caso Oficina Francisco Brennand

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof.^a Dra. Simone Sayuri Sato

RECIFE
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira, Paulo Henrique Lima de.

Utilização de Drones e Análise Comparativa de Métodos de Aquisição:
Fotogrametria e Laser Scanner - Estudo de Caso Oficina Francisco Brennand /
Paulo Henrique Lima de Oliveira. - Recife, 2022.

61p : il., tab.

Orientador(a): Simone Sayuri Sato

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Cartográfica e
de Agrimensura - Bacharelado, 2022.

1. LIDAR. 2. Aerofotogrametria. 3. Modelo Digital do Terreno. 4. VANT.
I. Sato, Simone Sayuri. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

PAULO HENRIQUE LIMA DE OLIVEIRA

Utilização de Drones e Análise Comparativa de Métodos de Aquisição: Fotogrametria e Laser Scanner - Estudo de Caso Oficina Francisco Brennand

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Aprovada em: 28/outubro/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Simone Sayuri Sato (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Msc. Júlio César Azevedo Luz de Lima (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

Prof. Msc. Carlos Fabrício Assunção da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

“Não sou nem otimista, nem pessimista. Os otimistas são ingênuos, e os pessimistas amargos. Sou um realista esperançoso. Sou um homem da esperança. Sei que é para um futuro muito longínquo. Sonho com o dia em que o sol de Deus vai espalhar justiça pelo mundo todo.” (Ariano Suassuna)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS que sempre esteve comigo em todos os momentos, principalmente nas dificuldades, sem ele eu não seria, efetuaria ou teria nada. Só Ele e eu sabemos o quanto foi difícil realizar essa graduação, quantos momentos eu considerei desistir de tudo, mas a minha fé me sustentou. Agradeço por ser meu Norte, por me ajudar a passar pelas adversidades.

A minha família, pois devo aos meus pais minha eterna gratidão, não só por terem me educado, mas pela força nos momentos difíceis, pelo amor nas correções que formaram meu caráter, ajudando na realização dos meus sonhos. A minha avó Lúcia que sempre foi como uma segunda mãe para mim, aos meus irmãos pelo auxílio e consideração.

Agradecer a minha bela esposa, que sempre esteve ao meu lado com todo seu amor e companheirismo que me ajudaram a aliviar a chegar até aqui, desde seus atos mais simples, como uma palavra de força, como também as mais complexas que só nós sabemos.

Gostaria de agradecer a todos os professores do Departamento de Engenharia Cartográfica que em muito contribuíram para a minha formação acadêmica possível. Em especial a minha orientadora, a Prof.^a Dra. Simone S. Sato, que dedicou seu tempo e compartilhou seu vasto conhecimento me auxiliando neste trabalho, ao Prof. Me. Carlos Fabrício no auxílio na construção da estrutura do trabalho.

Aos amigos companheiros cartógrafos: Rômulo Azevedo, André Menezes, Camila Ribeiro, Érico Barros, Paulo Santana e Júlio Simões, que me auxiliaram compartilhando conhecimentos ímpares no meu período de estágio, vocês foram essenciais para minha formação profissional. Não poderia esquecer de agradecer ao meu amigo, Maurício José, minha dupla das atividades acadêmicas, companhia nas refeições entre as aulas e apoio amigo nos momentos difíceis.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

Com o avanço da tecnologia na área das geotecnologias e ciências cartográficas, as formas de aquisição de dados tornaram-se democráticas e acessíveis, o que facilitou a disseminação de tecnologias, antes de alto valor e de acesso mais restrito. O desenvolvimento tecnológico, possibilitou a portabilidade e a automação dos veículos aéreos não tripulados (VANT), popularmente chamados de drones, em tamanho e peso micro, com funcionalidade remota e autônoma e *payloads* que tornaram a aquisição de dados mais rápida, mantendo a precisão e acurácia necessária para os produtos desejados. Um dos métodos de aquisição de dados que alavancou nos últimos tempos, é a fotogrametria, com uso de soluções *Structure from Motion* em softwares fotogramétricos, possibilitou a aquisição de imagens com drones de baixo custo, acopladas com sensores digitais, possibilitaram soluções cartográficas com desenvolvimento de visão computacional e eficiência métrica para técnicas de reconstrução geométrica digitais a partir da perspectiva das imagens coletadas. Outro equipamento que tem se aliado na celeridade de aquisição de dados e muitas vezes elevando a capacidade de precisão e acurácia dos produtos cartográficos é o sistema LIDAR, que consiste em um sensor que emite pulsos eletromagnéticos para se obter distâncias e modelagens 3D de objetos, edificações ou superfícies. Um destes modelos são os Modelos Digitais de Elevação, que consiste em uma reconstrução do comportamento e características de uma determinada área que se deseja estudar, dividido entre Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfícies (MDS). Esses modelos digitais têm características e definições diferentes, são na maioria das vezes utilizados como dados de entrada em Sistema de Informação Geográficos (SIG), com ampla gama de aplicações em diversas áreas, especialmente de engenharia e ciências ambientais. O presente trabalho comparou duas metodologias de aquisição de dados: aerofotogrametria e LASER scanner para gerar um modelo digital do terreno, apoiado com pontos GNSS, aplicando técnicas de geoprocessamento. Os resultados oriundos das duas metodologias foram comparados e analisados com os padrões de exatidão cartográfica para contestar sua eficiência referente a qualidade posicional.

Palavras chaves: LIDAR; Aerofotogrametria; Modelo Digital do Terreno; VANT.

ABSTRACT

With the advancement of technology in the area of geotechnologies and cartographic sciences, the ways of acquiring data became democratic and accessible, which facilitated the dissemination of technologies, which were previously of high value and of more restricted access. Technological development enabled the portability and automation of unmanned aerial vehicles (UAVs), popularly called drones, in micro size and floor, with remote and autonomous functionality and payloads that made data acquisition faster, maintaining accuracy and accuracy required for the desired end products. One of the methods of data acquisition that has been leveraged in recent times is photogrammetry, using Structure from Motion solutions in photogrammetric software, allowing the acquisition of images with low-cost drones, coupled with digital sensors, enabling cartographic solutions with development of computer vision and metric efficiency for digital geometric reconstruction techniques from the perspective of the collected images. Another equipment that has been allied in the speed of data acquisition and many times increasing the precision and accuracy capacity of cartographic products is the *LIDAR* system, which consists of a sensor that emits electromagnetic pulses to obtain distances and 3D modeling of objects, buildings or surfaces. One of these models is the Digital Elevation Models, which consists of a reconstruction of the behavior and characteristics of a certain area to be studied, divided between Digital Terrain Model (MDT) and Digital Surface Model (MDS). These digital models have different characteristics and definitions, they are most often used as input data in Geographic Information Systems (GIS), with a wide range of applications in different areas, especially engineering and environmental sciences. The present work compared two data acquisition methodologies: aerial photogrammetry and laser scanner to generate a digital model of the terrain, supported with GNSS points, applying geoprocessing techniques. The results from the two methodologies were compared and analyzed with the cartographic accuracy standards to contest their efficiency regarding positional quality.

Keywords: *LIDAR*; Aerial Photogrammetry; DTM; UAV.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de sobreposição transversal e longitudinal na aerofotogrametria.	15
Figura 2 – Modelos de VANT: asa rotativa (esquerda) e asas fixa (direita).	16
Figura 3 – Componentes do Sistema.	17
Figura 4 – Detecção de elementos através da tecnologia LIDAR.	19
Figura 5 – Funcionamento de Laser Scanner Dinâmico Aerotransportado.	19
Figura 6 – Interpolador IDW	24
Figura 7 – Interpolador TIN.	25
Figura 8– Mapa de localização da área de estudo.	27
Figura 9 – VANT <i>Phantom 4 Advanced</i> .	28
Figura 10 – VANT Matrice 300 RTK (esquerda) e LIDAR Zenmuse L1 (direita).	28
Figura 11– Fluxograma do Processamento das imagens.	30
Figura 12 – Croqui Pontos de checagem.	32
Figura 13 – Croqui Pontos de Controle da área.	32
Figura 14 – Alinhamento das Imagens.	33
Figura 15 – Inserindo os Pontos de Apoio.	34
Figura 16 – Correção dos Pontos de apoio.	35
Figura 17 – Nuvem Densa de Pontos.	36
Figura 18 – Modelo Digital de Elevação.	36
Figura 19 – Modelo Digital de Superfície (Fotogrametria).Fonte: Autor (2022).	37
Figura 20 – Nuvem densa de pontos do LIDAR.	38
Figura 21 – Arquivo de nuvem de pontos gerado a partir do MDS (fotogrametria).Fonte: Autor (2022).	38
Figura 22 – Classificação de Solo nuvem de pontos (LIDAR).	39
Figura 23 – Localização de fotos e sobreposição das imagens.	40
Figura 24 – Imagem Residual da Calibração da câmera.	41
Figura 25 – Localização de câmera e erros estimados.	42
Figura 26 – Modelo digital de elevação.	44
Figura 27 – Ortomosaico.	45
Figura 28 – Classificação Filtrada da Nuvem de Pontos (LIDAR).	45
Figura 29 – Classificação de Pontos de Solo (Fotogrametria).	46
Figura 30 – Classificação Solo e Não-Solo (LIDAR).	46
Figura 31– Classificação de Solo e Não-Solo (Fotogrametria).	47
Figura 32 – Regiões abaixo de árvores classificadas (LIDAR).	47
Figura 33 – Regiões próximas de obstrução (vertical) sem informações.	48
Figura 34 – Mais pontos de solo classificados próximos e sob a vegetação (LIDAR).	48

Figura 35 – Regiões sem informação sob vegetação (Fotogrametria).	49
Figura 36 – Grid de pontos de solo (LIDAR).	50
Figura 37 – Grid de pontos de solo (Fotogrametria).....	50
Figura 38 – Resultado MDT (LIDAR).	51
Figura 39 – Resultado MDT (Fotogrametria).....	51
Figura 40 – Detalhe amplificado de superfície (LIDAR).Fonte: Autor (2022).	52
Figura 41 – Detalhe amplificado de superfície (Fotogrametria).	52
Figura 42 – Shape de pontos coletados com estação total em área de vegetação.	53
Figura 43 – Software Class PEC-PCD (ASTGEOTOP).....	54
Figura 44 – Resultado PEC-PCD LIDAR.	55
Figura 45 – Resultado PEC-PCD Fotogrametria.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação Sensor Digital dos equipamentos.	21
Tabela 2 – Especificações LIDAR dos equipamentos.....	21
Tabela 3 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria para Dados Digitais.	26
Tabela 4 – Padrão de Exatidão cartográfica dos Pontos cotados e do MDE, MDT e MDS para Produção de Dados Digitais.	26
Tabela 5 – Dados do processamento de imagens.	41
Tabela 6 – Coeficientes de calibração e matriz de correlação.....	42
Tabela 7 – Erro de localização de câmera médio	43
Tabela 8 – RMSE pontos de controle.....	43
Tabela 9 – RMSE pontos de checagem.	43
Tabela 10 – Lista dos pontos de controle e erros residuais.	43
Tabela 11 – Lista dos pontos de checagem e erros residuais.	44
Tabela 12 – Erros dos pontos em área de vegetação densa.	53
Tabela 13 – Preço de equipamento e opções de softwares compatíveis.	56
Tabela 14 – Preço de equipamento e opções de softwares compatíveis.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DPI	Divisão de Processamento de Imagens
GSD	Ground Sample Distance
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelos Digital do Terreno
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica - Produtos Cartográficos Digitais
3D	Tridimensional
RGB	Red Green Blue
RPA	Remotely-Piloted Aircraft
SfM	Structure from Motion
SHP	Shapefile
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Veículo aéreo não tripulado
GNSS	Global Navigation Satellite System
INS	Inertial Navigation System
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
IMU	Inercial Measurement Unit
CCD	Charge Coupled Device
SfM	Structure From Motion
RMS	Erro Médio Quadrático

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 EMBASAMENTO TEÓRICO	15
3.1 AEROFOTOGRAMETRIA	15
3.2 VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO	16
3.3 LASER SCANNER	17
3.3.1 Sistemas de LIDAR.....	18
3.3.2 Sistemas dinâmicos	19
3.4 COMPARAÇÕES ENTRE LIDAR E FOTOGRAMETRIA.....	20
3.4.1 Resolução espacial.....	21
3.4.2 Tempo de captura.....	21
3.4.3 Tempo de processamento	22
3.4.4 Flexibilidade	22
3.4.5 Perspectiva	22
3.4.6 Iluminação	22
3.4.7 Movimentos e vibrações	23
3.4.8 Densidade de coleta	23
3.4.9 Usabilidade	23
3.5 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	23
3.5.1 Ponderação pelo inverso da distância (IDW)	24
3.5.2 Malha irregular triangular (TIN)	24
3.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	25
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	26
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.3. PLANO DE VOO	30
4.4 PONTOS DE APOIO GNSS	31
4.5 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	32
4.6 PROCESSAMENTO DE IMAGEM	33
4.6.1 Alinhamento das imagens.....	33
4.6.2 Inserir pontos de controle e qualidade	34

4.6.3 Nuvem densa de pontos	35
4.6.4 Modelo digital de superfície	36
4.6.5 Ortomosaico	37
4.7 PROCESSOS DE GERAÇÃO DO MDT	37
4.7.1 Nuvem de pontos bruta.....	37
4.7.2 Classificação de pontos de solo.....	38
4.7.3 Criação malha de pontos	39
4.7.4 Interpolação dos pontos de solo	39
5 RESULTADOS	40
5.1 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS	40
5.2 RESULTADO DE CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS	45
5.3 RESULTADO DA MALHA DE PONTOS.....	49
5.4 RESULTADO DO MDT	50
5.5 AVALIAÇÃO DA PEC-PCD	53
5.6 CUSTOS COMPARATIVOS DOS MÉTODOS	56
6 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a necessidade e a rapidez na obtenção de dados topográficos apoiados pela Fotogrametria trouxeram evoluções sem perder a precisão. O uso do VANT, equipamento muito utilizado na Fotogrametria, quando aliado a outras tecnologias, tornou-se uma escolha para solução de diversos projetos da engenharia e da Aerofotogrametria (REMONDINO et al., 2011; HUDZIETZ; SARIPALLI, 2011).

A aerofotogrametria, que anteriormente era uma ciência pouco difundida no auxílio da topografia devido ao seu alto custo, teve sua ascensão com a utilização do VANT acoplado com sensores digitais (BLAND et al., 2004). Esses sensores, bem como o desenvolvimento da abordagem *Structure from Motion* (SfM) em fotogrametria, (JAUD et al., 2019), aumentou o potencial da fotogrametria com atendimento a acurácia posicional segundo as normas e padrões de exatidão cartográfica dos produtos cartográficos digitais (PEC-PCD). Esse tipo de levantamento tem se tornado ágil e com um baixo custo na obtenção de dados de processamento. Além disso, é acessível para levantamentos de terrenos íngremes, sinuosos e de difícil acesso (MELO E COSTA, 2015). Um dos resultados gerados por esse tipo de levantamento é o Modelo Digital de Elevação (MDE).

O modelo digital de elevação é uma representação numérica matricial (raster) do comportamento altimétrico de uma determinada superfície ou terreno (PETRIE et al., 1990). Quando aplicado em superfícies com grande conglomerado de vegetação ou edificações, o MDE torna-se uma barreira para a aerofotogrametria na obtenção do modelo digital do terreno (MDT). Além disso, o MDE necessita de uma quantidade significativa de informação da cota do terreno para ser feita a utilização de algoritmos de interpolação destes dados. A interpolação dos dados, gera um grid de comportamento daquela determinada área para diversos tipos de estudo como implementação de obras, cálculos de volume de corte e aterro, entre outros (Hugenholtz et al., 2015).

Embora existam diversos métodos de obtenção de dados para realização de produção de um MDE, os avanços tecnológicos proporcionam o surgimento de novas ferramentas que auxiliam no desenvolvimento das técnicas existentes, seja para aprimorar acurácia do método ou reduzir o tempo hábil de coleta de dados, assim aumentando a produção e diminuindo os custos do processo. Nos últimos anos, o sistema lidar se tornou uma das possibilidades para coleta de dados.

Se comparada com a fotogrametria digital, o sistema LIDAR (*Light Detection and*

Ranging), chamado neste trabalho de laser scanner, apresenta diversas vantagens se tratando de áreas mapeadas com grande densidade arbórea. O sistema funciona com auxílio de sensores remotos ativos acoplados em plataformas tripuladas ou não, utilizando emissões de raios de luz refletidas pelas superfícies alcançadas e retornam produzindo dados tridimensionais (SHAN e TOTH, 2008).

Com a densa quantidade de feixes emitidos pelo sensor, muitos deles acabam passando entre as folhagens e caem no solo, tornando assim o sistema laser scanner como um potencial inovador na solução de levantamentos de regiões florestais e com densa quantidade de obstruções entre o sensor e o terreno.

Dessa forma, o presente trabalho planeja comparar os resultados obtidos de elaboração de MDT por processos aerofotogramétricos com os resultados do sistema laser scanner, ambos utilizando plataformas aéreas remotamente tripuladas. Esses resultados serão oriundos de processos de classificação da nuvem de pontos que serão apresentados no trabalho. Para avaliar e comparar as soluções será aplicado o Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é comparar a aquisição de dados de alta resolução adquiridos com VANT e LIDAR aerotransportado na Oficina de Cerâmica de Brennand, Recife, Pernambuco.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Gerar Modelo Digital do Terreno com imagens de alta resolução adquiridas com drone;
- Gerar Modelo Digital do Terreno com nuvem de pontos adquiridos por laser scanner aerotransportado por drone;
- Comparar os modelos produzido por fotogrametria e sistema *LASER scanner*;
- Verificar a qualidade da classificação e sua acurácia baseada na PEC-PCD.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 AEROFOTOGRAMETRIA

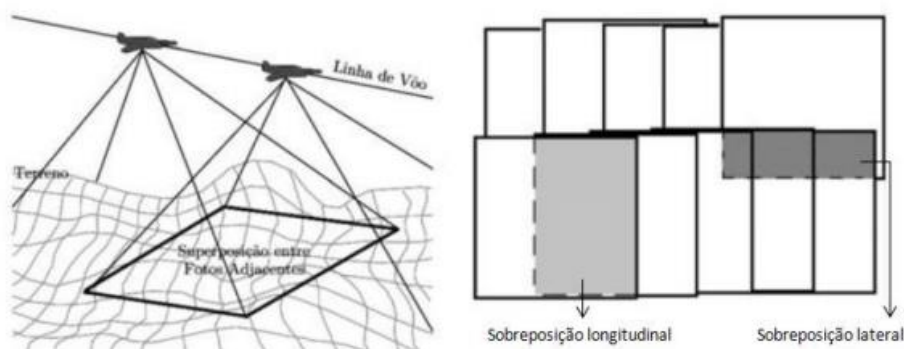
A aerofotogrametria ou fotogrametria aérea é uma vertente da fotogrametria, onde as fotografias de um determinado objeto ou região, são capturados por uma câmera de considerável precisão acoplada em uma aeronave. (TOMMASELLI, 2009).

Os métodos de levantamento aerofotogramétricos de grandes extensões de áreas com aeronaves tripuladas, sensores fotográficos de alta qualidade e custo, tem suas vantagens para projetos de grande magnitude como mapeamento cartográfico acima de 100 km² por apresentar autonomia de voo de até 10 horas com percurso de 3000 km (BASE AEROFOTOGRAMETRIA, 2020).

No entanto, os equipamentos aéreos não tripulados, denominados de VANT, acoplados de sensores digitais que consegue obter dados fotogramétricos de boa resolução, tornaram a fotogrametria aérea uma excelente aliada nos projetos de engenharia de pequeno e médio porte, sendo necessário apenas um plano de voo feito em um software compatível com seu equipamento e um sistema de pontos de apoio GNSS para fixação do modelo com o DATUM local.

Seu princípio básico é utilizar a sobreposição de fotos (Figura 1) sequenciais formando um único mapa (mosaico), para isto as imagens precisam se sobrepor umas às outras para o algoritmo conseguir assemelhar pontos entre as imagens tomadas, a fim de combiná-las. Estas áreas em comuns, chamadas de superposição, figura 1, que em seu sentido transversal à direção do voo, são chamadas de recobrimento transversal ou lateral, já as superposições das imagens tomadas seguindo a linha do voo são chamadas de recobrimento longitudinal. (Brito e Coelho Filho, 2009).

Figura 1 – Representação de sobreposição transversal e longitudinal na aerofotogrametria.



Fonte: Adaptado de (Brito e Coelho Filho, 2009).

A resolução espacial e altura do voo também são princípios importantíssimos relacionados com o nível de detalhamento do levantamento em interesse, na fotogrametria digital é visualizada em formato de *pixel* (definido como menor unidade de uma imagem digital), variável conforme a altura e o tipo de características da câmera utilizada.

Sendo assim, conforme no meu plano de voo posso configurar a altura do meu voo em relação às configurações da minha câmera, tendo o resultado da porção do terreno que será gravada em uma única tomada de cena, essa porção é denominada de *Ground Sample Distance* (GSD), que nada mais é uma extensão da superfície em um *pixel* da imagem.

Sendo assim, a altura do voo resulta em um maior ou menor detalhamento do levantamento, pois o GSD é inversamente proporcional ao detalhamento do mapeamento (Silva Neto, 2015).

3.2 VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

Conforme o ministério da defesa, o VANT são todo e qualquer tipo de aeronave não tripulada que podem ser controladas a distância por meios eletrônicos e computacionais, sobre supervisão humana ou não, estes equipamentos se diferenciam em classes de diferentes pesos e de sua aerodinâmica, tais como os de asas fixas, asas rotatórias (Figura 2), sendo os dois primeiros os mais comuns em utilização para uso na fotogrametria. (BRASIL, 2015).

Figura 2 – Modelos de VANT: asa rotativa (esquerda) e asas fixa (direita).



Fonte: (Neto et. al 2017).

Aqui no Brasil, as normas e diretrizes que regulamentam o uso deste tipo de aeronave são variáveis conforme suas diferentes classificações de peso, equipamentos com até 250 gramas são dispensáveis de qualquer tipo de registro, para equipamentos que excedam o peso de 250 gramas, necessita-se de um cadastro feito na ANAC, sendo o órgão responsável pelo registro do equipamento, onde será emitido um certificado de registro para uso recreativo ou profissional.

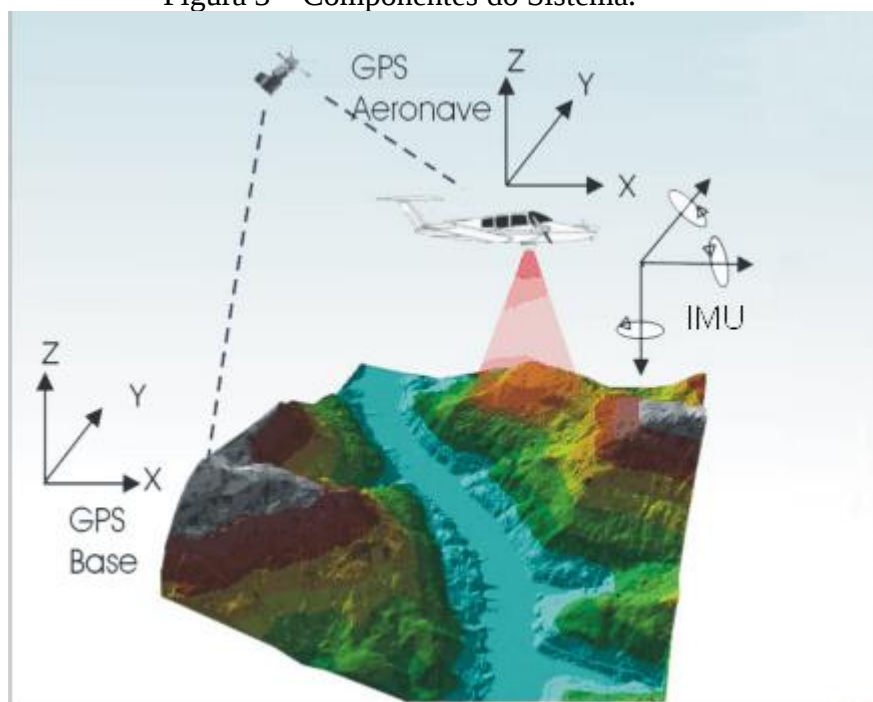
O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), responsável pelo controle do espaço aéreo brasileiro, disponibiliza as regras para acesso do espaço aéreo na ICA 100 – 40, nesta relacionam-se os itens e regras relativas ao uso em geral da solicitação de autorização de voo para os VANT no país.

3.3 LASER SCANNER

O LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um dispositivo eletro-óptico que emite pulsos direcionados ao alvo que se deseja fazer a varredura, ao atingir a superfície do objeto, parte destes pulsos voltam ao sistema, sendo feito o cálculo da distância entre o sensor e o objeto. (DALMOLIN & SANTOS, 2004).

O sistema é composto por sensor de varredura a laser, utiliza unidades de medições auxiliares, tal como o GPS (*Global Position System*) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*), que registram a posição e a atitude da aeronave durante o voo, e torna-se possível determinar a posição tridimensional de pontos na superfície, numa fase de pós-processamento (ZANDONÁ et al., 2005). A Figura 3 apresenta os componentes do sistema.

Figura 3 – Componentes do Sistema.



Fonte: (ZANDONÁ et al., 2005)

O resultado desta varredura é um conjunto de dados tridimensionais de pontos com uma grande densidade formando uma nuvem de pontos, sendo capaz de criar uma modelagem 3D da superfície levantada. (WEHR & LOHR, 1999).

Na sequência de diversos desenvolvimentos tecnológicos, o LIDAR e mais especificamente, o *Airborne Laser Scanning* (ALS), apresentou um desenvolvimento rápido e bem-sucedido (Ackermann, 1999). Na última década, deixou de ser apenas usado por especialistas e tornou-se objeto de grande difusão por vários tipos de utilizadores, dando origem a inúmeras aplicações. Segundo Lemmens (2011), o uso do LIDAR é na atualidade, uma técnica padrão na aquisição de dados e geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), (PEREIRA, 2012).

3.3.1 Sistemas de LIDAR

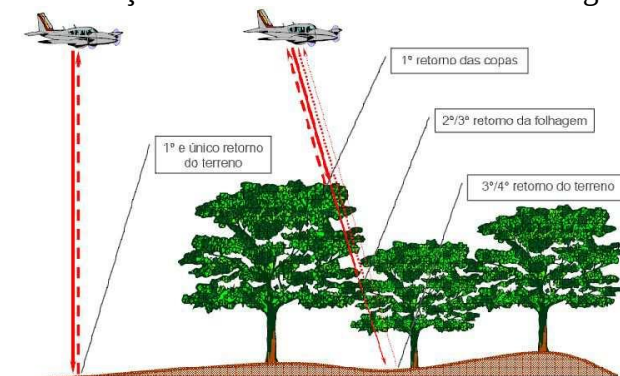
Entre os sistemas de LASER scanner, o LIDAR (*Light Detection And Ranging*) também conhecido como *time of flight*, estima a distância entre o sensor transmissor e o objeto refletor através do tempo de retorno do pulso eletromagnético, onde será emitido milhares de pulsos por segundo pela seguinte equação.

$$D = \frac{1}{2} * C * T \quad (1)$$

Sendo, o tempo em que o sinal leva para ir do transmissor ao objeto, ser refletido e retornar ao emissor, calculando assim a distância percorrida (D) emissor-refletor baseado na velocidade da luz (C). Leva-se em consideração a constante $\frac{1}{2}$, pois o tempo é considerando a ida e volta do sinal. (LICHTI & HARVEY, 2002).

No sistema atual, (BALTSAVIAS, 1999), os pulsos eletromagnéticos retornam uma alta taxa de transmissão, acarretando uma recepção de sinal quase que contínuo, denominado *Full Waveform*, com esta técnica há uma percepção detalhada das feições perfiladas, como exemplo de uma região de vegetação onde um mesmo sinal emitido retorna diversos retornos devido à interação do sinal com a modelagem do objeto, neste caso, os galhos, revestimento de folhagem, etc., conforme Figura 4.

Figura 4 – Detecção de elementos através da tecnologia LIDAR.

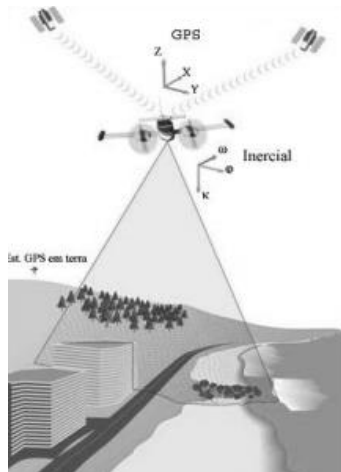


Fonte: (BASTOS e ERCOLIN FILHO, 2012).

3.3.2 Sistemas dinâmicos

No sistema dinâmico o perfilamento a laser é feito por plataformas em que permitem que o sensor possa mover-se de forma terrestre, aérea, etc. Neste método, figura 5, a posição em questão que se está querendo levantar é obtida por uma junção do sensor, com um receptor GNSS de precisão compatível para que se fixe a posição do sensor em relação ao terreno no sistema de referência em que deseja fixar o perfilamento a LASER, além também de uma unidade de medição inercial, para ser feito o cálculo corrija a inclinação (α , β , γ) do sensor torno dos eixos (X, Y, Z) baseado no (XGNSS, YGNSS, ZGNSS) do sistema de posicionamento. (CENTENO, 2003).

Figura 5 – Funcionamento de Laser Scanner Dinâmico Aerotransportado.



Fonte: (OPTECH, 2005).

Sendo assim, o cálculo das coordenadas (X, Y, Z) dos pontos escaneados, deve-se considerar o instante de levantamento T, a posição e altitude do equipamento, como apresentado na equação 2 a seguir (HABIB BANG e KERSTING, 2010).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RM} = \begin{pmatrix} X0(t) \\ Y0(t) \\ Z0(t) \end{pmatrix}_{RM} + R_{RM}^{IMU}(t) \left| \begin{pmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{pmatrix}_{IMU}^{scanner} + R_{IMU}^{scanner} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right| \quad (2)$$

Onde:

- $X0(t)$, $Y0(t)$, $Z0(t)$: representam a posição de origem do INS no instante (t), em relação ao referencial mapeado;
- $R_{IMU}^{RM}(t)$: é a matriz de rotação em que os ângulos de altitude da plataforma providos pelo INS em relação ao referencial mapeado;
- tx , ty , tz : são os componentes do *lever arm* entre o sensor LASER e o INS, no referencial do INS;
- $R_{IMU}^{Escâner}$: será a matriz dos ângulos de *boresight* entre o INS e o sensor LASER.

3.4 COMPARAÇÕES ENTRE LIDAR E FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria e o LASER são técnicas diferentes, porém que podem dividir o mesmo objetivo: obter coordenadas 3D de pontos remotos, sem a necessidade de tocá-los, dividindo tanto formas semelhantes quanto diferentes em seu planejamento, execução e processamento.

Uma diferença em que se pode citar no planejamento é o interesse de área útil em que se pode esperar pela cobertura de cada estação de coleta de dados, partindo do suposto no qual a técnica de fotogrametria necessita de uma superposição das cenas em sequência para criar a estereoscopia, considerando uma superposição de 60% da área projetada, pela necessidade da intersecção da cena na segunda imagem, cada tomada de foto avança apenas 40% da linha de voo. Já no levantamento com LASER *scanner* é contínuo, apenas dependendo do ângulo de abertura do feixe do sensor em que se emite os pulsos (Tommaselli, 2003).

Como podemos observar na tabela 1 e 2, as comparações das especificações técnicas dos equipamentos utilizados para este trabalho, o equipamento Zenmuse L1, além do sistema LIDAR, possui também o sistema fotogramétrico para resolução RGB (*red-green-blue*) da nuvem de pontos, tendo a função de colorir cada ponto conforme a realidade, já que o laser por si só não identifica as cores dos objetos levantados.

Tabela 1 – Comparação Sensor Digital dos equipamentos.

CÂMERA RGB		
Especificações Sensor	DJI PHANTOM 4 PRO	DJI ZENMUSE L1
Tamanho do Sensor	1 polegada	1 polegada
Pixels Efetivos	20 MP	20 MP
Distância Focal	8,8 mm/24 mm	8,8 mm/24 mm
Faixa de Abertura	f/2.8-f/11	f/2.8-f/11
Velocidade do Obturador	1/8000 - 8 s	1/8000 - 8 s

Fonte: Autor (2022).

Tabela 2 – Especificações LIDAR dos equipamentos.

LIDAR	
Especificações Sensor	DJI ZENMUSE L1
Taxa de Pontos	até 480.000 pts/s
Retorno Máximo	3 pts
Precisão Horiz.	até 10 cm
Precisão Vert.	até 5 cm
Faixa de Detecção	até 450

Fonte: Autor (2022).

3.4.1 Resolução espacial

Na fotogrametria a exatidão terá a dependência de parâmetros como a distância sensor-objeto, neste método a altura do voo está interligada diretamente com a resolução espacial do produto, do tempo de levantamento. No levantamento LIDAR a exatidão é homogênea e depende pouco da distância entre sensor-objeto, causando pouca degradação com o aumento da altura do voo, nesta metodologia a geometria de irradiação não é afetada pela configuração, pois todos os elementos são medidos diretamente (com exceção dos levantamentos que utilizam o método de triangulação, este tipo é afetado pelo aumento da distância de modo similar ao fotogramétrico).

3.4.2 Tempo de captura

Em relação ao tempo de aquisição de dados utilizando o mesmo plano de voo, há diferenças substanciais no tempo de aquisição, com uma vantagem do método LASER, por ter

um tipo de varredura contínua e na fotogrametria utilizar várias tomadas de fotos para construção do estéreo-modelo.

3.4.3 Tempo de processamento

O tempo de processamento para fotogrametria é maior, com etapas manuais antes da modelagem geométrica, é necessário fazer as correções dos pontos de apoio para amarração do modelo em relação ao DATUM escolhido para projeção. Diferente do processamento do LASER *scanner* que pode ser feito de forma semi-automática, dependendo do sistema, com um tempo de algumas horas para os processamentos automáticos para os dois modelos.

3.4.4 Flexibilidade

A coleta das imagens pode ser limitada pela distância focal da câmera e pela necessidade de estabelecer uma base compatível com a distância à superfície, por outro lado, é possível aproximar a câmera para obter maior resolução espacial, ou seja, o processo fotogramétrico é ajustado às necessidades de resolução e exatidão do projeto, no levantamento a LASER, não há restrição em relação à posição do sensor basta instalar plataforma e começar a medir, não há necessidade de superposição entre as sucessivas tomadas, contudo, não há como alterar parâmetros do sensor para aumentar a resolução do sistema.

3.4.5 Perspectiva

A diferença de perspectiva entre duas tomadas de foto cria distorções que podem causar erros nos algoritmos de das feições do produto, quanto maior o ângulo de abertura da câmera (inversamente proporcional à distância focal) mais severas serão os efeitos de erro de borda. No LASER não há efeito de perspectiva, uma vez que os resultados do levantamento é uma nuvem de pontos (LAS) com coordenadas em verdadeira grandeza ao referencial do sensor e receptor GNSS acoplado ao sistema, poderá haver oclusão dos objetos que não forem visíveis, do mesmo modo que no processo fotogramétrico.

3.4.6 Iluminação

A fotogrametria trabalha com luz visível, sendo necessário a ação de luz solar ou iluminação artificial, podendo sofrer sombreamento que causam interferência na visualização

e na correlação automática do processamento. No levantamento a LASER, por se tratar de um sensor ativo que emite a própria radiação, não há necessidade de luz visível, sendo assim, não há ocorrência de sombras, apenas a oclusão quando não há face visível do objeto em que se não consegue varrer devido às características do LASER, alguns sistemas não apresentam respostas adequadas na ausência total de iluminação.

3.4.7 Movimentos e vibrações

No levantamento fotogramétrico e no LASER dinâmico a imagem e a varredura a LASER são capturadas instantaneamente, não havendo nenhum problema na movimentação de objetos ou da própria plataforma de coleta, neste caso um VANT.

3.4.8 Densidade de coleta

A densidade da fotogrametria é totalmente ligada à resolução espacial do produto, durante a fase de processamento será criado uma nuvem densa baseada nos valores dos *pixels* das superposições obtidas durante o levantamento. No levantamento a LASER serão registrados pontos que retornam da emissão do sensor durante a coleta, estes pontos serão utilizados para criação da nuvem de pontos, não podendo mudar a resolução da nuvem a não ser pelo método de interpolação da nuvem coletada.

3.4.9 Usabilidade

A fotogrametria tornou-se uma tecnologia difundida após a utilização dos VANT, hoje existem várias alternativas de câmeras métricas e não métricas, bem como sistemas de processamento de dados que permitam atender à várias aplicações de baixo custo, já o LASER é uma tecnologia que está emergindo, ainda sendo esbarrado no seu maior valor, porém o seu uso deverá ser difundido nos próximos anos.

3.5 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O modelo digital de Superfície (MDS) e modelo digital do terreno (MDT) são utilizados para demonstrar o comportamento de cota de determinada área, servindo de estudo para retratar a topografia, hidrografia, estudo de vegetação, etc.

O modelo adequado para representação da topografia é o MDT, no qual representando o comportamento de uma determinada superfície excluindo todo acréscimo de vegetação,

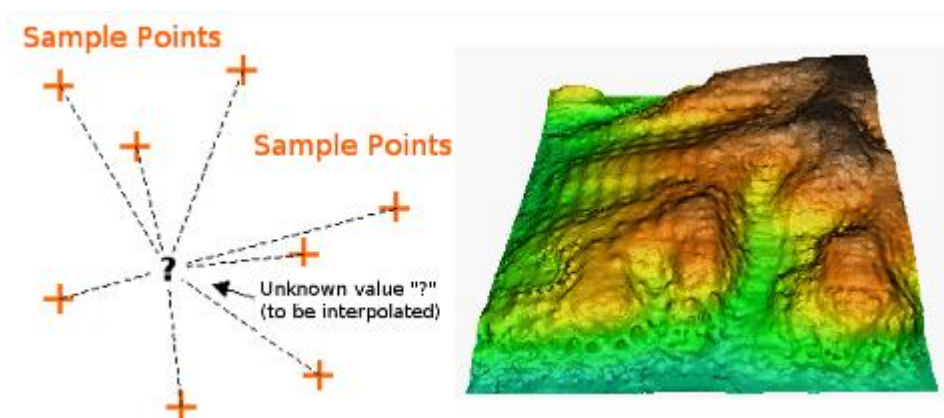
estruturas artificiais; já o MDS representa a superfície que contém todos os objetos que estiverem sobre o terreno. Outro modelo derivado destes dois tipos de estudo é o Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSN) onde se faz a diferença entre o MDS e o MDT podendo ser utilizado para estudo da vegetação local (Botelho et al., 2005).

Os métodos mais conhecidos para gerar os modelos de elevação, são por interpolação, método que consiste em usar pontos com valores conhecidos para estimar outros pontos com valores desconhecidos, visto que um levantamento consiste na coleta de dados em um número limitado de pontos locais selecionados. Existem alguns tipos de interpolação, cada um com seu método de peso para estimar a cota desconhecida.

3.5.1 Ponderação pelo inverso da distância (IDW)

No método de interpolação Inverse Distance Weight (IDW), figura 6, as amostras são calculadas de forma ponderada e inversamente proporcional à distância do ponto em que é conhecida ao ponto que se deseja estimar o valor (MATO, 2008). Simplificando, a ponderação será feita em amostras de pontos conhecidos mais próximos do ponto que se deve determinar, diminuindo a influência na estimativa daquele ponto à medida que a distância vai aumentando. Um ponto negativo para este método de interpolação é que a qualidade do resultado diminuirá em relação a uma distribuição desigual, outro problema refere-se (MELLO et al., 2003).

Figura 6 – Interpolador IDW



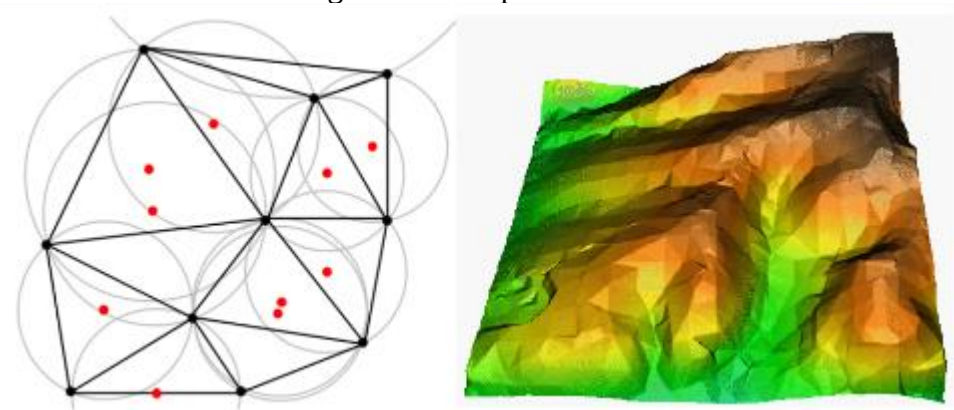
Fonte: Qgis (2018).

3.5.2 Malha irregular triangular (TIN)

A interpolação TIN (Figura 7) é uma ferramenta que utiliza o algoritmo de triangulação de Delaunay. Onde a malha de amostras de pontos conhecidos forma entre si triangulações (não

sobrepostas) estimando assim a modelagem daquela superfície. A principal desvantagem deste método são as aparentes irregularidades nas pontas dos triângulos, geralmente distorcendo o comportamento do terreno em regiões com pouca distribuição de pontos na área desejada (Chaves, 2002).

Figura 7 – Interpolador TIN.



Fonte: Qgis (2018).

3.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Para avaliação de qualidade do MDT foi utilizada o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Digitais (PEC-PCD), baseado no Decreto de Lei nº 89.817 de 1984, onde é descrito as instruções reguladas pelas Normas Técnicas da Cartografia Brasileira instruídas segundo os procedimentos e padrões para elaboração e resultado dos documentos de natureza cartográfica, sendo obrigado a ser seguida por entidades públicas ou privadas em atividade no Brasil (BRASIL, 1984)

Os dados são disponibilizados em duas tabelas, sendo uma representada para comparação dos dados planimétricos (Tabela 3) e outra para os dados altimétricos (Tabela 4), dividida em quatro classes de acurácia e oito valores de escalas diferentes para uma melhor adequação da precisão em que se necessita no projeto no qual deseja representar.

Tabela 3 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria para Dados Digitais.

PEC (1)	PEC - PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A ⁽²⁾	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B ⁽¹⁾	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C ⁽¹⁾	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D ⁽¹⁾	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Fonte: ET-EDGV (2016).

Tabela 4 – Padrão de Exatidão cartográfica dos Pontos cotados e do MDE, MDT e MDS para Produção de Dados Digitais.

PEC -PCD (3)	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: ET-EDGV (2016).

A norma estabelece que em 90% dos pontos de checagem não deverão apresentar margem de erro maior que o valor estabelecido para determinada classificação da PEC. Utilizando o indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, ou seja, $PEC = 1,6449 * EP$, sendo o EP correspondente ao Erro Padrão.

4 METODOLOGIA

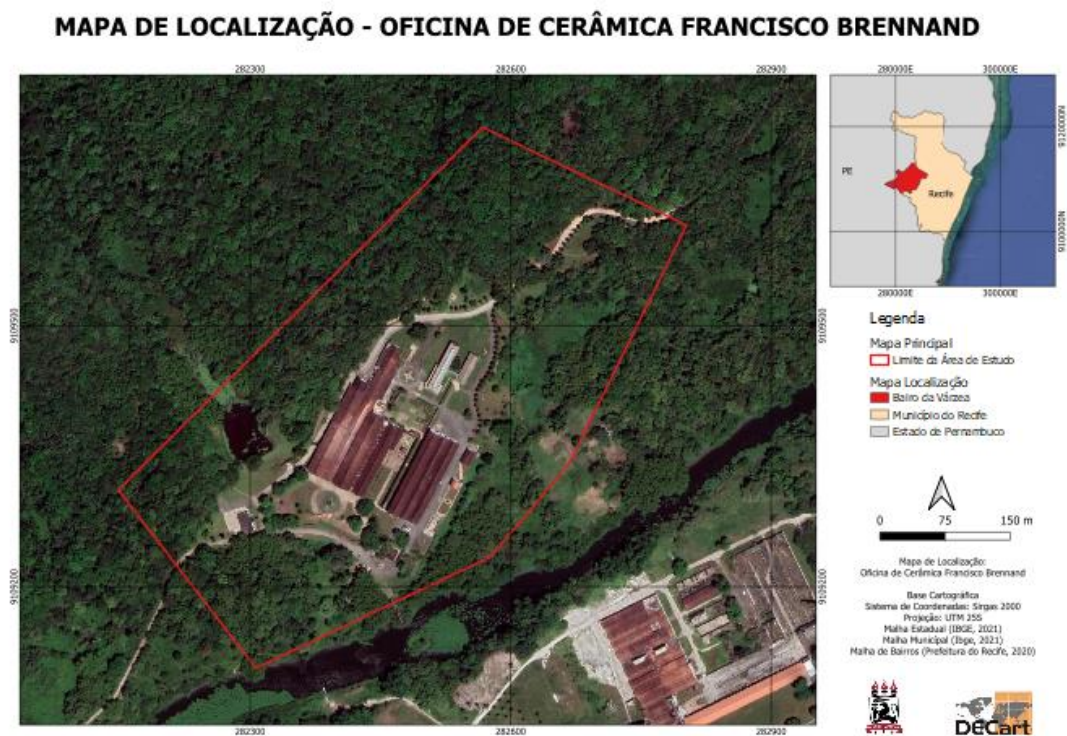
Neste tópico será abordada a proposta metodológica para execução do presente trabalho. De início será apresentada a área de estudo e todo materiais utilizados, seguido do detalhamento das etapas fotogramétricas realizadas: plano de voo, medição dos pontos de checagem e controle, execução dos voos, processamentos das imagens para ajustamento fotogramétrico e, geração do modelo de superfície do estudo, tanto para metodologia de aerofotogrametria e LIDAR, execução de classificação de qualidade posicional usando como critério PEC-PCD, posteriormente gerar Modelos Digitais do Terreno (MDT) para os dois métodos e estudo amostras de áreas com vegetação, analisando os resultados obtidos.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho corresponde ao perímetro da Oficina de Cerâmica Francisco Brennand, localizada no bairro da Várzea, situado na cidade do Recife, em

Pernambuco. A escolha desta área está relacionada ao projeto de inovação intitulado “Águas de Brennan” onde será feito um estudo geotécnico para captação de águas para utilização renovável. A figura 8 representa o mapa de localização da área de estudo.

Figura 8– Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor (2022).

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

No mapeamento aerofotogramétrico foi utilizado um veículo aéreo não tripulado, um quadricóptero *Phantom 4 advanced* (Figura 9) com *payload* configurado com uma câmera com resolução máxima de 20 *megapixels*, distância focal de 8,8 milímetros, peso máximo de decolagem 1,4 quilogramas e autonomia de voo de aproximadamente 30 minutos.

Figura 9 – VANT *Phantom 4 Advanced*.



Fonte: Autor (2022).

Para o mapeamento LIDAR foi utilizado um veículo aéreo não tripulado, um quadricóptero Matrice 300 RTK (autonomia de até 50 minutos), com um LASER *scanner* Zenmuse L1 (Figura 10) que integra módulo LIDAR, uma câmera RGB (20MP) e um sistema de IMU de alta precisão, conta com uma taxa de emissão de 240.000 pontos por segundo e suporta até três retornos, uma faixa de alcance de 450 metros. Este mapeamento foi realizado em parceria com a empresa CPE Tecnologia, que disponibilizou o equipamento e equipe técnica.

Figura 10 – VANT Matrice 300 RTK (esquerda) e LIDAR Zenmuse L1 (direita).



Fonte: Autor (2022).

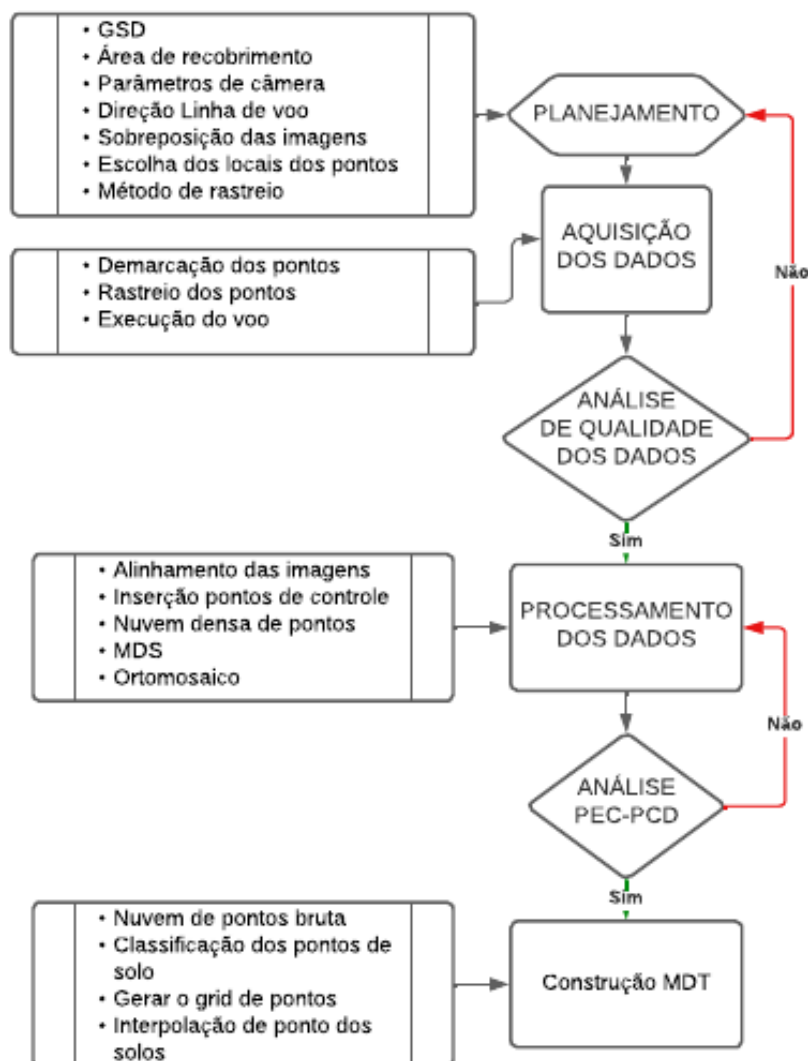
Para o apoio de campo, aquisição de coordenadas dos pontos de controle e de checagem foi utilizado um par de receptores GNSS Topcon Hiper VR, com precisão de posicionamento (Estático/Estático rápido) de H: 3 mm + 0,4 ppm e V: 5 mm + 0, 5 ppm.

Para a execução de todas as etapas de processamento, manipulação, geração e análise de produtos cartográficos e análise de qualidade foram utilizados os seguintes softwares:

- Agisoft Metashape (versão teste de 30 dias) — utilizado para o processamento e a análise das imagens adquiridas pelo Phantom 4 advanced;
- DJI Terra — compatível para com exportação de modelos de nuvem de pontos de formato padrão;
- Pix4D Capture para plano de voo;
- Pix4D Survey — utilizado para modelagem das nuvens de pontos e geração do MDT e extração das coordenadas (E, N e Z);
- Global Mapper — Transformação do arquivo raster (MDS) em arquivo de nuvem de pontos (vetorial);
- Class PEC-PCD — para classificação dos modelos digitais;
- Magnet Tools para pós-processamento e ajustamento dos dados GNSS.

Na figura 11 apresenta-se o fluxograma de trabalho com as etapas empregadas na aquisição das imagens, processamento, e geração dos insumos e produtos cartográficos.

Figura 11– Fluxograma do Processamento das imagens.



Fonte: Autor (2022).

4.3. PLANO DE VOO

Para realização do plano de voo, foi utilizado o *software Pix4D capture*, compatível com os VANT utilizados para o levantamento. Nesta etapa é pré-definido todos os parâmetros que os equipamentos deverão executar durante toda aquisição de dados.

Inicialmente é demarcada a área de recobrimento de estudo desejada (sempre delimitando um buffer reais limites do lote). Em seguida serão definidos os parâmetros básicos do voo, são eles: o modelo da câmera (modelo do VANT), o ângulo de captura das imagens (nadir), o modo de captura, o modo de curso do voo, além da velocidade e altura. Ao definir a altura do voo, o *software* fará o cálculo aproximado da resolução (GSD) que o produto alcançará. Ao fim dos parâmetros básicos, são feitas as configurações de parâmetros avançados,

que consiste em definir as sobreposições frontal, lateral, o ângulo de curso que o drone deve se mover em relação aos limites do levantamento e pôr fim à margem. Para o levantamento do LIDAR, se repetirá os passos acima, além de ser configurada a intensidade de emissão da quantidade de pontos por segundos.

4.4 PONTOS DE APOIO GNSS

Com ajuda de um croqui da área de estudo, é definido os melhores locais de implantação dos alvos fotoidentificáveis que auxiliarão no georreferenciamento do produto durante o processamento das imagens. O método de rastreamento GNSS escolhido para este levantamento, foi o Posicionamento Relativo Estático Rápido, que consiste em ter um receptor base em uma estação de referência enquanto se utiliza outro receptor (móvel) para ocupar as estações que se deseja determinar as coordenadas. Foram escolhidos 43 pontos naturais de forma distribuída na área de estudo, todos visíveis e contrastados com o terreno, para que seja facilmente identificável no momento do processamento das imagens, rastreado por cinco minutos cada. A Figura 13 apresenta a distribuição dos pontos de checagem e a Figura 14 o croqui geral dos pontos de controle.

Os dados brutos foram descarregados, transformados em *rinex* e pós-processados em escritório. Foi feito o Processamento por Ponto Preciso no site do IBGE (PPP-IBGE) da base, onde se obtém um alto nível de acurácia através de efemérides precisas. Com o PPP em mãos foi feito o pós-processamento e ajustamento dos pontos no software adequado. Após isso, foi usado o QGIS v3.22.4 para seleção aleatória de 16 pontos para servir como ponto de checagem (Figura 12) e os 16 restantes utilizados para ponto de controle (Figura 13) para amarração dos produtos digitais.

Figura 12 – Croqui Pontos de checagem.



Fonte: Autor (2022).

Figura 13 – Croqui Pontos de Controle da área.



Fonte: Autor (2022).

4.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os voos foram realizados no dia 18 de fevereiro de 2022. A aquisição dos dados foi executada em conformidade com os parâmetros de plano de voo configurados conforme descrito no subitem 4.3. Realizado o voo, foi analisada a qualidade de dados coletados, verificando o contraste e nitidez das imagens, verificação se as linhas de voo foram realizadas sem interrupções, análise de recobrimento lateral e longitudinal das imagens e verificação da nuvem de pontos. Por fim, os dados/arquivos de todas as imagens foram exportados para *desktop*.

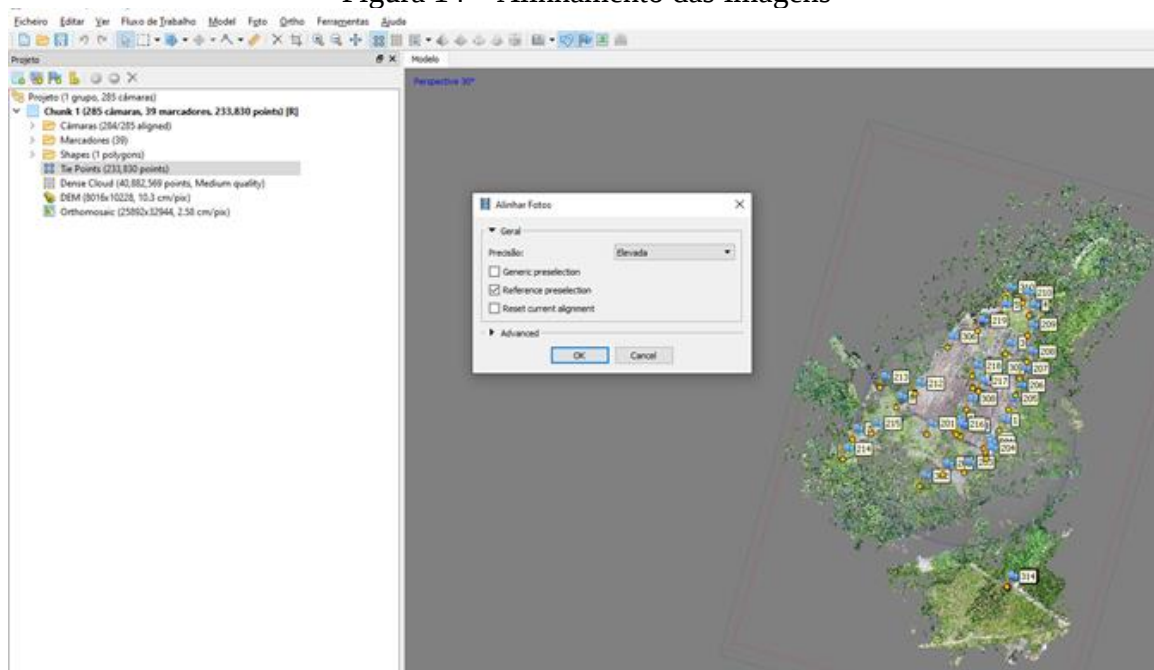
4.6 PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Para o processamento e orientações das imagens, foi utilizado o *software* Agisoft Metashape Professional (*trial*). Um projeto foi criado configurando o sistema de referência de entrada e saída. As imagens são carregadas no projeto é dado o início ao fluxo de trabalho do processamento das imagens, conforme descrito nos subitens a seguir.

4.6.1 Alinhamento das imagens

O Alinhamento das Fotos (Figura 14), é a primeira etapa do processamento no *software* Agisoft Metashape, onde é realizado um processo de orientação interior das imagens e triangulação dos pontos utilizando a base de pontos com coordenadas geográficas conhecidas e as medidas angulares entre eles, para que as correções de erros sejam feitas e que se determine as coordenadas de cada *pixel* da imagem, considerando a altura e a variação de relevo da superfície. O resultado é a geração da nuvem de pontos esparsa ou pontos fotogramétricos (*tie points*) onde sua função é materializar o sistema de coordenadas do terreno. (LOPES, 2019).

Figura 14 – Alinhamento das Imagens

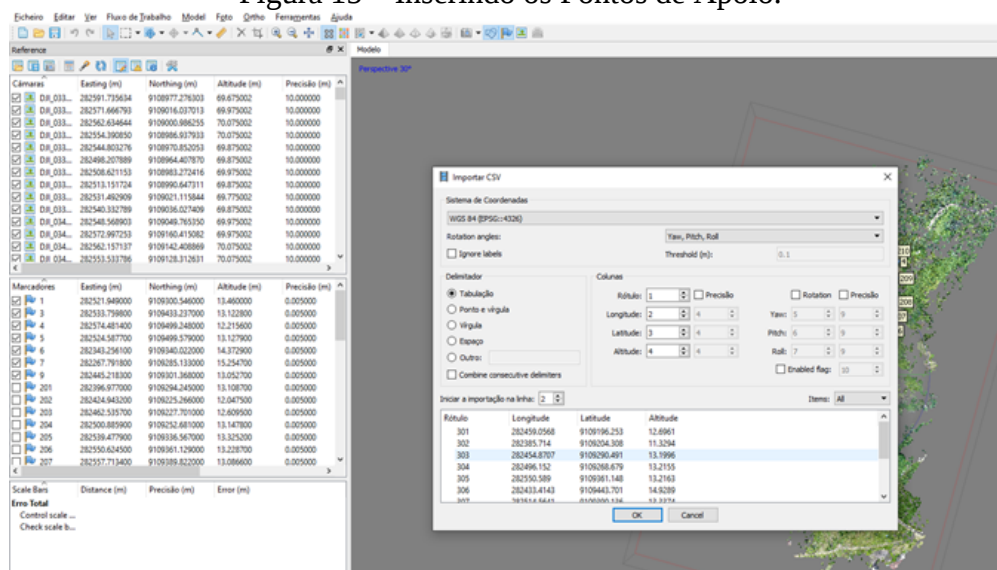


Fonte: Autor (2022).

4.6.2 Inserir pontos de controle e qualidade

Ao terminar o alinhamento das imagens, tem-se que adicionar os pontos de apoio ao projeto, é necessário importar um arquivo de texto com todas as coordenadas tanto altimétricas quanto planimétricas dos pontos coletados em campo por GNSS e processados em software de melhor escolha. Inserindo os pontos, (Figura 15), chamados no *software* como marcadores, o programa irá abrir uma caixa de opções na qual será escolhido o seu sistema de coordenadas de referência e a formatação de colunas e tabulação.

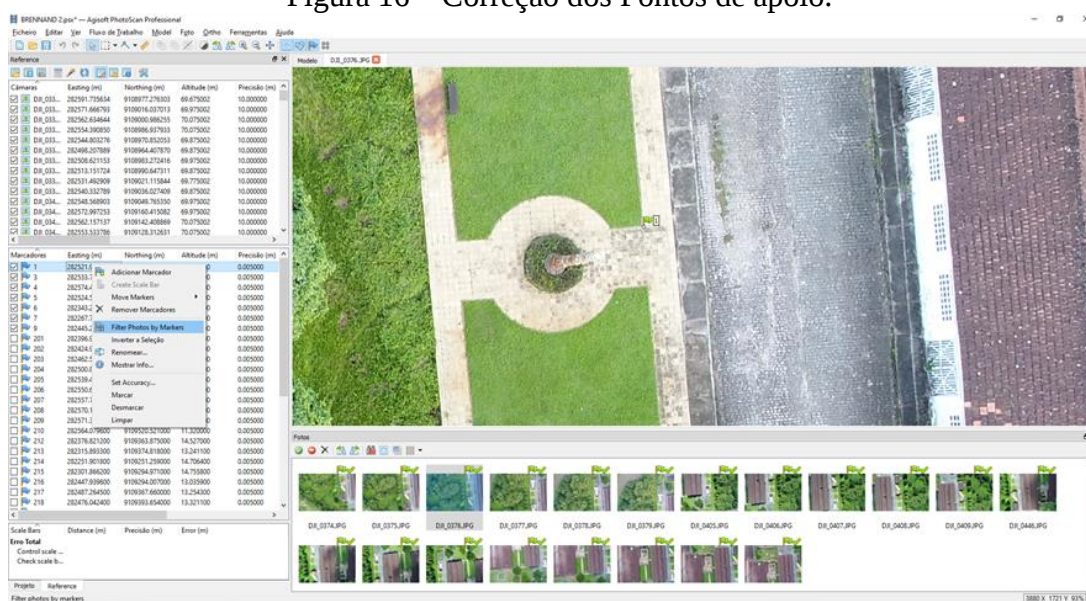
Figura 15 – Inserindo os Pontos de Apoio.



Fonte: Autor (2022).

Após inserir os pontos de apoio, se faz necessário a medição ou correções de pontaria dos alvos, fazendo correções visuais e geométricas de cada uma das imagens (figura 16), para isso é necessário usar esboço dos alvos e pontos rastreados em campo e aplicar a correção dos pontos nas imagens, tentando aproximar a pontaria do cursor o mais próximo do ponto rastreado em campo. Aplica-se a função de otimização de câmeras a cada quatro correções de pontos.

Figura 16 – Correção dos Pontos de apoio.



Fonte: Autor (2022).

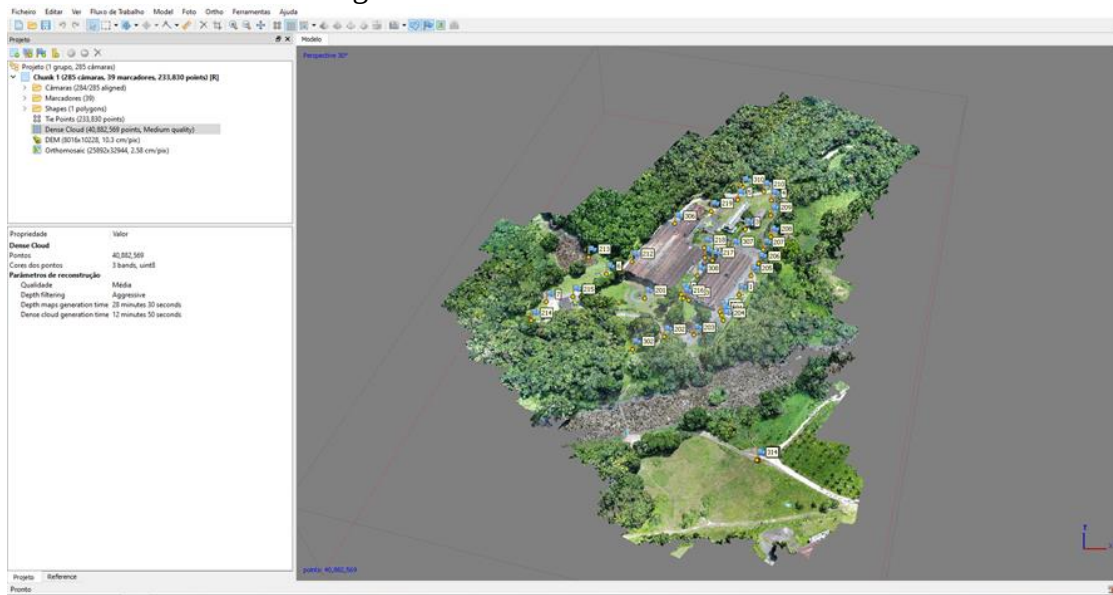
Após feito esse procedimento para todos os alvos, é necessário efetuar novamente o alinhamento das fotos, sendo alterado o processamento para um nível de detalhamento alto, utilizando como referência os pontos de apoio coletados em solo. Ao final do alinhamento, deve ser apresentada uma nuvem esparsa de pontos.

Para controle de qualidade destes pontos podemos avaliá-los através dos valores obtidos a partir das tabelas referentes ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), Tabela 3 e 4, extraídas da Especificação Técnica dos Produtos de Conjunto de Dados Geoespaciais (ET-ADGV). A fim de contestar estes padrões cartográficos, foi escolhido 16 pontos para serem utilizados como controle e 16 pontos como qualidade.

4.6.3 Nuvem densa de pontos

Nesta etapa ocorrerá a densificação da nuvem de pontos (figura 17) que anteriormente havia sido gerada, basicamente, o software aumentará a quantidade de pontos interpolando dados da nuvem de pontos esparsa (*tie points*), figura 14, e dos dados de pontos de apoio, diminuindo assim os espaços vazios criando o modelo do terreno.

Figura 17 – Nuvem Densa de Pontos.

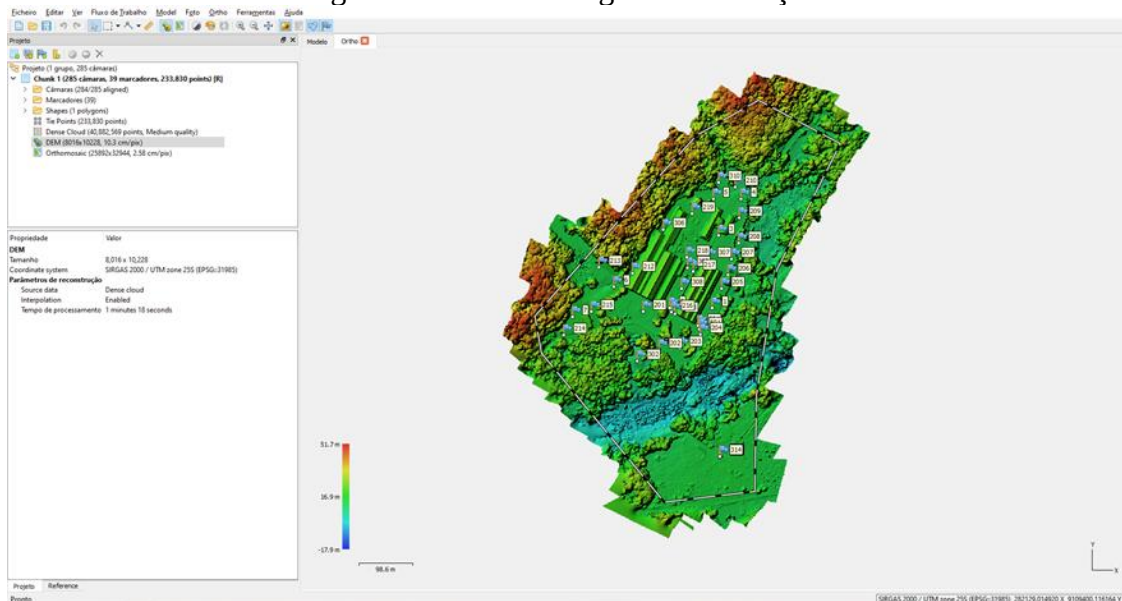


Fonte: Autor (2022).

4.6.4 Modelo digital de superfície

Após a construção da nuvem densa de pontos (figura 17), a próxima etapa é produzir o Modelo Digital de Superfície (figura 18), ou seja, o software estima os valores de elevação de toda superfície topográfica agregada a elementos geográficos existentes sobre a área de estudo, como cobertura vegetal e edificações presentes. Neste processo todos os objetos acima no nível do terreno são também representados.

Figura 18 – Modelo Digital de Elevação.



Fonte: Autor (2022).

4.6.5 Ortomosaico

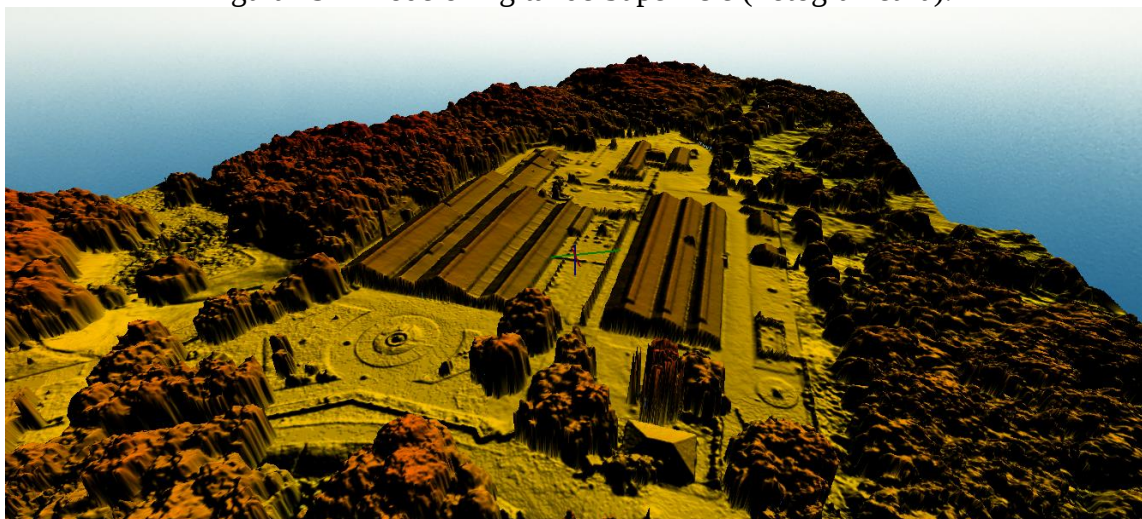
Aqui projetam-se as feições ortogonalmente com uma escala constante, corrigindo as distorções relativas ao relevo, deslocamento de posicionamento e inclinação da câmera, através da transformação da perspectiva cônica em ortogonal (BRITO; COELHO FILHO, 2009) com as imagens devidamente corrigidas, o *software* une as imagens sobrepostas em um único produto.

4.7 PROCESSOS DE GERAÇÃO DO MDT

4.7.1 Nuvem de pontos bruta

Nesta etapa foram utilizadas técnicas de manipulação dos dados digitais de MDS (fotogrametria), figura 19, e nuvem de pontos (LIDAR), figura 20, para gerar o MDT utilizando *software* Pix4D Survey (*trial*). O primeiro passo é criar um arquivo de nuvem de pontos (Figura 21) por meio do MDS gerado com as imagens obtidas pelo método da fotogrametria, figura 19. No caso, dos dados do LIDAR, o *software* cria pontos a partir dos valores do centroide dos *pixels* criando então um arquivo vetorial de nuvem de pontos, possibilitando trabalhar no Pix4D Survey com duas nuvens de pontos, do LIDAR e da Fotogrametria.

Figura 19 – Modelo Digital de Superfície (Fotogrametria).



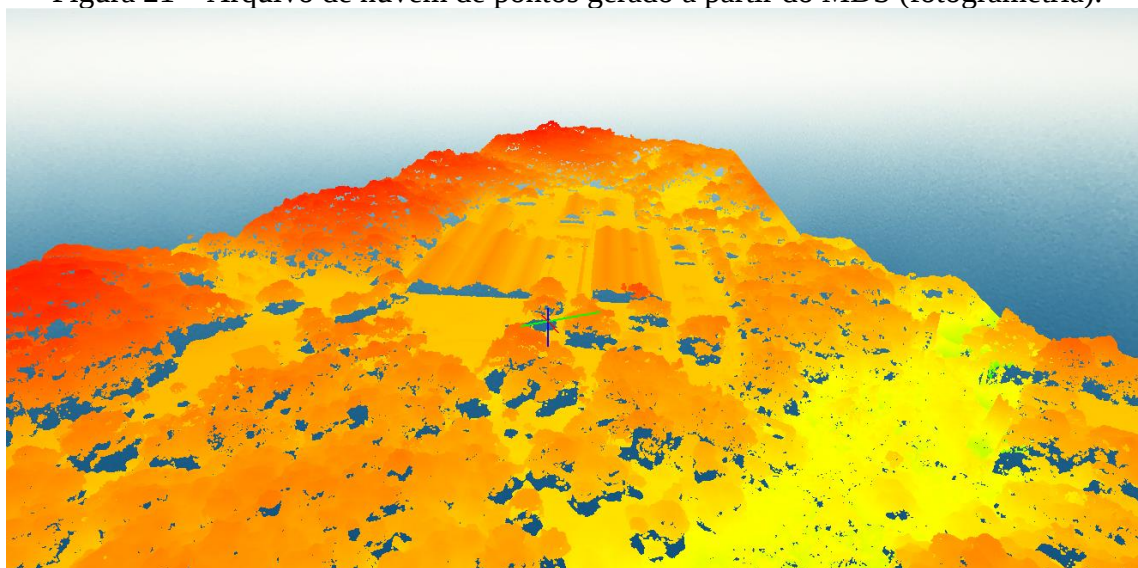
Fonte: Autor (2022).

Figura 20 – Nuvem densa de pontos do LIDAR.



Fonte: Autor (2022).

Figura 21 – Arquivo de nuvem de pontos gerado a partir do MDS (fotogrametria).



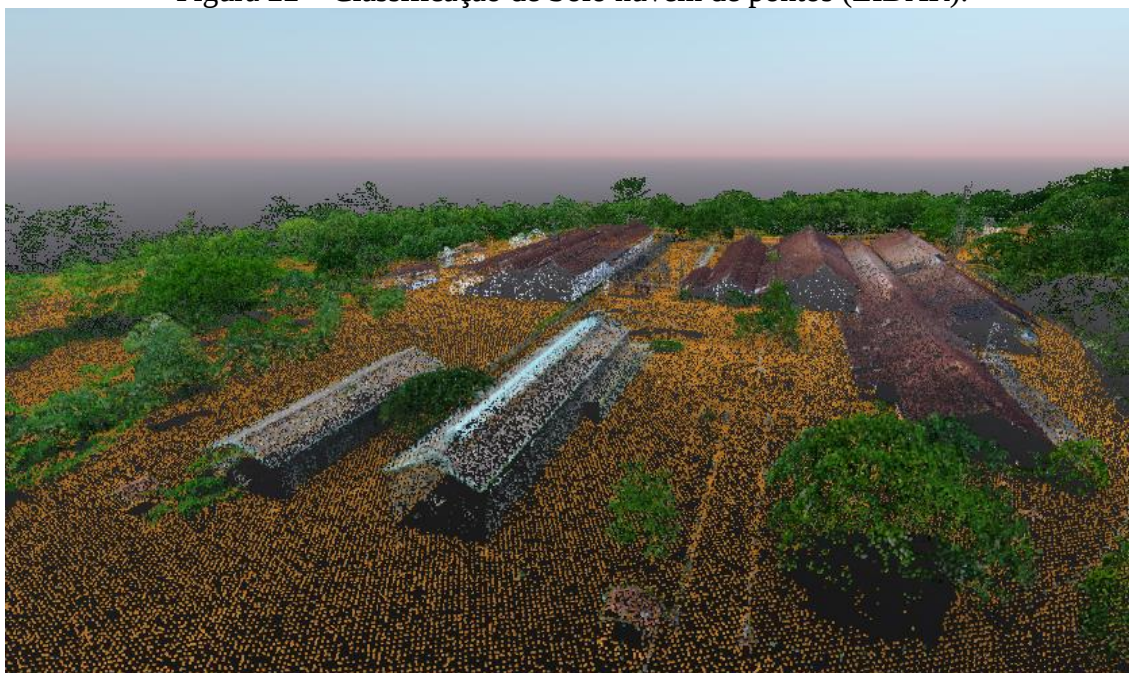
Fonte: Autor (2022).

4.7.2 Classificação de pontos de solo

Para realizar a classificação de solo automática das nuvens adensadas, foi utilizado ferramentas disponíveis no software (Pix4D Survey). Neste processo é definido parâmetros que auxiliam o algoritmo a diferenciar um ponto pertencente ao solo ou não. Alguns dos parâmetros de entrada são: a distância de amostragem que será verificada, desvios de curvatura; especificação de altura mínima acima da elevação média mínima para um ponto ser considerado

não em solo e; outros parâmetros de diferença máxima de altura do solo; declividade prevista do terreno e largura máxima de edificações presente na área. Este processo é repetido até que se chegue a um resultado visual de classificação satisfatório, onde é verificado se a classificação ocorreu da forma esperada. Gerada as classificações para os dois modelos, podemos fazer uma verificação dos metadados, na aba de estatística podemos verificar o número e a porcentagem de pontos classificados como “solo e não-solo”, este resultado foi repetido mudando os parâmetros de classificação do terreno desejado até alcançar um resultado de pontos de solo (figura 22) bem distribuído por toda área estudada.

Figura 22 – Classificação de Solo nuvem de pontos (LIDAR).



Fonte: Autor (2022).

4.7.3 Criação malha de pontos

Com a classificação dos pontos de solo obtida, foi gerada uma malha (GRID) de pontos para apenas as amostras classificadas como solo, esta malha será a base para direcionar a interpolação na criação do MDT.

4.7.4 Interpolação dos pontos de solo

A classificação realizada adequadamente, pode-se realizar a filtragem dos pontos de solo das demais classificações. Para isso, cria-se a grade de elevação a partir dos dados vetoriais 3D, a nuvem de pontos adensada e classificada. Este processamento consiste em executar uma interpolação apenas dos dados vetoriais que tem como classificação “solo”, onde será

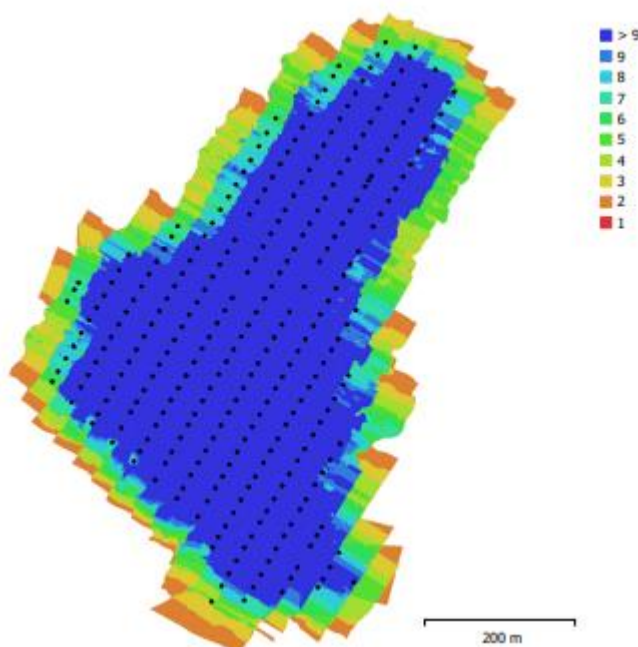
preservada a elevação mínima, gerando assim o MDT das amostras da fotogrametria e dos dados do LIDAR.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O processamento das imagens utilizando o software Agisoft Metashape 1.6.4, gerou: alinhamentos das 284 imagens, nuvem de pontos, MDE e Ortomosaico. A Figura 23, apresenta um gráfico dos itens resultantes do processamento, referente ao alinhamento das imagens. Na Figura 24, são verificadas as sobreposições entre as imagens, alcançadas na execução do voo.

Figura 23 – Localização de fotos e sobreposição das imagens.



Fonte: Autor (2022).

A tabela 5, apresenta os resultados quanto aos dados da execução de voo de quantitativo de imagens, número de posições de imagens, resoluções das imagens, altura média de voo, distância focal considerada durante o voo, GSD médio, área total coberta durante o voo, erro médio das imagens reprojetaadas em pixel.

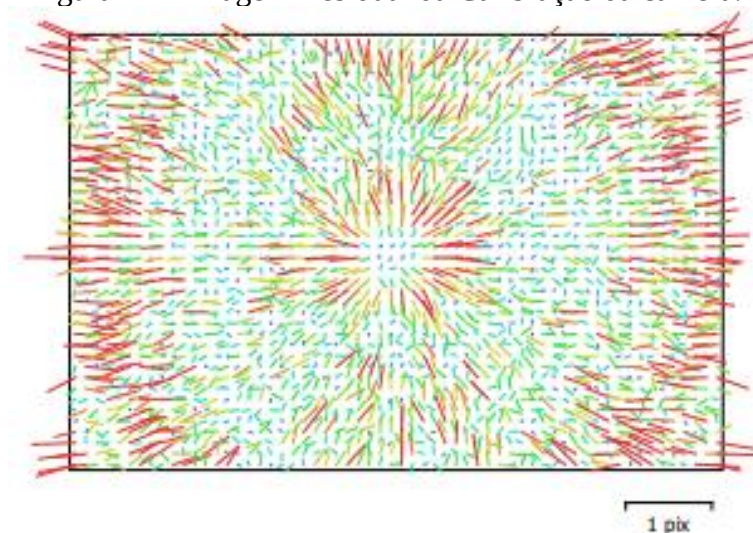
Tabela 5 – Dados do processamento de imagens.

DADOS PROCESSAMENTO DE IMAGEM			
Nº de Imagens	284	Modelo Câmera	FC6310
Nº de estações	283	Resolução	5472x3648
Altura Voo (m)	94	Dist. Focal (mm)	8,8
GSD (cm/pixel)	2,6	Tam. Pixel (um)	2,41x2,41
Área de Cobert. (km ²)	0,313	Erro Reprojeção (pixel)	1,3

Fonte: Autor (2022).

Na figura 24, apresenta o gráfico resultante da calibração da câmera realizada por meio do alinhamento.

Figura 24 – Imagem Residual da Calibração da câmera.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 6, são apresentados os valores dos coeficientes de calibração e da matriz de correlação. Os valores de cada parâmetro da câmera, como a distância focal calibrada, c_x e c_y são a posição do ponto principal, k_1 , k_2 e k_3 são as distorções radiais e P_1 e P_2 , distorções tangenciais. Os coeficientes do modelo utilizado são adimensionais. Os valores de r são normalizados pelo tamanho do *pixel*.

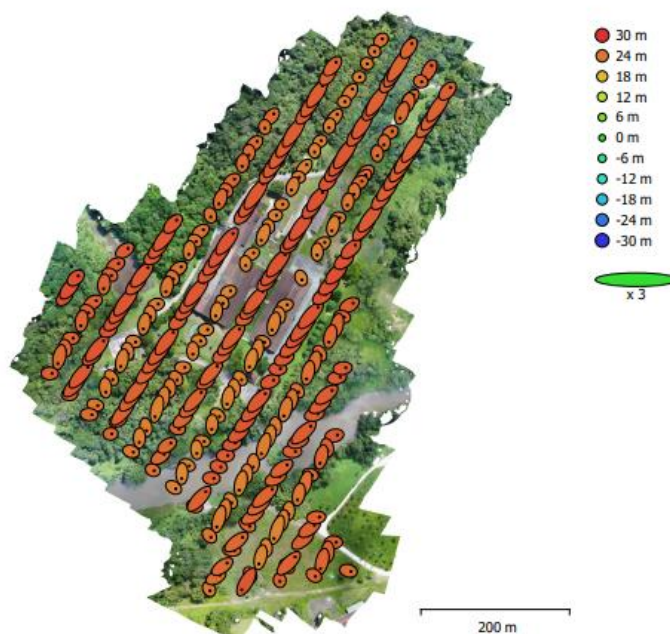
Tabela 6 – Coeficientes de calibração e matriz de correlação.

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3067.83	1.9	1.00	0.37	-0.39	-0.01	-0.19	0.30	-0.03	-0.13
Cx	-12.3014	0.085		1.00	-0.16	-0.03	-0.06	0.11	0.27	-0.05
Cy	12.6381	0.068			1.00	-0.00	0.07	-0.12	-0.02	0.28
K1	-9.57124e-05	3.7e-05				1.00	-0.93	0.85	-0.01	-0.00
K2	-0.00715319	7.4e-05					1.00	-0.98	0.02	0.03
K3	0.00450419	4.5e-05						1.00	-0.02	-0.04
P1	-0.000151758	3.2e-06							1.00	-0.03
P2	-0.00056463	2.8e-06								1.00

Fonte: Autor (2022).

Quanto aos valores apresentados de localização de câmeras e erros estimados, a figura 25, apresenta o erro em metros, sendo a diferença de localização entre as coordenadas da câmera 'fonte' (ou seja, do GPS) e as coordenadas estimadas da câmera. Os erros altos em metros, com uma variação homogênea, indicam que o alinhamento relativo das imagens é bom, mas as coordenadas do GPS da câmera não são precisas inicialmente. A tabela 7, apresenta o erro médio de localização das câmeras. Esses erros são considerados “normais” para o padrão de GPS utilizado no *payload* de um modelo de drone DJI *phantom 4 Advanced*.

Figura 25 – Localização de câmera e erros estimados.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 7 – Erro de localização de câmera médio

Erro X (m)	Erro Y (m)	Erro Z (m)	Erro XY (m)	Erro Total (m)
3,31088	4,19587	25,2065	5,34483	25,7669

Fonte: Autor (2022).

Os valores da tabela 8 e 9 descrevem os valores do erro total médio de localização das câmeras no momento de tomada das fotos. Nas tabelas 10 e 11, podemos ver em detalhes o erro para cada ponto.

Tabela 8 – RMSE pontos de controle.

Número	Erro X (cm)	Erro Y (cm)	Erro Z (cm)	Erro XY (cm)	Total (cm)
16	1,52659	2,31222	1,45841	2,77071	3,1311

Fonte: Autor (2022).

Tabela 9 – RMSE pontos de checagem.

Número	Erro X (cm)	Erro Y (cm)	Erro Z (cm)	Erro XY (cm)	Total (cm)
16	5,78677	5,28968	8,52881	7,84012	11,5848

Fonte: Autor (2022).

Tabela 10 – Lista dos pontos de controle e erros residuais.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
302	-1.24124	-1.86428	2.1911	3.13323	1.498 (8)
303	-2.50375	-1.87837	-1.16781	3.34078	0.980 (16)
304	-2.21344	-2.58737	-0.344543	3.42235	0.610 (20)
305	-0.0631399	0.837795	-0.447862	0.952086	0.667 (5)
306	1.45314	-2.90175	-2.4005	4.03661	1.973 (6)
307	-1.29752	-3.04867	0.541829	3.35731	1.624 (6)
308	0.989354	-0.152703	2.3546	2.55857	0.624 (24)
309	-0.62235	0.00427223	0.141381	0.638221	0.742 (5)
310	-0.397227	0.1655	0.40544	0.591237	0.864 (9)
1	-1.50046	4.44939	-1.85623	5.04917	0.894 (20)
501	1.77854	1.16685	-1.19867	2.44163	1.485 (9)
3	2.21538	4.20306	1.74366	5.06102	1.186 (18)
4	-0.142693	-0.38837	0.338339	0.534477	0.577 (8)
5	1.36836	0.416232	-0.665427	1.57748	0.504 (19)
6	-0.453814	3.33421	1.99927	3.91407	1.005 (16)
7	2.61426	-1.76376	-1.81264	3.63743	0.884 (18)
Total	1.52659	2.31222	1.45841	3.1311	0.983

Fonte: Autor (2022).

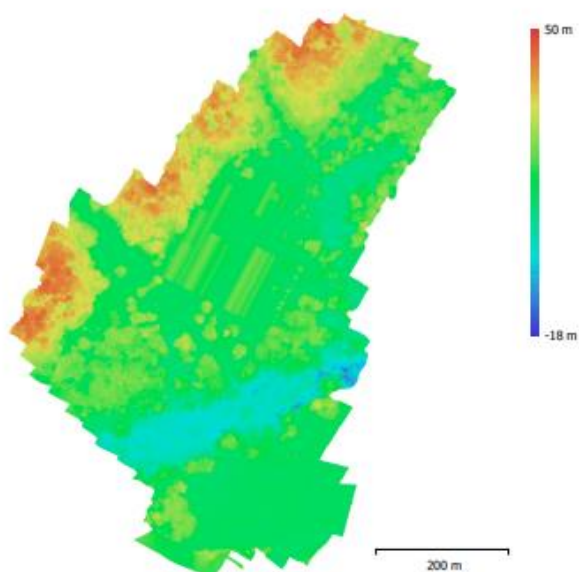
Tabela 11 – Lista dos pontos de checagem e erros residuais.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
201	-3.28716	10.491	9.04209	14.2347	0.610 (19)
202	-1.79875	6.01692	4.10146	7.50072	0.604 (18)
203	-7.38404	8.5271	2.85287	11.635	0.820 (20)
204	-10.9283	2.47861	3.69859	11.8005	0.936 (17)
205	-2.2008	5.9298	3.23225	7.10306	1.339 (17)
206	-2.03009	3.19091	-4.07318	5.55823	0.420 (5)
207	-5.17884	5.36675	3.29477	8.1534	0.804 (12)
208	-12.2976	-2.29807	1.34804	12.5829	0.968 (11)
209	5.19749	-2.16761	-4.28008	7.0733	0.398 (14)
210	-1.31662	-7.25862	24.3446	25.4378	0.135 (6)
Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
214	-3.79282	4.27887	0.606236	5.74993	0.478 (19)
215	-4.23685	5.32772	-0.974782	6.87646	0.682 (20)
216	-1.15062	-3.49661	11.4394	12.017	0.575 (17)
217	0.0121342	4.22977	9.2722	10.1914	0.658 (13)
218	2.01667	0.839795	12.5609	12.7495	0.500 (16)
219	9.71107	-2.87079	-4.1029	10.9261	1.554 (18)
Total	5.78677	5.28968	8.52881	11.5848	0.829

Fonte: Autor (2022).

Na figura 25, está o grid do MDE, com a elevação ortométrica do processamento fotogramétrico.

Figura 26 – Modelo digital de elevação.



Fonte: Autor (2022).

Resolução alcançada: 10,4 cm/pixel
Densidade de Pontos: 92,3 pontos/m²

Na figura 26, podemos observar o resultado do ortomosaico gerado no processamento das imagens fotogramétricas.

Figura 27 – Ortomosaico.

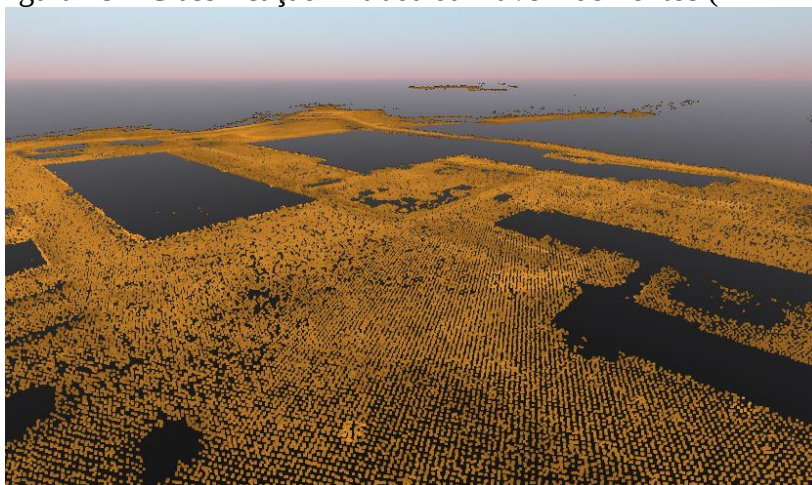


Fonte: Autor (2022).

5.2 RESULTADO DE CLASSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS

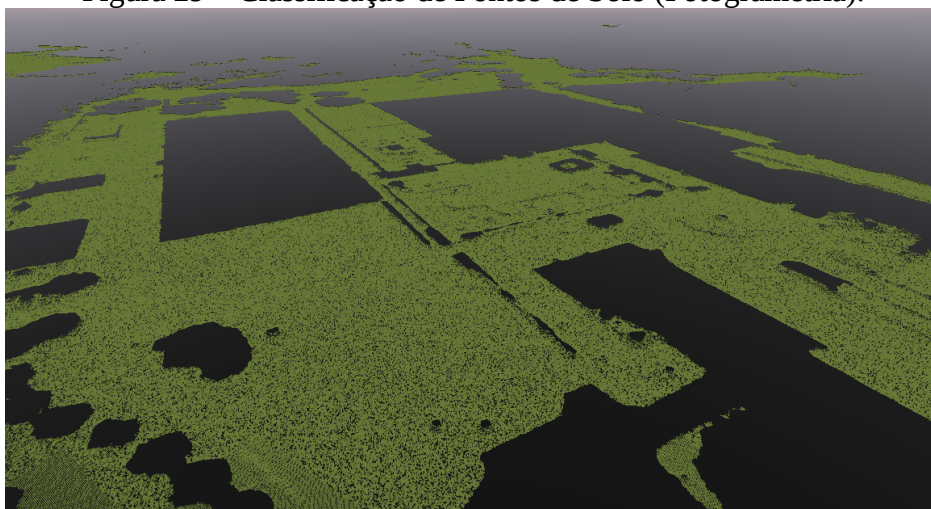
As classificações dos pontos de solo da nuvem densa tiveram resultados visuais similares para áreas sem obstruções visuais (vegetação) como podemos ver nas imagens na figura 27 e 28.

Figura 28 – Classificação Filtrada da Nuvem de Pontos (LIDAR).



Fonte: Autor.

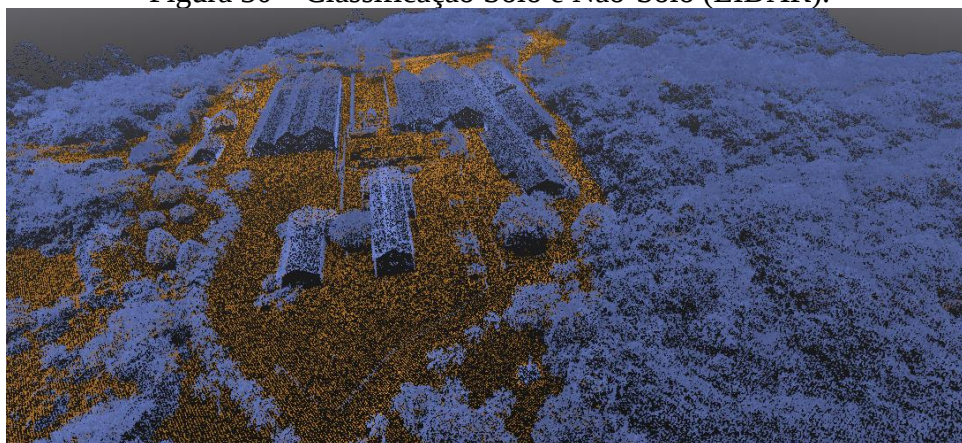
Figura 29 – Classificação de Pontos de Solo (Fotogrametria).



Fonte: Autor (2022).

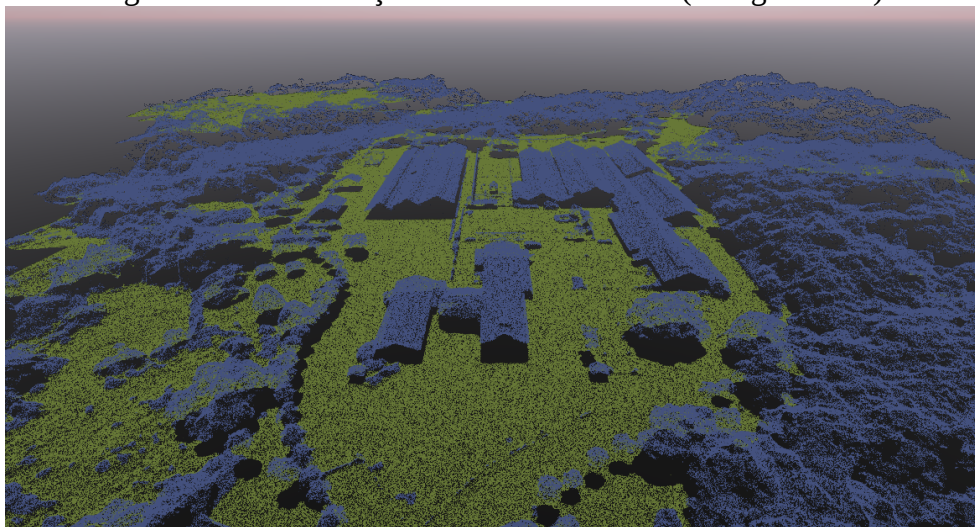
Com a classificação feita, foram gerados valores estatísticos dos pontos classificados de solo, de não-solo e pontos não classificados. Pode-se observar nas imagens, figuras 29 e 30, que apesar produto fotogramétrico ter obtido um maior número de pontos classificados como solo e não-solo, a metodologia utilizada com LIDAR obteve um resultado estatístico (%) maior, cerca de 11,24% dos pontos foram classificados como pontos de solo, os outros 88,76% foram definidos como pontos de não-solo, divididos em vegetação, construções, etc. Já os dados fotogramétricos alcançaram o número total 28.926.416 pontos candidatos para classificação, sendo apenas 3,38% e 96,62% dos pontos classificados como não-solo, este número mais elevado se deu pela resolução do projeto que tinha um GSD de 2,6 cm/pixel gerando assim um número maior de pontos que o captado pelo LIDAR.

Figura 30 – Classificação Solo e Não-Solo (LIDAR).



Fonte: Autor (2022).

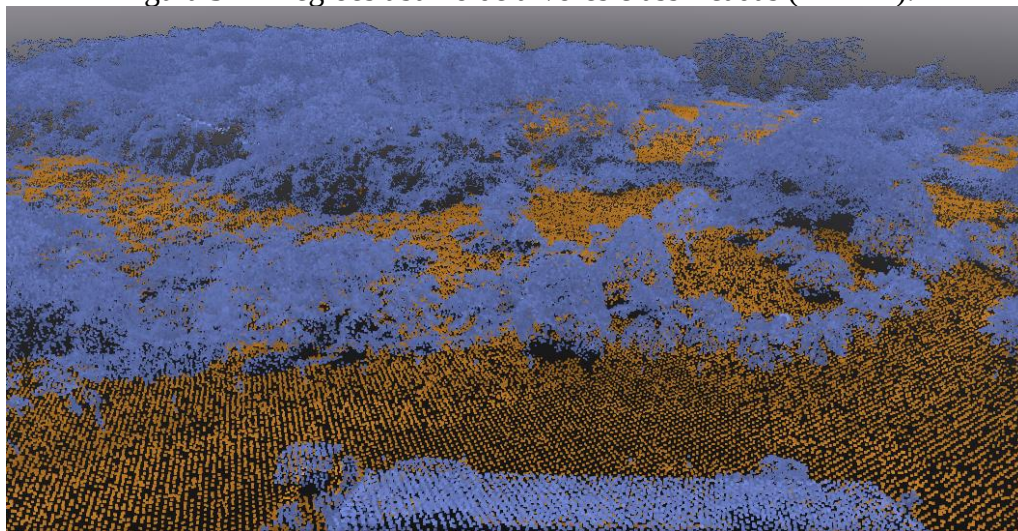
Figura 31– Classificação de Solo e Não-Solo (Fotogrametria).



Fonte: Autor (2022).

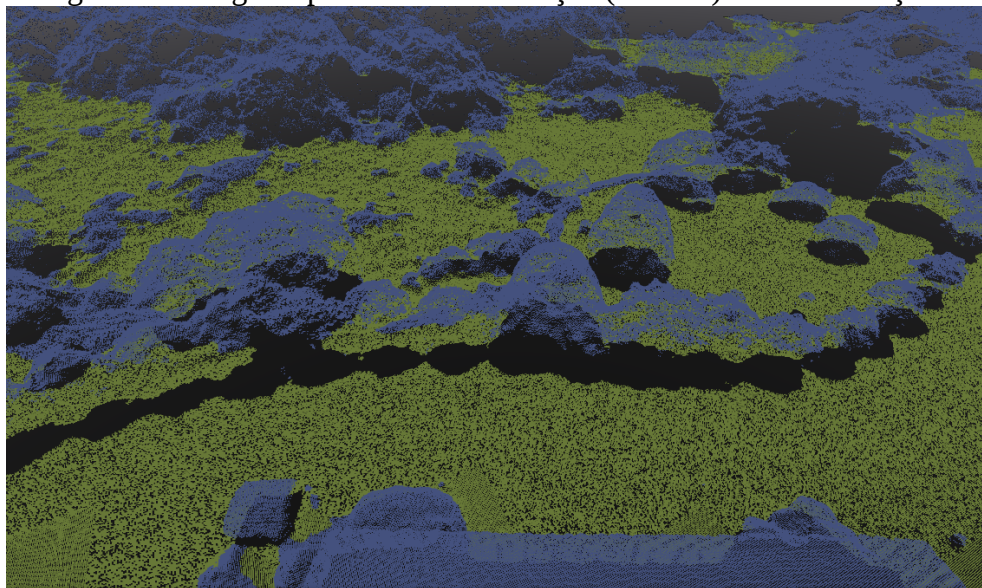
O grande diferencial da proporção das porcentagens alcançadas por cada método, está exatamente na capacidade de LIDAR conseguir informações em meio a amostras de vegetação densa ou adensada (figura 31). O pulso de laser tem a capacidade de ultrapassar entre as folhas, retornando uma medida diretamente no tronco ou no solo sob a árvore, enquanto a fotogrametria reconstrói apenas o que é visível na superfície, como podemos observar na figura 32.

Figura 32 – Regiões abaixo de árvores classificadas (LIDAR).



Fonte: Autor (2022).

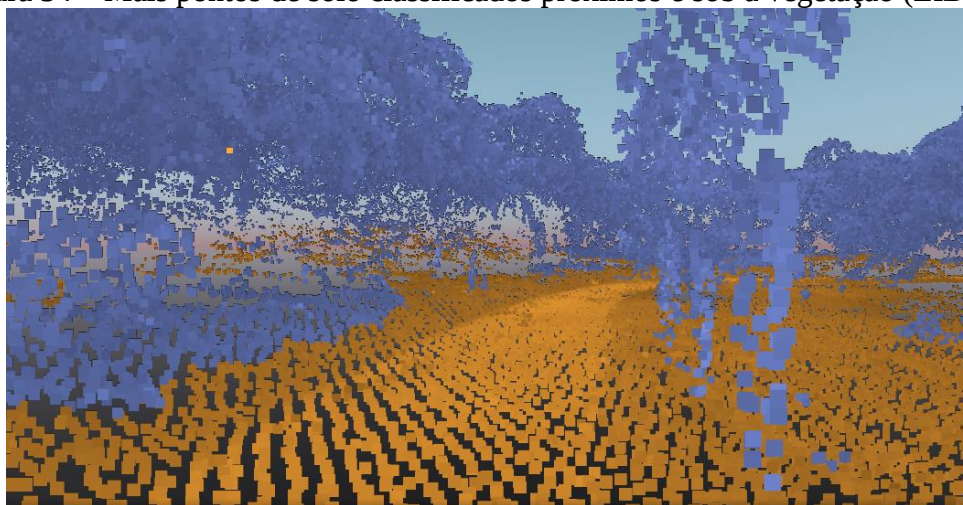
Figura 33 – Regiões próximas de obstrução (vertical) sem informações.



Fonte: Autor (2022).

Este resultado se repete em diversas regiões que apresentam vegetação, isso se dá pelo levantamento fotogramétrico não conseguir processar informações onde há uma texturização complexa como no caso das áreas de vegetação densa. Já o LIDAR por ter uma taxa de emissão de pontos eletromagnéticos por segundo (com taxa de até 480.000 pts/s) se consegue, muitas vezes, informações de solo por meio do espaçamento entre folhas e galhos alcançado pelo laser. A figura 33, apresenta um exemplo dessa capacidade de obtenção de pontos no solo, mesmo em áreas de vegetação densa.

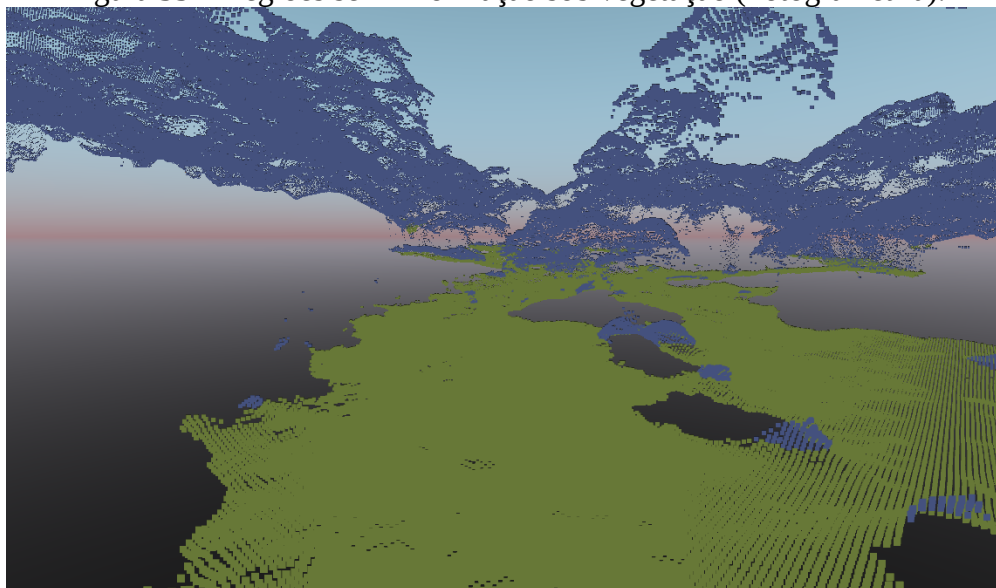
Figura 34 – Mais pontos de solo classificados próximos e sob a vegetação (LIDAR).



Fonte: Autor (2022).

Vazio de informações de solo devido a sobreposição de vegetação densa (Figura 34).

Figura 35 – Regiões sem informação sob vegetação (Fotogrametria).

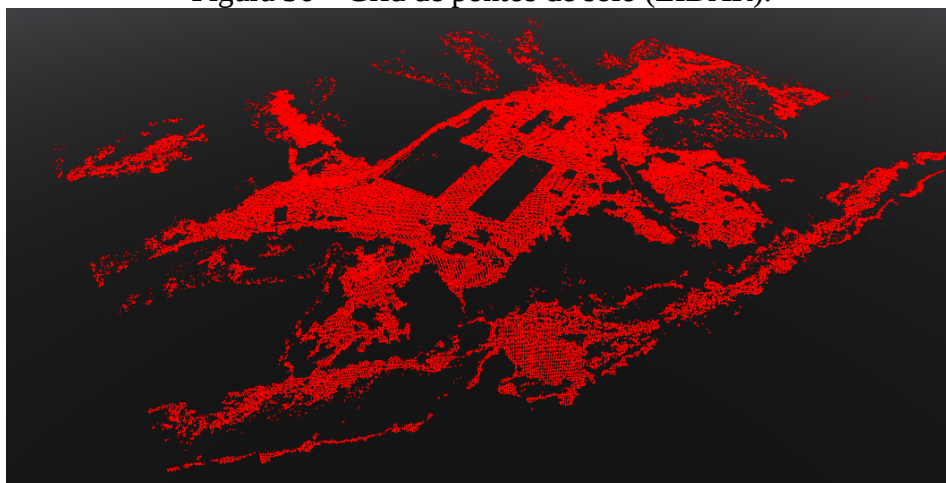


Fonte: Autor (2022).

5.3 RESULTADO DA MALHA DE PONTOS

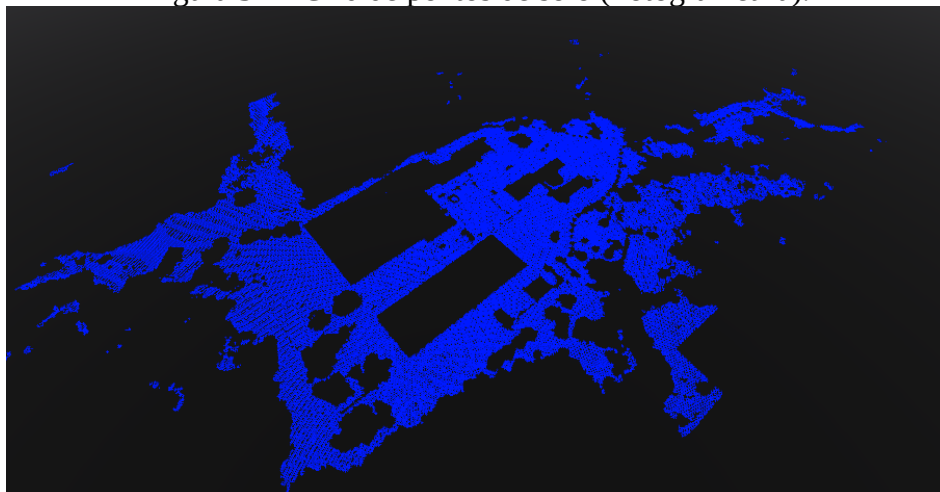
Os resultados da classificação obtidos utilizando a ferramenta do *software* Pix4D Survey, sendo satisfatórios, seguem para etapa de geração da malha de pontos que auxiliará na construção do MDT. Com o *software*, é permitido selecionar apenas os pontos de solo como candidatos e salvar uma malha com espaçamento entre os pontos otimizados para a geração de curvas de nível. Para o presente trabalho foi escolhido um espaçamento de 1 m, que se sobrepõe à resolução espacial dos produtos brutos e que alcançam a necessidade da resolução do produto com curvas de nível equidistantes em 1 metro, porém o software permite que se faça malhas com espaçamento menor. A figura 35 e 36 apresenta a malha (*grid*) dos pontos de solo com resolução de 1 metro para os métodos LIDAR e Fotogramétrica, respectivamente.

Figura 36 – Grid de pontos de solo (LIDAR).



Fonte: Autor (2022)

Figura 37 – Grid de pontos de solo (Fotogrametria).

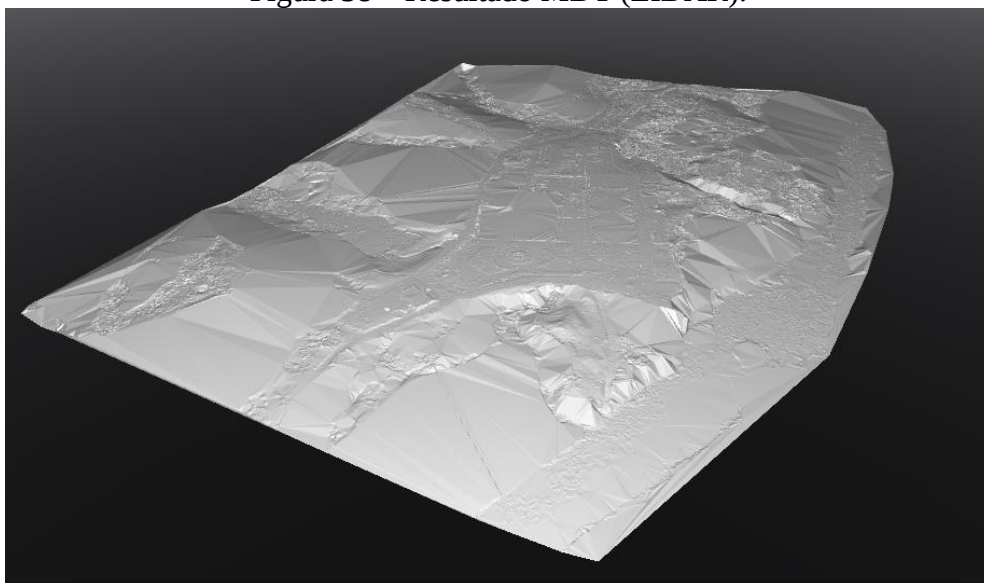


Fonte: Autor (2022).

5.4 RESULTADO DO MDT

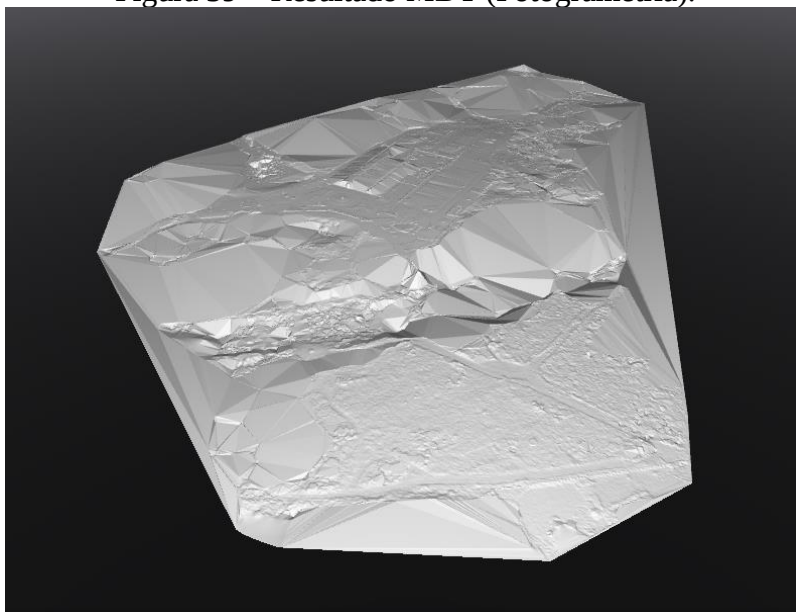
Com grid ou a malha de pontos gerada, pode-se utilizar a ferramenta de construção do MDT (figura 37 e 38) no *software* Pix4D Survey, selecionando a malha que se deseja interpolar. É possível realizar a interpolação de diferentes malhas, por exemplo, importar dados complementares levantados com outras metodologias de levantamento, como topografia convencional ou por rastreamento GNSS, isso ajuda a aprimorar o modelo. Para este trabalho foram utilizados apenas os grids gerados pela nuvem de pontos da fotogrametria e do LIDAR, a fim de comparações.

Figura 38 – Resultado MDT (LIDAR).



Fonte: Autor (2022).

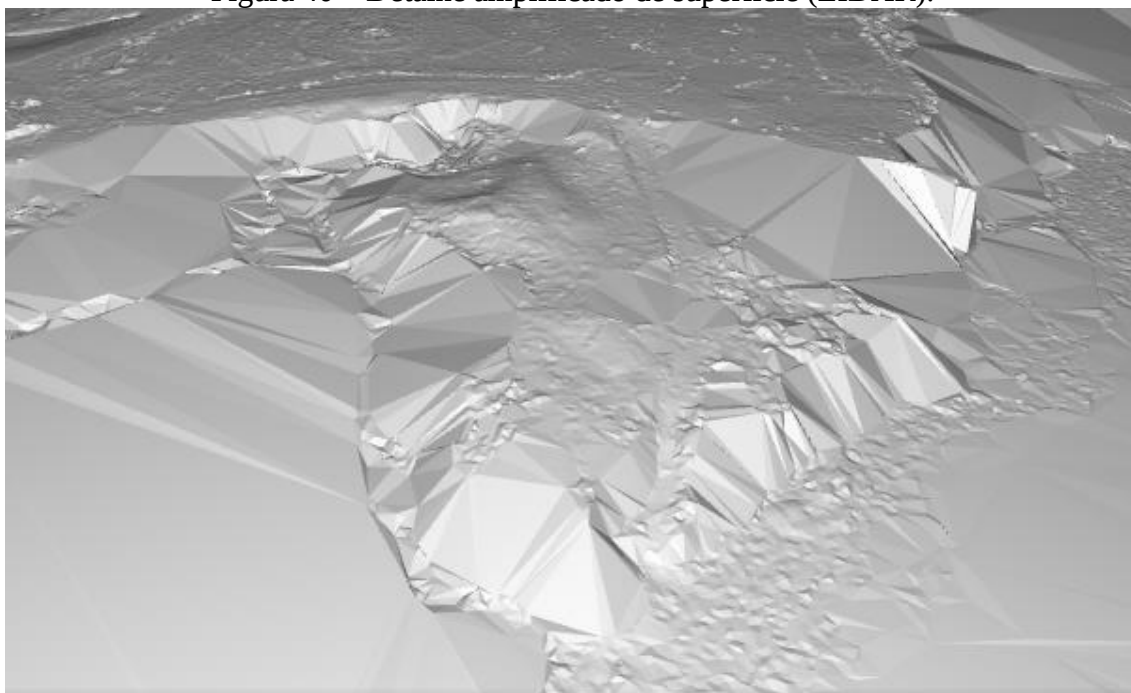
Figura 39 – Resultado MDT (Fotogrametria).



Fonte: Autor (2022).

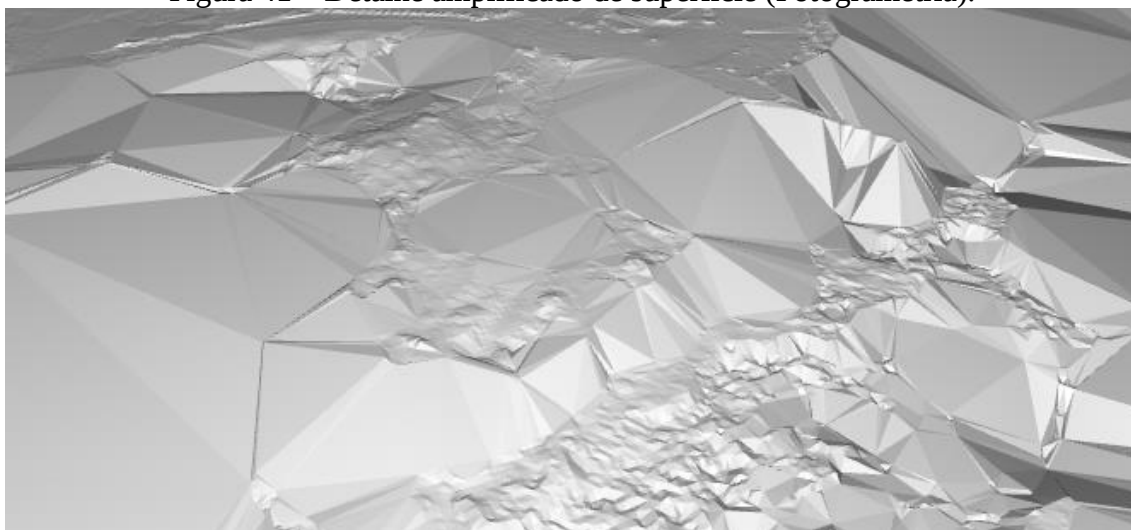
Nas Figuras 38 e 39, nas imagens capturadas do MDT de ambas as técnicas, são possíveis de verificar uma melhor suavização nas feições interpoladas pelo método TIN, na varredura do LIDAR, isto se dá pela quantidade de informações vetorial (3D) criada no grid de pontos, apesar do grid de pontos da fotogrametria ter um número maior de pontos de solo classificado, existem muitos “buracos”, sem informação, obrigando o interpolador estimar grandes áreas com pontos distantes um do outro, formando anomalias nas pontas dos triângulos de Delaunay.

Figura 40 – Detalhe amplificado de superfície (LIDAR).



Fonte: Autor (2022).

Figura 41 – Detalhe amplificado de superfície (Fotogrametria).



Fonte: Autor (2022).

Outra análise comparativa para o MDT, foi realizada usando pontos tridimensionais coletados com estação nas áreas de vegetação arbórea. Inserido os pontos no software Qgis (figura 41), foram extraídas informações de altimetria geradas dos MDTs (figura 39 e 40) e gerada a Tabela de erros (tabela 12). Podendo concluir uma maior penetração dos pontos de solo para metodologia LIDAR.

Figura 42 – Shape de pontos coletados com estação total em área de vegetação.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 12 – Erros dos pontos em área de vegetação densa.

ID	E (m)	N (m)	Z Est. Total	Z Fotogr.	Z LIDAR	Erro Z Foto (m)	Erro Z LIDAR (m)
637	282286,551	9109230,114	11,010	12,370	11,315	-1,360	-0,305
639	282309,65	9109237,622	10,085	12,085	10,730	-2,000	-0,645
640	282315,638	9109240,046	10,242	12,276	10,693	-2,035	-0,452
679	282300,845	9109235,778	10,380	12,422	10,631	-2,041	-0,251
680	282293,603	9109231,587	10,265	12,189	10,691	-1,924	-0,426
682	282322,486	9109243,252	10,141	12,467	10,375	-2,326	-0,234
824	282641,553	9109612,19	15,173	16,465	15,603	-1,292	-0,430
827	282640,661	9109601,867	14,357	15,145	14,753	-0,788	-0,395
831	282637,339	9109588,517	13,597	13,687	13,592	-0,09	0,005
836	282666,652	9109635,875	14,685	15,819	14,995	-1,134	-0,31
837	282659,749	9109636,261	15,672	17,496	15,677	-1,824	-0,005
838	282650,481	9109619,137	14,254	16,001	14,685	-1,748	-0,431
839	282652,785	9109626,222	14,600	16,357	15,152	-1,757	-0,552
842	282653,143	9109645,425	17,630	19,798	17,550	-2,168	0,080
					Σ erro (m)	-22,487	-4,352

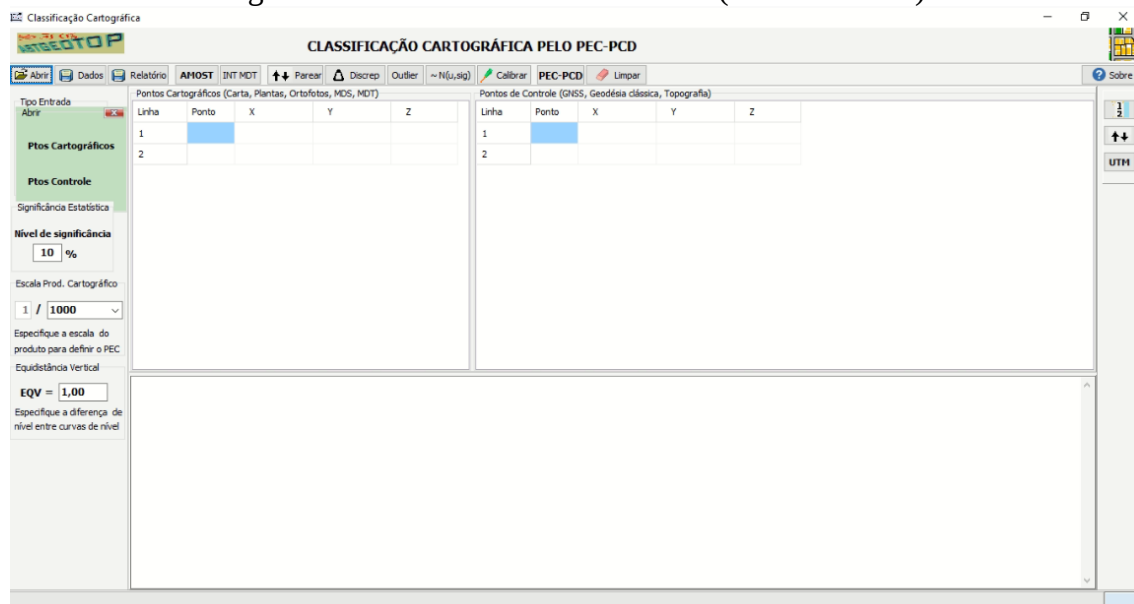
Fonte: Autor (2022).

5.5 AVALIAÇÃO DA PEC-PCD

Os pontos de referência de checagem obtidos pelo levantamento dos pontos de apoio com Posicionamento Relativo Estático Rápido foram utilizados para fazer as classificações da

PEC-PCD dos produtos cartográficos. Para essa verificação foi utilizado o *software* Class PEC-PCD (ASTGEOTOP), figura 42. Primeiramente, os testes de qualidade foram realizados no ortomosaico e no MDT.

Figura 43 – Software Class PEC-PCD (ASTGEOTOP).



Fonte: Autor (2022).

Inserido os arquivos dos pontos de controle (GNSS) e dos pontos lidos na ortoimagem, o *software* faz todos os cálculos necessários e gera o relatório técnico, que foram alcançados os padrões de classificação A para planimetria e altimetria dos dois métodos, figura 43 e 44, seguindo padrões de escala planimétrica de 1/1000 e equidistância vertical das curvas de nível a cada 1 metro para os dois métodos. Para planimetria foi obtido um EMQ de 0,046 m para o levantamento LIDAR e 0,106 m para fotogrametria, e EP de 0,17 m para os dois métodos. Já para altimetria o LIDAR obteve EMQ de 0,118 m e para fotogrametria de 0,093 m, chegando a um EP de 0,167 m para as duas metodologias.

Figura 44 – Resultado PEC-PCD LIDAR.

RT_LIDAR - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

TABELA DE CLASSIFICAÇÃO (PEC-PCD) NA ESCALA 1/1000

Classe PEC	Planimetria		Altimetria	
	EM(m)	EP(m)	EM(m)	EP(m)
Classe A	0,28	0,17	0,27	0,17
Classe B	0,50	0,30	0,50	0,33
Classe C	0,80	0,50	0,60	0,40
Classe D	1,00	0,60	0,75	0,50

CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO PELA PEC

CLASSIFICAÇÃO PEC - PLANIMETRIA
 Escala do Produto Cartográfico = 1/1000
 Percentual $\text{err2D} \leq \text{EMax_PEC}$ = 100,0%
 EMQplan = 0,042
 EP_PEC = 0,170
 Conclusão: classe = A

CLASSIFICAÇÃO PEC - ALTIMETRIA
 Equidistância vertical das curvas de nível = 1,00m
 Percentual $|\text{dZ}| \leq \text{EMax_PEC}$ = 94,4%
 EMQalt = 0,118
 EP_PEC = 0,167
 Conclusão: classe = A

Fonte: Autor (2022).

Figura 45 – Resultado PEC-PCD Fotogrametria

RT_FOTOGRAMETRIA - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA - PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS
 PEC-PCD

TABELA DE CLASSIFICAÇÃO (PEC-PCD) NA ESCALA 1/1000

Classe PEC	Planimetria		Altimetria	
	EM(m)	EP(m)	EM(m)	EP(m)
Classe A	0,28	0,17	0,27	0,17
Classe B	0,50	0,30	0,50	0,33
Classe C	0,80	0,50	0,60	0,40
Classe D	1,00	0,60	0,75	0,50

CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO CARTOGRÁFICO PELA PEC

CLASSIFICAÇÃO PEC - PLANIMETRIA
 Escala do Produto Cartográfico = 1/1000
 Percentual $\text{err2D} \leq \text{EMax_PEC}$ = 94,4%
 EMQplan = 0,106
 EP_PEC = 0,170
 Conclusão: classe = A

CLASSIFICAÇÃO PEC - ALTIMETRIA
 Equidistância vertical das curvas de nível = 1,00m
 Percentual $|\text{dZ}| \leq \text{EMax_PEC}$ = 100,0%
 EMQalt = 0,093
 EP_PEC = 0,167
 Conclusão: classe = A

Fonte: Autor (2022).

5.6 CUSTOS COMPARATIVOS DOS MÉTODOS

Para efeitos de comparação, as duas metodologias de aquisição e geração de MDT apresentam prós e contras, podendo alcançar resultados satisfatórios, precisos e acurados, a depender de aplicações e das necessidades do levantamento. Em relação aos comparativos de custos, uma breve análise e benefícios são apresentados Tabela 13 e 14 para as duas tecnologias. O custo do uso da tecnologia LIDAR é cerca de quatro vezes maior quando comparado com a fotogramétrica.

Tabela 13 – Preço de equipamento e opções de softwares compatíveis.

TECNOLOGIA LIDAR UTILIZADA		
Equipamento	Preço	Total Equipamento
DJI Zenmuse L1	R\$ 70.000,00	R\$ 121.299,00
DJI Matrice 300 RTK*	R\$ 51.299,00	
Softwares Compatíveis	Preço	Tempo de uso
DJI Terra	R\$ 8.470,00	Ano
Pix4D Survey	R\$ 825,00	Mês
Pix4D Mapper	R\$ 1.925,00	Mês
Pix4D Capture	Grátis	Permanente
Global Mapper	R\$ 5.900,00	Ano
QGIS	Grátis	Permanente

Fonte: Autor (2022).

Tabela 14 – Preço de equipamento e opções de softwares compatíveis.

TECNOLOGIA FOTOGRAMETRIA UTILIZADA		
Equipamento	Preço	Total Equipamento
DJI Phantom 4 Pro	R\$ 31.500,00	R\$ 31.500,00
Softwares Compatíveis	Preço/Mensal	Tempo de uso
Pix4D Survey	R\$ 825,00	Mês
Pix4D Mapper	R\$ 1.925,00	Mês
Pix4D Capture	Grátis	Permanente
QGIS	Grátis	Permanente
Agisoft Metashpe	R\$ 450,00	Permanente
Global Mapper	R\$ 5.900,00	Ano

Fonte: Autor (2022).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a comparação entre duas metodologias de levantamento com VANT, a primeira utilizando a fotogrametria *Structure from Motion* (SfM) e a outra utilizando equipamento com tecnologia LIDAR. Utilizando ferramentas diversas de levantamento, processamento e pós-processamento para criação de produtos que pudessem ser comparados estatisticamente e visualmente quando convém.

Quanto a autonomia de tempo de levantamento, o Matrice 300 RTK levou uma leve vantagem por ter um tipo de captura contínua sem a necessidade da inércia do equipamento para efetuar a coleta dos dados, já com equipamento fotogramétrico foram efetuadas mais de três tentativas de voos devido à iluminação e intempéries meteorológicas, além de pequenas pausas no momento das tomadas de fotos para troca de baterias. Outra vantagem está ligada a fotogrametria necessitar de luz, natural ou artificial, para captura das imagens. Apesar da perda de alcance de 450 m (80% refletividade) para 190 m (10% de refletividade) o LIDAR não necessita da iluminação para captura da nuvem de pontos (necessita para captura do RGB do sensor).

Para tempo de processamento, foi utilizado um hardware seguindo as recomendações de especificações dos softwares. Sistema operacional de 64 *bits*, memória RAM de 128 GB, processador i7 (3,6 GHz) *Octa-Core*, placa de vídeo dedicada de 6 GB RAM. O sistema LIDAR levou vantagem novamente, sem a necessidade de correções e a inserção de pontos de controle no processamento em si, houve apenas a necessidade de descarregamento do arquivo (.las) que já havia sido pré-visualizado ao vivo durante o levantamento, já o processamento fotogramétrico necessita de todos os passos necessários no tópico 4.6.

Para comparações de armazenamento, os dados vetoriais (3D) do levantamento LIDAR, torna-se necessário uma boa especificação de hardware para manuseio, e grandes espaços de memória de armazenamento. Para fins deste levantamento a proporção chegou a ser duas vezes maior o arquivo (.las) do LIDAR em comparação ao dado (.geotiff) da fotogrametria. A manipulação dos demais arquivos tiveram basicamente o mesmo tempo de processamento. Foram utilizados para a construção do MDT: arquivos *raster* (.geotiff) e arquivos vetoriais de nuvem de pontos (.las).

As classificações da acurácia posicional aplicando o PEC-PCD para os dois métodos, atenderam classe A para planimetria de escala de 1:1000 e uma e na altimétrica para curvas de nível a cada 1 metro. Sendo assim as duas metodologias alcançaram o padrão desejado para o levantamento, com a vantagem do LIDAR na aquisição de pontos de solo em 8% maior na área

onde se encontrava um aglomerado de vegetação obstrutiva, gerando um MDT com maior detalhamento da realidade. O MDT fotogramétrico nas áreas de vegetação não gera confiabilidade e necessita uso de pontos com estação total para extrair coordenadas altimétricas.

Portanto, ao nível de escolha de uma tecnologia, deve-se analisar o custo x benefício do projeto para melhor escolha do equipamento e softwares a serem utilizados, tempo de execução, características naturais da área a ser levantada, capacidade de hardware para processamento e necessidade de precisão e acurácia do produto final, para este presente trabalho, o LIDAR tornou-se uma opção melhor para condições de levantamento, processamento e produto final e a fotogrametria, a vantagem é o custo mais barato, com eficiência nas áreas descobertas ou de vegetação rasteira.

REFERÊNCIAS

A. Wehr and U. Lohr, “**Airborne Laser Scanning—An Introduction and Overview,**” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 2-3, 1999, pp.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **ANAC emite o primeiro certificado para VANT feito no Brasil.** Brasília, 2015.

ACKERMANN, F. **Airborne laser scanning - present status and future expectations.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 64-67.

ALVES-DA-SILVA, 1999.

BALTSAVIAS, E.P. 1999. **Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas,** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 :199–214.

BASE AEROFOTOGRAMETRIA. Vantagens em usar aeronaves tripuladas ao invés de drones. <https://www.baseaerofoto.com.br/vantagens-em-usar-aeronaves-tripuladas-ao-inves-de-drones/> Acesso em 19/10/2022.

BASTOS, B. Da C.; FILHO, L. E. Utilização Da Tecnologia LIDAR Em Projetos De Engenharia De Infraestrutura Viária. XI Congresso Nacional Y VIII Latinoamericano De Agrimensura, 2012. n. May 2012, p. 5.

BLAND, G.; CORONADO, P.; MILES, T.; BRETTHAUER, P.; LUNSFORD, A.; BOGNAR, J.: **Sensors with Wings - Small UAVs for Earth Science,** American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

BOTELHO, M. F. CENTENO, J. A. S. **Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados LASER scanner aerotransportado** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 13, p. 107-126, 2007.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre documentos e procedimentos para as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional.

BRITO, J. L. N. e S. COELHO FILHO, L. C. T.. **The E-FOTO Project - A digital photogrammetric softcopy kit for educational purposes.** In: Proc. 6th Geomatic Week Proceedings, 2005, Barcelona, Spain.

BRITO, J. L. N. e S. COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria Digital.** [S.l.]: [s.n.], 2009.

CENTENO, J.S.; STEINLE, E. VÖGTLE, T. (2000). **Análise de modelos numéricos de elevação derivados de Laser Scanner para o monitoramento urbano.** 4º COBRAC, Florianópolis, 2000.

Chaves, M. A. **Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônia**. Tese de doutorado Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2002.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R.: **Sistema Laser Scanner: conceitos e princípios de funcionamento**, (3ª edição), Curitiba, UFPR, 2004.

FONSECA NETO, Francisco de Deus et al. **Avaliação da qualidade posicional de dados espaciais gerados por VANT utilizando feições pontuais e lineares para aplicações cadastrais**. Curitiba-PR, 2017. p 134-149.

Habib, A.; Kersting A. P.; Bang, K. I.; Lee D. C. **Alternative methodologies for the internal quality control of parallel LIDAR strips**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 48, n. 1, p. 221-236, 2010.

Hudzietz, B. P., and Saripalli, S. (2011). **“An experimental evaluation of 3d terrain mapping with an autonomous helicopter.”** Conf. on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics.

JAUD, M. et al. **“Potential of smartphone SfM photogrammetry to measure coastal morphodynamics.”** Remote Sensing, 2019. v. 11, n. 19.

Lichti, D D and B R Harvey (2002) **An investigation into the effects of reflecting surface material properties on terrestrial laser scanner measurements**. Geomatics Research Australasia (In press).

MAIA, T. C. B. **Estudo e Análise de Poligonais Segundo a NBR 13.133 e o Sistema de Posicionamento Global**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – São Carlos/SP. 1999.

MELO, R. R. S. COSTA, D. B. **Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para inspeção de logística em canteiros de obra**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 9., São Carlos, 2015.

MELLO, C. R.; LIMA, J.M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e Inverso do Quadrado da Distancia para Interpolação dos Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas. R. Bras. Ci. Solo. V. 27, p. 925-933. 2003.

PEREIRA, A. J. de S.. **Contributos do Airborne Laser Scanning na geração de Modelos Digitais de Elevação e produtos derivados: Ensaio comparativo baseado em questões geomorfológicas e hidrográficas**. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, 2012.

PETRIE, G.; KENNIE, T. J.M **Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering**. 1 ed. New York; McGraw-Hill, 1990.

REISS, M.L.L.; TOMMASELLI, A.M.G.. **Orientação de imagens sem pontos de apoio para mensuração de superfícies planas.** *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, Pr, v. 9, n. 1, p. 121-139, 2003.

REMONDINO, F., Gruen, A., von Schwerin, J., Eisenbeiss, H., Rizzi, A., Sauerbier, M., Richards-Rissetto, H., 2009. **Multisensors 3D documentation of the Maya site of Copan.** Proc. of 22nd CIPA Symposium, 11-15 Oct., Kyoto, Japan.

SANTOS, D. R.; Tommaselli, A. M. G.; Dalmolin, Q. 2004, **Semi-Automatic Modeling of Buildings from Digital Surface Models.** Cartography and Geographic Information Science.

SILVA NETO, Manoel (Ed.). Planejamento de Voo e GSD. 2015. Disponível em: <<https://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo-tudo-que-voce-precisa-saber/>>, Acessado em: 24 out. 2022.

SHAN, J. and Toth, C. K. 2008. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing.** Taylor & Francis.

TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. da S. **Avaliação Experimental de uma Metodologia Automática para a Geração de Estereomodelos a Partir de Dados de Orientação Direta.** *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 56, n. 1, 2009.

ZANDONÁ, D. F. et al. **Avaliação da precisão altimétrica do mapeamento digital a laser em áreas de cobertura vegetal densa.** *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, 2005. p. 757–762.