

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA – IG
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA
***CAMPUS* MONTE CARMELO**

FRANCISCO MARINO DOS SANTOS JUNIOR

ANÁLISE DE NUVEM DE PONTOS OBTIDA POR MEIO DE IMAGENS
COLETADAS ATRAVÉS DE ARP

MONTE CARMELO

2019-2

FRANCISCO MARINO DOS SANTOS JUNIOR

**ANÁLISE DE NUVEM DE PONTOS OBTIDA POR MEIO DE IMAGENS
COLETADAS ATRAVÉS DE ARP**

Projeto apresentado como requisito para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II no curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica na Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Luís Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. George Deroco Martins

MONTE CARMELO

2019-2

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre do meu lado, por me conceder saúde e ser minha força em todos os momentos.

Aos meus pais Francisco e Aparecida por toda educação que me deram e por me apoiar sempre nos estudos.

À Maria Julia por estar sempre do meu lado me incentivando a caminhar em frente e buscar meus objetivos.

À Andressa por toda essa batalha que passamos juntos na faculdade. Ao Kelin pelas brincadeiras e distrações na faculdade.

Ao meu orientador Prof. Doutor Ricardo Luís Barbosa por estar sempre disposto à enfrentar desafios “como esse TCC por exemplo”, pelo apoio e pela dedicação.

Ao Prof. Doutor Rodrigo Gallis pelo apoio no TCC e também pelos momentos de descontração.

À empresa Integral Soluções pelo empréstimo do drone Phantom 4 Advanced.

Ao Geógrafo Samuel Lacerda pela disponibilidade e apoio nos Voos realizados para desenvolvimento do TCC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Poligonal fechada.	14
Figura 2 – Poligonal enquadrada.	14
Figura 3 – Poligonal enquadrada.	15
Figura 4 – Tipos de fotografias aéreas de acordo com a inclinação do sensor.	20
Figura 5 – Representação da sobreposição longitudinal.	21
Figura 6 – Representação da sobreposição lateral.	21
Figura 7 – Mapa de localização da área de estudo.	25
Figura 8 – Fluxograma metodológico.	28
Figura 9 – Croqui da área de realização do voo.	29
Figura 10 – Distribuição dos pontos de apoio nas faces estudadas.	30
Figura 11 – Croqui da poligonal enquadrada utilizada para apoio das irradiações.	31
Figura 12 – Alinhamento das fotos.	32
Figura 13 – Densificação da nuvem de pontos.	33
Figura 14 – Parâmetros iniciais da câmera.	33
Figura 15 – Medição de distância entre dois pontos.	34
Figura 16 – Poligonal e caminhamento criados no <i>software</i> DataGeosis.	35
Figura 17 – Parâmetros da câmera calibrados e ajustados.	36
Figura 18 – Nuvem gerada a partir do alinhamento das fotografias.	37
Figura 19 – Nuvem gerada após o processo de densificação.	38
Figura 20 – Nuvem de pontos gerada através da aerofotogrametria.	38
Figura 21 – Nuvem de pontos gerada através da aerofotogrametria.	39
Figura 22 – Dados referentes à poligonal principal depois do ajustamento.	40
Figura 23 – Dados coletados em campo e irradiações calculadas.	40
Figura 24 – Irradiações calculadas e ajustadas.	41
Figura 25 – Distribuição dos alvos e as respectivas distâncias entre eles.	41
Figura 26 – Distribuição dos alvos e as respectivas distâncias entre eles.	42
Figura 27 – Demonstração da direção em que o ponto foi deslocado.	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das ARPs quanto ao Peso Máximo de Decolagem (PMD).	23
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erro médio de localização da câmera.	36
Tabela 2 – Diferença entre as distâncias.	42
Tabela 3 – Diferença entre as coordenadas.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicação
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
CMA	Certificado Médico Aeronáutico
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sampling Distance.</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
RAB	Registro Aeronáutico Brasileiro
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RQEMQ	Raiz quadrada do erro médio quadrático
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo geral	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. JUSTIFICATIVA	10
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1. Levantamento e Modelagem de estruturas	11
4.1.1. <i>BIM</i>	12
4.2. Topografia	12
4.2.1. <i>Poligonação</i>	13
4.2.2. <i>Estações totais</i>	15
4.3. Fotogrametria	16
4.3.1. <i>Fotogrametria Aérea</i>	19
4.3.2. <i>ARP</i>	23
5. MATERIAL E MÉTODOS	25
5.1. Área de estudo	25
5.2. Material	25
5.3. Métodos	27
5.3.1. <i>Levantamento aerofotogramétrico</i>	28
5.3.1.1. <i>Planejamento de voo</i>	28
5.3.1.2. <i>Pontos de apoio</i>	29
5.3.2. <i>Levantamento topográfico</i>	30
5.3.4. <i>Processamento dos dados</i>	32
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	46

RESUMO

A necessidade de documentação de estruturas é muito importante no cenário atual, visando planejamento, preservação, controle e até mesmo restauração se necessário. Seguindo esses conceitos, as informações coletadas sobre uma estrutura necessitam demonstrar fielmente a realidade, sendo bastante precisas. Isso para que não haja complicações se necessário fazer uso delas. Dentro disso, este trabalho visa gerar um estudo de análise sobre a utilização de aerofotogrametria de baixo custo com viés para modelagem de estruturas. Neste trabalho foi utilizado o método de topografia convencional para mensuração de alguns dados a serem comparados na nuvem de pontos tridimensional, gerada a partir das imagens aéreas obtidas por ARP. Os resultados apontam que não é viável a utilização dessa metodologia sem que se faça um robusto georreferenciamento de imagens, visando melhorar a precisão a priori oferecida pelo ARP. Além disso, é necessário um bom planejamento para não comprometer a eficácia do projeto e as condições ambientes necessitam ser favoráveis.

Palavras-chave: Modelagem de estruturas. Aerofotogrametria. Nuvem de pontos.

1. INTRODUÇÃO

Informações geométricas sobre edifícios existentes de relevância cultural são importantes para muitas finalidades, como por exemplo, para o planejamento, a preservação e a reconstrução do mesmo se necessário. A maioria das estruturas não conta com a devida documentação, pois as plantas originais foram perdidas, ou nunca existiram, ou o prédio sofreu inúmeras alterações desde o projeto original, sendo elas não documentadas.

A preservação de construções típicas e prédios públicos com características arquitetônicas representativas é uma preocupação atual, que esbarra nas limitações econômicas e falta de políticas de preservação. Uma das estratégias para a eficiente preservação do patrimônio cultural é a documentação dos prédios para apoiar futuras ações de restauração (CENTENO et al., 2004). Essa documentação tem elevada importância, não só para as instituições ligadas à conservação da construção, mas também para a sociedade em geral que se beneficia do patrimônio de alguma forma (FERNANDES, 2016).

Dentro do leque das técnicas e métodos que atualmente existem para a execução da documentação de um objeto, a aerofotogrametria foi a técnica utilizada neste trabalho. Esse método de levantamento, depois de passar por alguns processos, fornece dados tridimensionais de um objeto.

Os primeiros levantamentos feitos através de métodos fotogramétricos baseavam suas aplicações apenas na cartografia, porém isso mudou com o passar dos anos, abrangendo cada vez mais, diversas áreas de interesse, devido à evolução acentuada de novas tecnologias. Diferentemente de épocas passadas, com os avanços mais recentes em *hardware* e aplicações digitais, é possível o desenvolvimento de modelação tridimensional sobre fotografias. Sobre esse conceito, a aerofotogrametria realizada a partir de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), tem ganhado espaço no mercado pela facilidade de operação e baixo custo.

Atualmente as ARPs são cada vez mais populares e possuem as mais diversificadas utilidades, sendo que o recurso a estes dispositivos torna-se uma realidade acessível para a tecnologia da construção. A capacidade que apresentam para captar dados em várias vertentes na envolvente de uma edificação faz deste dispositivo uma ferramenta muito vantajosa na utilização da fotogrametria. A liberdade da utilização dos ARPs, combinada com a técnica da fotogrametria, tornam estas ferramentas bastante apelativas, com um custo-benefício bastante atrativo (FERNANDES, 2016).

Nesse sentido, este trabalho visa a geração de uma nuvem de pontos tridimensional coletada por aerofotogrametria de baixo custo e análise de precisão das coordenadas e distâncias entre pontos de apoio implantados na superfície analisada.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Realizar a composição e análise das nuvens de pontos geradas a partir de imagens obtidas por ARP, através das distâncias dos pontos de controle observados na nuvem e os levantados por topografia convencional.

2.2. Objetivo específico

- Analisar a variação das coordenadas dos alvos calculadas por topografia e as coordenadas disponibilizadas pelo sistema de GPS(*Global Positioning System*) acoplada ao ARP Phantom 4 *Advanced*.

3. JUSTIFICATIVA

Atualmente muitas áreas que são envolvidas com construções, como por exemplo, arquitetura, urbanismo e engenharia civil, necessitam frequentemente do levantamento e documentação de objetos existentes. Tendo como objetivo a geração de um banco de dados que pode contribuir para o desenvolvimento de novos projetos, restauração, reforma ou ampliação de estruturas. Além de contribuir também para estudos e planejamentos de cidades (ANDRADE, 2012).

Segundo Côrtes e Amorim (2007), a documentação arquitetônica é um processo de mensuração, armazenamento, recuperação, tratamento, disponibilização e divulgação de dados e informações gráficas e não gráficas, sobre edificações, para os mais variados fins. A divulgação da existência de uma base documental, bem como a divulgação das suas características e acesso, são tão importantes quanto à própria base de dados.

Há diversas técnicas para aquisição de dados relacionados ao levantamento, documentação e modelagem de estruturas, porém neste trabalho será utilizada a técnica de

aerofotogrametria. As técnicas fotogramétricas vêm ganhando espaço nesse tipo de aplicação, devido ao avanço das tecnologias de coleta e *softwares* para os processamentos dos dados. O baixo custo e a versatilidade proporcionada por esse tipo de técnica vêm se tornando um atrativo para os operadores (ANDRADE, 2012).

Essa técnica mencionada busca obter representações fiéis da realidade. Como o trabalho tem como intuito a geração de uma nuvem de pontos tridimensional de duas faces do prédio da UFU, a análise de desempenho da aerofotogrametria de baixo custo e a importância pela conservação da estrutura do prédio, se tornam justificativas para elaboração desse trabalho. Além disso, a criação de um BIM (*Building Information Modelling*) futuro, também se faz justificativa desse trabalho, já que integra vários tipos de informações sobre a estrutura de um edifício.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Levantamento e Modelagem de estruturas

Devido à incapacidade de preservação física de muitas estruturas, pelos mais variados motivos, é necessário uma documentação precisa e detalhada do patrimônio. Tendo em vista um papel fundamental para a conservação de sua memória (CORTÊS & AMORIM, 2007).

Muitas infraestruturas não possuem dados de projetos, principalmente algumas mais antigas. Tais dados são essenciais para realização de futuras manutenções, consertos ou renovações. Métodos convencionais de levantamentos da geometria de estruturas requerem muito tempo. Devido a isso e pela capacidade de coleta dos sistemas de varredura a laser, com a utilização desses sistemas é possível produzir modelos digitais de estruturas em um menor tempo e com um alto grau de detalhamento.

A documentação precisa das estruturas é fundamental para sua restauração e conservação, além de ter um papel importante na divulgação para o público em geral. A fotogrametria Digital é uma das três tecnologias de mensuração de dados que apresentam maior destaque na catalogação de estruturas arquitetônicas. Essa tecnologia vem sendo bastante utilizada e se faz uma ótima opção, quando associada com ferramentas computacionais de restituição e retificação de imagens. Em decorrência dessa associação obtêm-se uma maior eficácia na aquisição dos dados levantados (OLIVEIRA, 2008).

4.1.1. BIM

Desde o início da história, engenharia, arquitetura, construção e operação contaram com desenhos para representar os dados necessários para o projeto, construção e gerenciamento de cada tipologia de objetos. Dentro de uma indústria, sobre os setores de construção, os desenhos 2D e 3D evoluíram ao longo de centenas de anos para definir a base de representação como atualmente codificada para cada participante no processo de construção. Nos últimos vinte anos, um modelo (banco de dados) altamente preciso e detalhado denominado BIM, tem sido usado na gestão de processos de operação, renovação e desenvolvimento de patrimônios culturais (OSELLO & RINAUDO).

Um BIM é rico em decoração, ornamentação e elementos artísticos em geral, exigindo mais medição e modelagem do que normalmente é necessário nos projetos de construção. O BIM fornece um modelo central com padrões e protocolos específicos para colaboração e compartilhamento de dados entre diferentes especialistas, durante o processo de construção. Os dados exibidos no modelo podem ser inseridos e removidos através de processos de importação ou exportação de diferentes profissionais, capazes de melhorar o modelo de informação para diferentes casos. Para construção desse banco de dados, o ponto de partida é o conhecimento profundo de um objeto existente, de suas geometrias, características e componentes, além da sua história e seu estado de conservação (OSELLO & RINAUDO).

Devido às construções estarem sujeitas frequentemente a colapsos, deteriorações, entre outros aspectos que modificam sua estrutura, a geração de um BIM se mostra importante para alguns casos. Isso porque sua composição conta com características diversas, desde componentes básicos vistos a priori numa estrutura, até componentes específicos dispostos no interior da estrutura, como por exemplo, componentes de rede elétrica e esgoto.

Este trabalho que será realizado poderá contribuir futuramente para uma suposta composição de um banco de dados com características de um BIM. Porém, além das informações contidas na nuvem de pontos, seria necessário obterem dados de todos os componentes da estrutura do prédio.

4.2. Topografia

O homem sempre necessitou conhecer o meio em que vive, por questões de sobrevivência, orientação, segurança, guerras, navegação, construção, etc. No princípio a

representação do espaço baseava-se na observação e descrição do meio. Cabe salientar que alguns historiadores dizem que o homem já fazia mapas antes mesmo de desenvolver a escrita. Com o tempo surgiram técnicas e equipamentos de medição que facilitaram a obtenção de dados para posterior representação. A Topografia foi uma das ferramentas utilizadas para realizar estas medições.

A topografia se caracteriza como forma, configuração ou relevo da superfície da Terra. Além disso, é caracterizada como uma ciência que estuda a superfície do planeta. Vários autores trazem definições diversas sobre a topografia no decorrer dos anos, porém seguindo os mesmos conceitos, já que a diferença que vem surgindo são apenas os meios de coleta de dados mais avançados. A seguir são apresentadas algumas de suas definições:

A topografia tem por objetivo o estudo dos instrumentos e métodos utilizados para obter a representação gráfica de uma porção do terreno sobre a superfície plana. (DOUBEK, 1989).

A topografia tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre. (ESPARTEL, 1987).

McCormac (2010) Também caracteriza a topografia como a ciência que estuda sobre a verificação das dimensões e contornos da superfície física terrestre. Isso por meio de equipamentos que auxiliam nas mensurações de distâncias, ângulos e altitudes. Os mapas topográficos mostram essas informações em conjunto com as feições naturais e artificiais da Terra, como por exemplo, prédios, estradas, rios e florestas.

De acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1991, p. 3), Norma Brasileira para execução de Levantamento Topográfico, o levantamento topográfico é definido por um conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. A estes pontos se relacionam os pontos de detalhe visando a sua exata representação planimétrica numa escala pré-determinada e à sua representação altimétrica por intermédio de curvas de nível, com equidistância também pré-determinada e/ou pontos cotados.

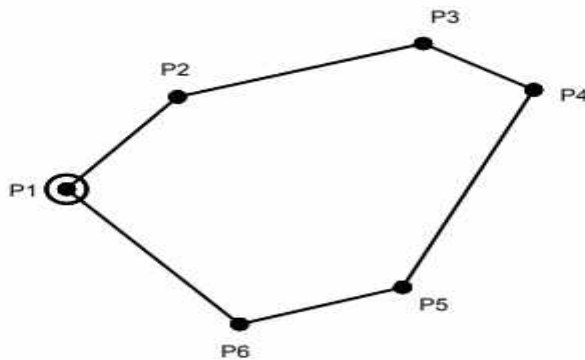
4.2.1. Poligonação

A poligonação é um dos métodos mais utilizados da topografia, onde os pontos de apoio planimétricos são definidos a partir de medidas de ângulos e distâncias, partindo de uma orientação inicial.

Seguindo essa metodologia, Veiga (2012) salienta sobre os três tipos de poligonais utilizadas na realização de um levantamento topográfico pelo método de poligonação: poligonais fechadas, poligonais enquadadas e poligonais abertas.

- A poligonal fechada parte de um ponto com coordenadas conhecidas e finaliza no mesmo ponto. Sua principal vantagem é permitir a verificação de erro de fechamento angular e linear.

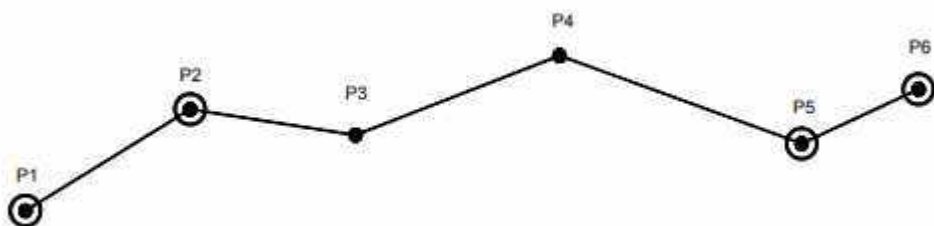
Figura 1 – Poligonal fechada.



Fonte: Adaptado de Veiga (2012).

- A poligonal enquadra parte de dois pontos de coordenadas conhecidas e termina em outros dois pontos de coordenadas conhecidas. Também permite verificação de erro de fechamento angular e linear, além do posterior ajustamento dos pontos componentes desta poligonal.

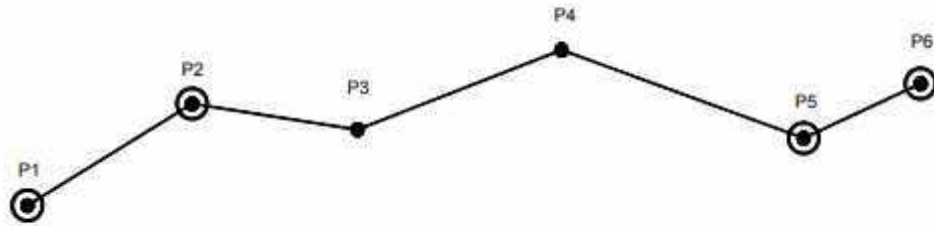
Figura 2 – Poligonal enquadra.



Fonte: Adaptado de Veiga (2012).

- A poligonal aberta parte de um ponto e finaliza em outro ponto. Nesse tipo de poligonal não há controle dos erros de fechamento.

Figura 3 – Poligonal enquadrada.



Fonte: Adaptado de Veiga (2012).

O método de poligonação permite a integração com outros métodos de levantamento, propiciando novas alternativas para a mensuração dos dados. A integração de uma poligonal com o método de irradiações é muito utilizado nesse quesito.

Segundo Castro Junior (1998) o método de irradiações é muito utilizado para levantamentos de pequenas áreas, sendo integrados principalmente a poligonais e outras metodologias. Consiste na obtenção de diversas feições de um ponto onde se estacione o equipamento, podendo esse ponto estar integrado ou não a poligonal principal. Deve-se tomar cuidado em tal levantamento por não haver possibilidade de controle dos pontos levantados, estando este diretamente relacionado à habilidade e cuidado do operador.

Na topografia os parâmetros essenciais a serem levantados são as medidas de ângulos e distâncias, pois as determinações geométricas são obtidas a partir dessas duas informações. Portanto um dos equipamentos mais utilizados para desenvolvimentos de levantamentos topográficos são as estações totais.

4.2.2. Estações Totais

Uma estação total combina dois componentes básicos: um medidor eletrônico de distâncias e um microprocessador, formando um equipamento único. As estações totais podem medir automaticamente ângulos horizontais, verticais e distâncias inclinadas, e

calcular instantaneamente as distâncias horizontais e verticais, e apresentar os resultados em um visor de cristal líquido. Os dados podem ser armazenados em dispositivos do próprio equipamento ou em coletores de dados externos. Os programas internos das estações totais possibilitam uma alta produtividade nos trabalhos de campo e facilidade no manuseio e transmissão de dados (VEIGA, 2012).

Além de medirem os ângulos e as distâncias de forma eletrônica, alguns modelos disponibilizam informações sobre condições de nivelamento da base de apoio, a altura de instalação do instrumento e outras opções. Além da obtenção das grandezas citadas, algumas rotinas internas permitem medir alturas de pontos inacessíveis, calcular a cota da estação com a leitura de pontos conhecidos, áreas de pontos visados e outras (TULER & SARAIVA, 2014).

Estes equipamentos permitem também realizar correções no momento da obtenção das medições ou até realizar uma programação prévia para aplicação automática de determinados parâmetros como: condições ambientais (temperatura e pressão atmosférica) e a constante do prisma. Ainda mais, é possível configurar o instrumento em função das necessidades do levantamento, alterando valores como a altura do instrumento, a altura do refletor, a unidade de medida angular, a unidade de medida de distância (metros, pés) e a origem da medida do ângulo vertical (FAGGION, 2001).

4.3. Fotogrametria

A Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) é uma instituição não-governamental fundada em 1910 na Áustria que se dedica ao desenvolvimento da cooperação internacional e ao avanço da fotogrametria e sensoriamento remoto, assim como as suas aplicações.

A fotogrametria e o sensoriamento remoto é a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens através de sensores e outros, sobre a Terra e o seu meio ambiente, e outros objetos físicos e processos através da gravação, medição, análise e representação. (ISPRS, 2016, p. 2-5).

A fotogrametria de acordo com a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS) se caracteriza como a ciência, arte e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente. Os dados são obtidos

através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante (WOLF, 2000).

De acordo com Jensen (2009), a fotogrametria trabalha com a determinação de medidas sobre registros de luz, isto é, extração de características dos objetos representados nas imagens levantadas. Dados como altura, comprimento, escala, perímetro e até mesmo a área de um objeto, podem ser calculados por meio de uma fotografia. Tommaselli (2003) também salienta sobre a fotogrametria ser uma técnica de mensuração de dados passiva, que utiliza uma câmara fotogramétrica (métrica) ou não métrica para captação da luz visível refletida pelo alvo. Porém, para executar o processo de medição diretamente nas imagens é necessário que o objeto identificado esteja visível em pelo menos duas fotos.

As câmeras métricas podem ser terrestres ou aéreas, mas são mais utilizadas para realização de mapeamentos aerofotogramétricos. Estas câmeras possuem características únicas e são desenvolvidas com a finalidade de utilização em fotogrametria. A principal diferença entre uma câmara fotogramétrica e uma câmara convencional (não métrica) é o rigor na definição dos parâmetros geométricos que regem a câmara. Este rigor proporciona maior exatidão no processo de calibração da câmara, além de diminuir distorções inerentes ao processo de captura da fotografia (COELHO & BRITO, 2007). Segundo Ferreira (2014) as câmaras métricas produzem imagens que permitem cálculos e mensurações mais precisos que as imagens produzidas a partir de câmaras convencionais. Porém, devido ao avanço da tecnologia, técnicas de calibração de câmaras não métricas vêm apresentando resultados muito satisfatórios em relação à precisão dos resultados obtidos.

Coelho e Brito (2007) ainda afirma que fotogrametria é uma tecnologia que executa a reconstrução tridimensional do espaço, denominado de espaço-objeto, utilizando imagens sobrepostas de duas dimensões, sem haver contato físico direto entre sensor e o objeto a ser levantado. Além disso, a fotogrametria é uma técnica para mensuração de dados, aplicada de forma mais rápida e prática que outras técnicas tradicionais. Reduzindo o trabalho de campo no levantamento das coordenadas e necessitando de menos operadores.

O funcionamento da visão humana é um bom exemplo para explicar os princípios da fotogrametria, já que são similares, quando relacionados à visualização tridimensional dos objetos. É através da estereocopia que se consegue ter uma noção de profundidade numa visão binocular. Onde basicamente o cérebro é capaz de definir a distância em função dos ângulos paraláticos, formados por duas linhas imaginárias que partem dos eixos ópticos dos olhos e se cruzam atingindo o objeto, ao fixarmos o olhar a um ponto específico (JENSEN, 2009).

Para se obter uma percepção estereoscópica entre as fotografias, é aconselhado empregar uma sobreposição mínima de 50%. Porém Tommaselli (2003) afirma que as imagens obtidas a partir de um levantamento fotogramétrico, devem possuir um percentual de sobreposição ideal de 60%, para permitir a reconstrução por intersecção. Caso sejam tomadas imagens convergentes este percentual pode ser maior, sem comprometer a qualidade geométrica da intersecção de raios, mas as imagens convergentes são de interpretação automática difícil, em função da distorção geométrica introduzida na forma dos objetos e também não permitem a visualização estereoscópica.

De acordo com Galo (1993), a fotogrametria trabalha com algumas equações matemáticas, a fim de relacionar os elementos observados nas fotografias e no terreno, ou seja, associar as fotocoordenadas de um ponto na imagem, com as coordenadas deste mesmo ponto no terreno. Portanto, para que isso ocorra, é necessário que haja colinearidade entre o centro perspectivo, o ponto na fotografia e no terreno. Devido a isso essas equações são caracterizadas equações de colinearidade (1). Coelho e Brito (2007) acrescentam a ideia de que as equações de colinearidade permitem relacionar os parâmetros de orientação exterior, as fotocoordenadas de um determinado ponto e as coordenadas tridimensionais do mesmo ponto no sistema referencial do terreno ou do espaço-objeto.

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

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$
(1)

Onde:

x, y : coordenadas fotogramétricas;

f : distância focal calibrada;

X, Y, Z : coordenadas do ponto no espaço-objeto;

X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do Centro Perspectivo (CP) no sistema do terreno;

m_{ij} : elementos da matriz de rotação (M).

$$M = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa & -\cos\omega\sin\varphi\cos\kappa + \sin\omega\sin\kappa \\ -\cos\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\sin\varphi\sin\kappa + \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa + \sin\omega\cos\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}$$

Segundo Galo (1993), os ângulos ω (omega), ϕ (phi) e κ (kapa) contidos na matriz rotação, permitem que os sistemas de referência presentes no terreno e na fotografia se tornem paralelos. Esses ângulos retratam respectivamente as características de rotação do plano nos eixos X, Y, Z. Sendo positivo no sentido anti-horário e negativo no sentido horário.

As equações matemáticas de orientação das fotografias são de fundamental importância na extração de dados referentes ao relevo e os objetos que o compõe. Contudo, uma região do terreno fotografada utilizando a estereoscopia, pode ter suas feições visíveis mapeadas. Caracterizando assim, como restituição fotogramétrica, quando se envolve interpretação e extração das feições (MORGADO, 1997).

A fotogrametria pode ser classificada como terrestre, aérea ou orbital, conforme a base utilizada. A fotogrametria terrestre se caracteriza especificamente pela obtenção de imagens tomada da terra (superfície). A fotogrametria aérea consiste num método de obtenção de imagens tomadas a partir de uma plataforma de transporte aérea, como por exemplo, aviões e VANTS (Veículo Aéreo Não Tripulado). Já a fotogrametria orbital ou espacial se caracteriza pela obtenção de imagens através de sensores orbitais, como por exemplo, imagens obtidas por satélites (JENSEN, 2009).

4.3.1. Fotogrametria Aérea

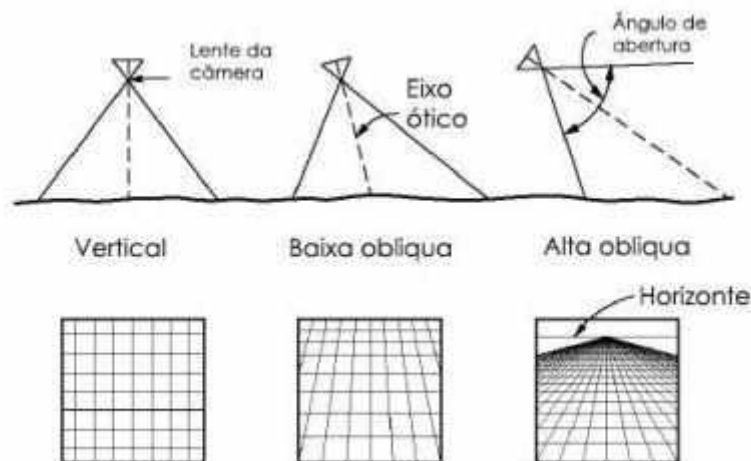
A aerofotogrametria começou a ser utilizada tendo intuito militar. Foi um grande avanço tecnológico que ajudou consideravelmente alguns países nos períodos de guerra. Os equipamentos desenvolvidos tinham como um dos principais objetivos fazer reconhecimentos táticos de diversas áreas, sem a necessidade de pessoas nos locais observados.

Atualmente a fotogrametria aérea vem ganhando espaço no mercado, mas a aquisição de imagens aéreas ainda é muito onerosa, devido aos altos custos dos equipamentos e aos altos custos de operação, isso quando se trata de equipamentos mais sofisticados (FERREIRA, 2014). Segundo Medeiros (2007), uma alternativa que vem sendo muito empregada na realização de mapeamentos aéreos de baixo custo, se dá pela utilização de veículos aéreos não tripulados (ARP). O processo de mensuração das fotografias aéreas segue o mesmo princípio para os diferentes tipos de equipamentos utilizados, sendo eles de alto ou baixo custo.

As imagens aéreas podem ser obtidas com diferentes ângulos relativos ao terreno, isto é, podem ser classificadas de acordo com a inclinação do eixo ótico da câmara em relação ao

solo (figura 1). Para elaboração de produtos cartográficos, normalmente as imagens são obtidas na vertical, tendo o eixo focal orientado perpendicularmente ao horizonte. Há casos em que o eixo da imagem se encontra inclinado em relação ao horizonte, caracterizando-as como oblíquas. Imagens onde o horizonte não é capturado são chamadas de baixa oblíqua e nos casos onde o horizonte é registrado na imagem são chamadas de alta oblíqua (WOLF, 2000).

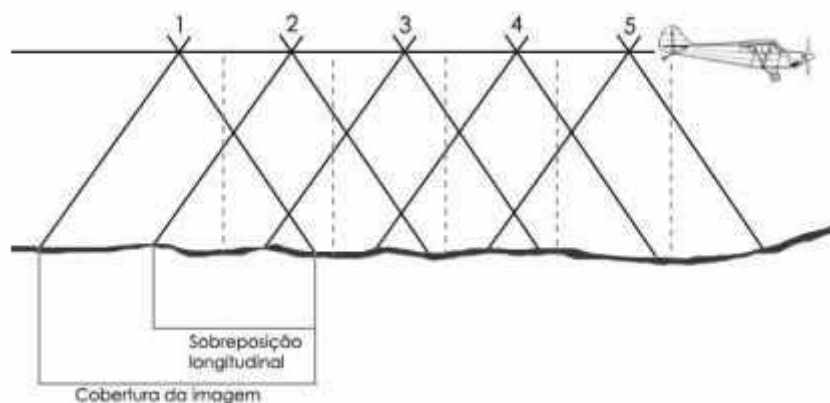
Figura 4 – Tipos de fotografias aéreas de acordo com a inclinação do sensor.



Fonte: Adaptado de Wolf (2000).

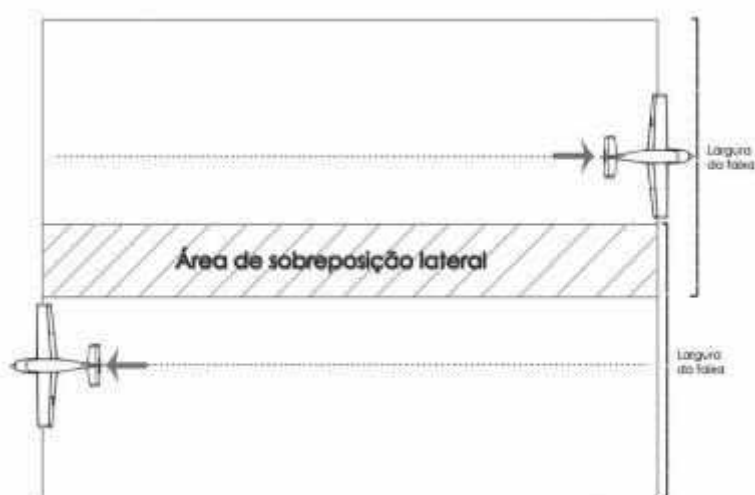
As fotografias aéreas normalmente são capturadas consecutivamente ao longo de linhas de voos paralelas. O recobrimento da área levantada entre as linha de voo é obtido de forma que haja sobreposição longitudinal (figura 2) e sobreposição lateral (figura 3) sobre os pares de imagens, isto para que possa haver estereocopia entre elas. A estereocopia é fundamental para conseguir a visão tridimensional do terreno, já que visa pontos únicos em mais de uma fotografia, por diferentes ângulos. Em levantamentos aéreos os valores das sobreposições longitudinais e laterais variam de acordo com levantamento. Porém é aconselhado que a sobreposição longitudinal não seja inferior a 60% e também que a sobreposição lateral não seja inferior a 30% (FERREIRA, 2014).

Figura 5 – Representação da sobreposição longitudinal.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2014).

Figura 6 – Representação da sobreposição lateral.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2014).

A sobreposição das imagens é um dos elementos fundamentais, que precisa ser estabelecido sobre um planejamento de voo. O plano de voo tem como intuito analisar e consequentemente estabelecer a melhor solução disponível para execução do levantamento fotogramétrico. Segundo Gonçalves (2006), além do fator de sobreposição das imagens, há alguns elementos necessários que precisam ser determinados para a realização do voo. Os elementos são a altitude de voo, o espaço entre duas imagens devidamente tomadas adjuntas e a distância entre as linhas de voo. Coelho e Brito (2007) enfatiza sobre a importância da distância focal, a abertura da câmara e a escala, sendo que estes elementos são definidos em função das características do terreno a ser levantado.

Dispondo dos elementos anteriores, ainda é preciso saber as dimensões da área a ser recoberta, visando determinar o restante dos parâmetros do plano de voo. O cálculo da quantidade de linhas de voo, o número total de fotos e o tempo total que será gasto para realização do aerolevantamento são os parâmetros a serem determinados.

Após a realização do voo, obtêm-se as imagens mensuradas de acordo com os parâmetros estabelecidos. A partir dessas imagens, é gerado o MDT (Modelo digital do Terreno) e o MDS (Modelo Digital de Superfície) da região levantada. O MDT é a representação digital das elevações em uma determinada região quando referidas ao terreno da Terra, sem levar em consideração os objetos contidos na superfície. Já o MDS é a representação digital das elevações de uma região quando consideradas as elevações de superfícies no terreno ou acima dele (WOLF, 2000).

As imagens coletadas e o MDT ou o MDS são a base para a composição de Mosaicos Digitais e Ortofotos. Os mosaicos são construídos a partir de um conjunto de fotografias sobrepostas unidas, a fim de formar um único produto e passar informações de uma determinada área, já que na maioria das vezes apenas uma fotografia não é suficiente para cobrir a área desejada. Os mosaicos aéreos geralmente se dividem em três classes: mosaicos controlados, semicontrolados e não controlados. Os mosaicos controlados são gerados a partir de fotografias corrigidas e retificadas, que são apoiadas a pontos no terreno tendo intuito de restringir as posições das fotos. Os mosaicos não controlados são gerados apenas da união das fotografias (combinando detalhes de uma imagem e suas fotos adjacentes), não havendo controle no solo e nem um processo de correção das imagens. Já os mosaicos semicontrolados são montados utilizando algumas combinações específicas de mosaicos controlados e não controlados. Um mosaico semicontrolado pode ser preparado, por exemplo, utilizando imagens corrigidas, mas sem pontos de controle, ou até mesmo, utilizando imagens sem correção, mas apoiadas ao terreno. O mosaico apoiado é o mais preciso entre os três tipos de mosaicos aéreos. Um tipo especial de mosaico digital é a ortofoto (WOLF, 2000).

Segundo Simmons (2000), ortofotos são imagens aéreas derivadas de um processamento de ortoretificação, que visa corrigir efeitos causados pelas lentes das câmaras, variações na escala da imagem e das respectivas feições, através de dados do relevo da superfície fotografada. As ortofotos têm sido bastante utilizadas em projetos de mapeamento, devido à alta qualidade apresentada, quando comparada com as imagens obtidas a priori, sem haver nenhum tipo de correção. .

4.3.2. ARP

Aeronaves de pequeno porte que tem por característica realizar várias funções (como por exemplo, coleta de dados), não havendo contato físico direto com o alvo, são denominadas ARPs. Essa tecnologia não necessita de um operador embarcado para manuseio, sendo controlada através de meios eletrônicos e computacionais a uma determinada distância (MEDEIROS, 2007).

Popularmente os ARPs são conhecidos como “drones”, mas de acordo com a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), o termo correto a ser utilizado são “aeromodelos”. São caracterizadas como aeromodelos todas as aeronaves não tripuladas com objetivo de lazer, além das “aeronaves remotamente pilotadas (ARPs)” ou “veículos aéreos não tripulados (VANTs)” que visam propósitos comerciais, corporativos e experimentais.

Há algumas normas a serem seguidas quando se trata da realização de voos de VANT. Tais requisitos têm por objetivo viabilizar as operações dos VANT não autônomos (também considerado como Aeronave Remotamente Pilotada - ARP), garantindo que haja segurança para as pessoas. No Brasil, essas normas foram regulamentadas recentemente para uso de operações civis, pela ANAC junto ao DECEA (Departamento de Controle do Espaço) e a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicação). As normas para utilização de ARP variam de acordo com o seu peso máximo no momento da decolagem. É fornecida uma classificação de acordo com o Quadro 1, no qual deve ser considerado os pesos da bateria ou combustível do equipamento e de carga eventualmente transportada. Vale ressaltar também que quanto maior o peso da aeronave, maiores e mais rígidas serão as exigências impostas pela norma (ANAC, 2017).

Quadro 1 – Classificação das ARPs quanto ao Peso Máximo de Decolagem (PMD).

Categorias	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Peso Máximo de Decolagem (PMD)	$PMD > 150 \text{ kg}$	$25 \text{ kg} < PMD \leq 150 \text{ kg}$	$PMD \leq 25 \text{ kg}$

Fonte: Adaptado de ANAC (2017).

A ANAC dispõe de algumas restrições no uso dos ARPs de acordo com cada uma das três classes citadas. São elas:

- Classe 1 – necessita de certificação pela ANAC; do registro no RAB (Registro Aeronáutico Brasileiro); pilotos necessitam de CMA (Certificado Médico Aeronáutico), licença e habilitação; e os voos necessitam de autorização e registro;
- Classe 2 – não há necessidade de certificação pela ANAC; no entanto, o fabricante precisa observar os requisitos técnicos exigidos e ter o projeto aprovado pela agência registro no RAB; pilotos necessitam de CMA, licença e habilitação; e os voos necessitam de autorização e registro;
- Classe 3 – só podem voar até 400 pés (aproximadamente 120 m) do nível do solo, salvo se requerida licença para tal; em áreas urbanas ou aglomerados rurais, a distância máxima passa a ser de somente 200 pés (aproximadamente 60 m); necessitam apenas de cadastros (informações sobre o operador e o equipamento) junto a ANAC; não precisa de CMA ou registro para os voos; tem de ser operados com pelo menos 30 m de distância de uma pessoa (salvo pessoas que concordem expressamente com a operação e/ou estão participando da mesma).

Em se tratando de regras gerais, válidas para todas as três categorias de VANT têm-se que:

- Idade mínima para uso (18 anos);
- Necessidade de um seguro para danos a terceiros;
- Atividades ilícitas ou ainda de invasão de privacidade serão tratadas pelas autoridades de segurança pública competentes;
- Defesa Civil e órgão de segurança pública podem utilizar tais equipamentos em quaisquer áreas, ficando eventuais ocorrências sobre suas responsabilidades, desde que sejam observadas as demais exigências, por exceção do seguro para danos a terceiros.

No caso de infrações ou não cumprimento das normas, o Código Brasileiro de Aeronáutica estabelece algumas penalizações ao responsável. Deve-se salientar que as

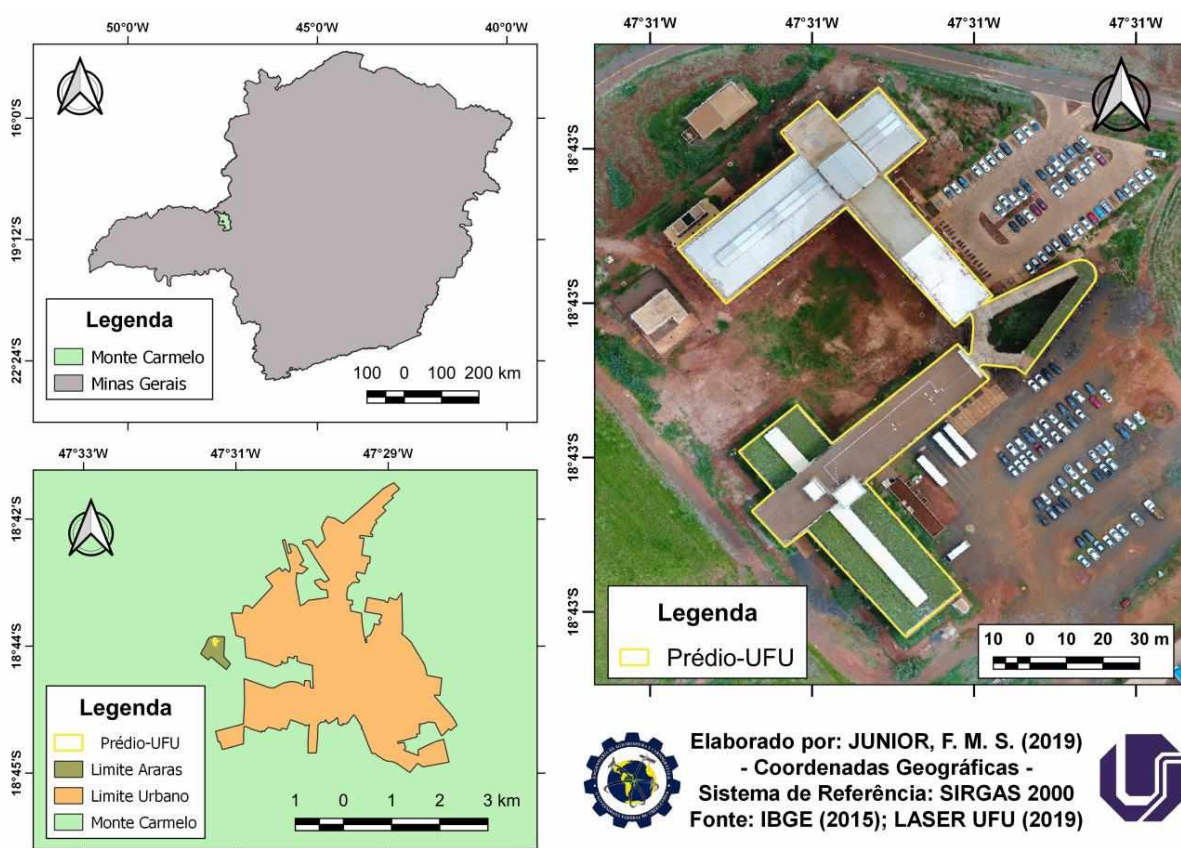
infrações são tratadas como contravenção penal ou crime, desde que apuradas administrativamente (ANAC, 2017).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Área de estudo

A área escolhida para realização do estudo está localizada dentro da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, que se localiza próxima à região urbana da cidade, nas imediações da rodovia LMG – 746, km 1.

Figura 7 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: O autor.

5.2. Material

O trabalho a ser realizado consiste na realização do levantamento aerofotogramétrico, na realização do levantamento topográfico para apoio e consequentemente no processamento e análise dos dados obtidos. A seguir são apresentados os materiais necessários para execução do trabalho.

Materiais utilizados na etapa de planejamento:

- Notebook LG S 460, Intel Core i3, 4GB RAM, HD 320GB e sistema operacional Windows 8.1, 64 bits;
- Celular SAMSUNG A5, 2GB RAM e 32GB memória interna, processador 1.3GHz Quad-Core;
- Software Google Earth para a vetorização da estrutura a ser levantada;
- Software DroneDeploy para elaboração do plano de voo;

Materiais que serão utilizados na etapa do levantamento topográfico (varredura laser):

- Estação total LEICA (Modelo TS06);
- Tripé para estação;
- Dois bipés;
- Um par de prismas;
- Um par de bastões;
- Trena;

Materiais que serão utilizados na etapa do levantamento aerofotogramétrico:

- Drone Phantom 4 Advanced, com câmara acoplada, modelo FC6310S e focal de 8.8 mm;
- Alvos coloridos para pré sinalização dos pontos de apoio;

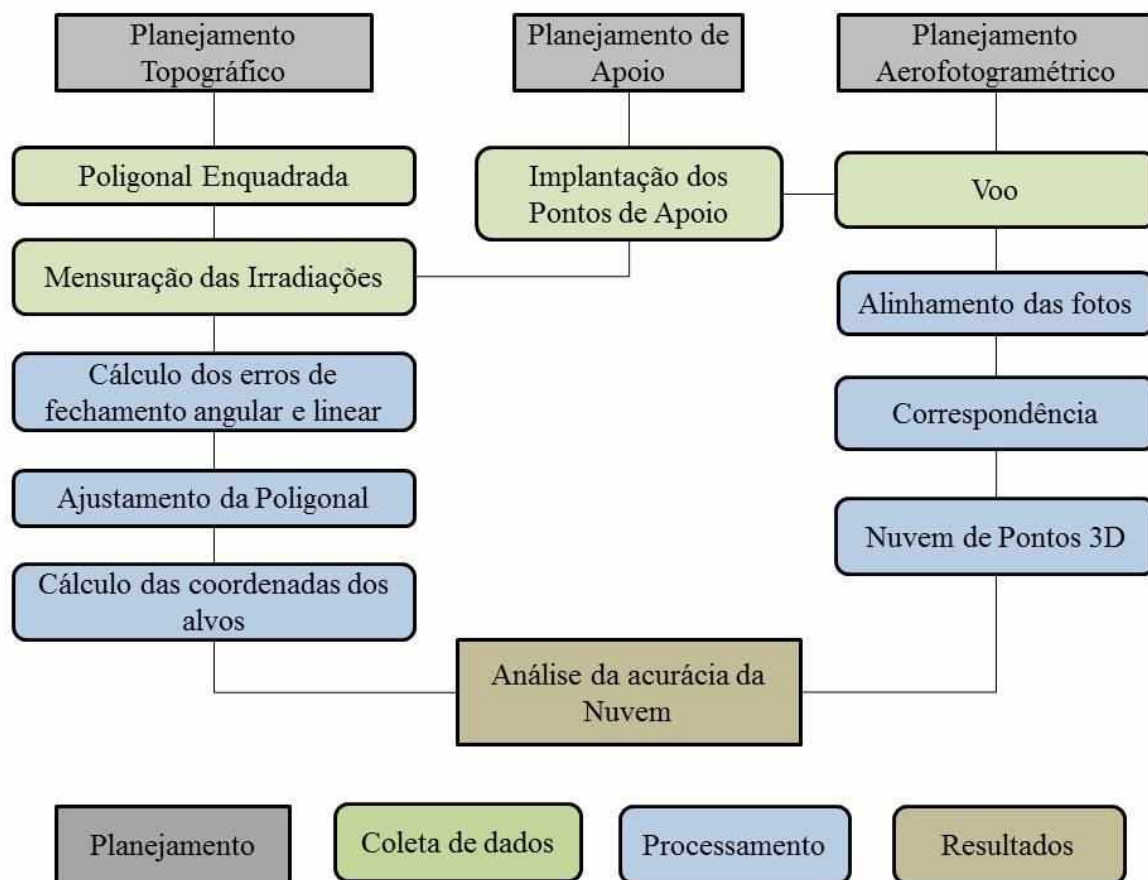
Materiais que serão utilizados na etapa do processamento e análise dos dados:

- Notebook LG S 460, Intel Core i3, 4GB RAM, HD 320GB e sistema operacional Windows 8.1, 64 bits;
- *Software* AgiSoft;
- *Software* QGIS (versão 3.6);
- *Software* DataGeosisDemo;
- *Software* MapGeo 2015;
- *Software* Excel;
- *Software* DJI GO 4;

5.3. Métodos

A etapa metodológica de um projeto é essencial para compreensão e planejamento do trabalho a ser desenvolvido. A Figura 8 demonstra o fluxograma criado para transmitir as informações sobre o processo que foi realizado no decorrer do projeto, de forma sucinta e ilustrativa. As etapas foram divididas em 4 seções de trabalho: planejamento, coleta dos dados, processamento dos dados e resultados.

Figura 8 – Fluxograma metodológico.



Fonte: O autor.

5.3.1. Levantamento aerofotogramétrico

5.3.1.1. Planejamento de voo

Para realização de um levantamento aéreo é essencial fazer um estudo e a elaboração de um plano de voo. Isso para que o trabalho seja realizado com maior eficácia. Como neste trabalho é fundamental a identificação dos centros dos pontos de apoio implantados, foi necessário realizar diversos planejamentos de voo e consequentemente realizar diversos voos testes até atingir um bom produto.

Vários voos foram realizados automaticamente visando a reconstituição das fachadas definidas para o estudo, porém a geometria da estrutura mensurada dificultou a tomada das fotos de interesse. A Figura 9 mostra a área em que se realizou o voo.

Figura 9 – Croqui da área de realização do voo.



Fonte: O autor.

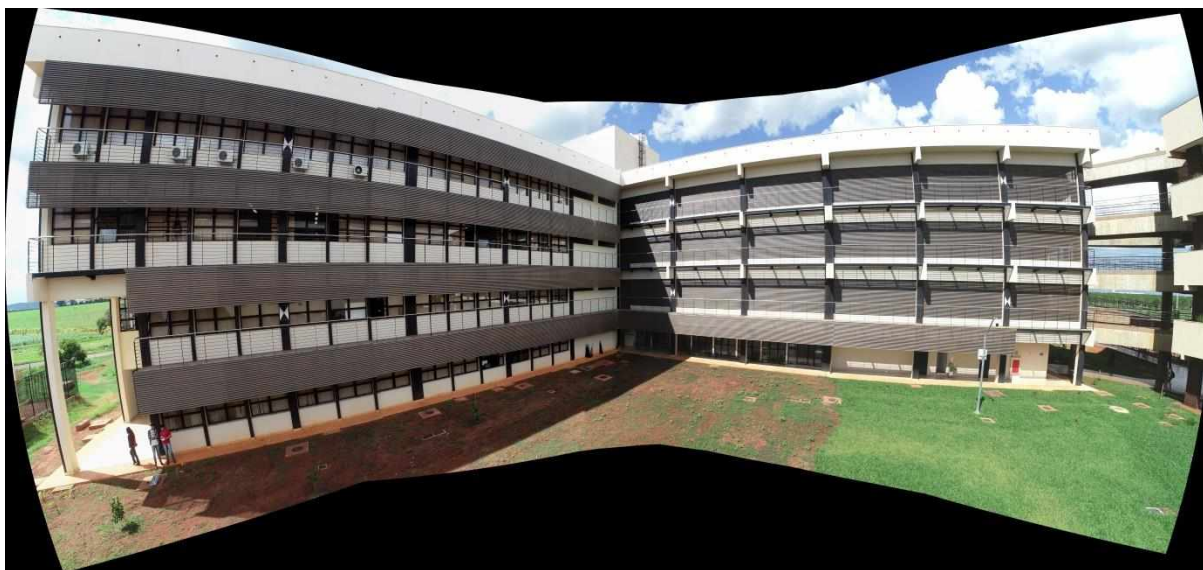
A solução encontrada foi a realização de voos manuais, através do software DJI GO4. Seguindo essa metodologia, as fotografias foram coletadas de modo que se tivesse uma alta sobreposição, visando por completas as duas fachadas escolhidas para o desenvolvimento do trabalho. Como a fachada do prédio é alta e tem um grande comprimento, as imagens foram coletadas de diferentes níveis de altitudes. Contudo, para cada altitude, foi se percorrendo a área fazendo linhas de voo paralelas, tendo assim imagens de vários ângulos e posições diferentes.

5.3.1.2. Pontos de apoio

Um fator importante para a aquisição de dados com boa qualidade na aerofotogrametria está ligado diretamente ao se apoiar as fotografias coletadas através do voo com pontos mensurados na superfície alvejada.

Neste trabalho, os pontos de apoio foram instalados em duas faces do prédio seguindo uma homogeneidade no quesito de posição e distâncias entre eles. Isso para que se diminua os erros sobre os cálculos realizados. A Figura 10 mostra a distribuição dos pontos de apoio nas duas faces do prédio da UFU.

Figura 10 – Distribuição dos pontos de apoio nas faces estudadas.



Fonte: O autor.

Os pontos foram mensurados através do método de irradiação, que consiste em unir um ponto onde fica locado o equipamento topográfico a todos os vértices da superfície a ser levantada, a fim de se obter suas respectivas coordenadas.

Especificamente nesse estudo, os pontos irradiados foram os centros dos alvos. Tais pontos foram apoiados a uma poligonal enquadrada.

Os pontos foram levantados através de topografia convencional pelo motivo de que os alvos foram instalados em partes da estrutura do prédio, onde seria inviável coletar informações com um receptor GNSS.

5.3.2. Levantamento topográfico

Fez-se necessário um levantamento topográfico para cálculo das coordenadas dos pontos de alvos dispostos nas duas faces do prédio alvejado.

A priori foi criada uma poligonal do tipo enquadrada para apoio na mensuração das irradiações. Escolheu-se coletar os pontos através de uma poligonal enquadrada, já que esse tipo de poligonal apresenta uma grande precisão. Isso porque parte de dois pontos de coordenadas conhecidas e termina em outros dois pontos de coordenadas conhecidas. Também permite verificação de erro de fechamento angular e linear.

Como há vários pontos com coordenadas conhecidas implantados em torno da área de interesse, não houve dificuldade para definição dos quatro pontos e nem necessidade de implantação de outros pontos.

Um ponto estratégico da poligonal foi definido de forma que a partir dele conseguiu-se fazer as irradiações de todos os alvos dispostos pelas duas faces do prédio. Assim simplificando o trabalho de coleta dos dados.

A Figura 11 mostra a poligonal criada. Ela tem início nos marcos M09 e M10, de coordenadas – UTM (E) 233787.747; UTM (N) 7927898.086 e UTM (E) 233746.645; UTM (N) 7927868.949 respectivamente. Seu término ocorre nos marcos P06 e M08, de coordenadas – UTM (E) 233712.826; UTM (N) 7927814.044 e UTM (E) 233695.963; UTM (N) 7927778.375 respectivamente.

Figura 11 – Croqui da poligonal enquadrada utilizada para apoio das irradiações.



Fonte: O autor.

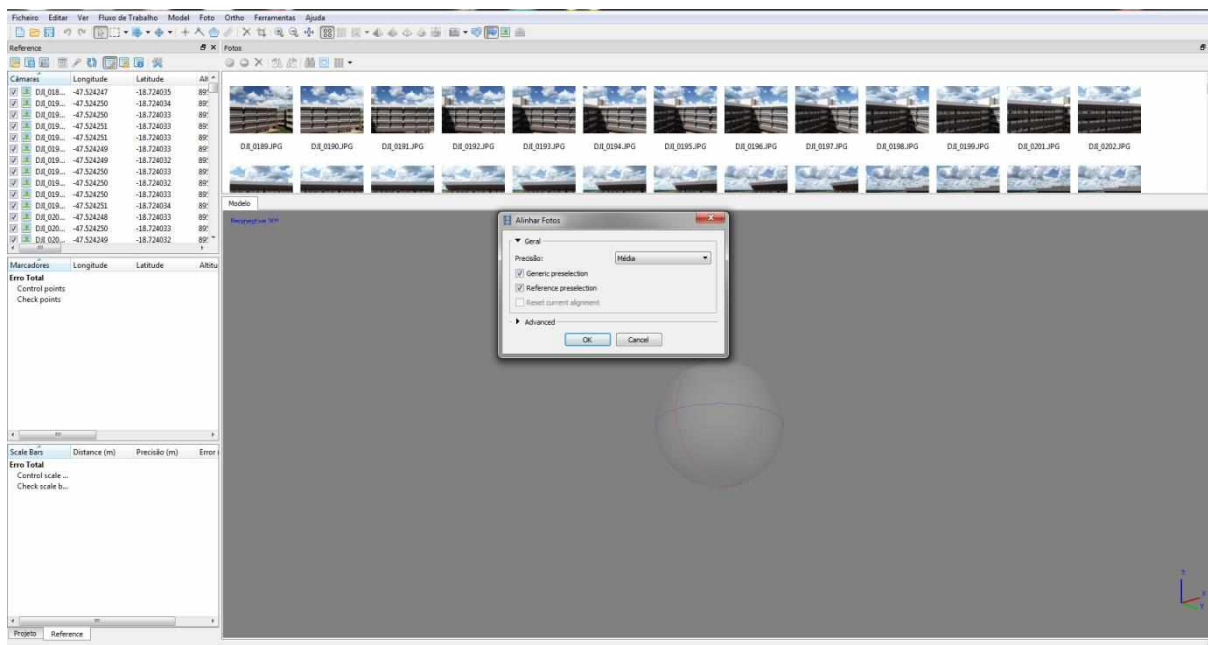
5.3.4. Processamento dos dados

O processamento dos dados foi realizado após ocorrer os processos de levantamento de campo, pois é através desses levantamentos, que se fez a mensuração dos dados necessários para desenvolvimento do projeto.

Esta etapa engloba a composição da nuvem de pontos fotogramétrica, a realização dos cálculos das coordenadas e distâncias de acordo com os dados mensurados por topografia convencional e também a análise da precisão entre as coordenadas até então calculadas e as coordenadas obtidas diretamente pela nuvem de pontos.

A realização dos processos de composição da nuvem de pontos foram feitos através do *software* AgiSoft. Primeiramente inseriu-se as imagens referentes ao voo e alinhou-as de acordo com suas respectivas posições na superfície. Isso foi feito através da ferramenta ‘Alinhar Fotos’, onde foi escolhida a qualidade da nuvem (a qualidade média apresentou uma melhor textura pós processamento). A Figura 12 mostra esse processo.

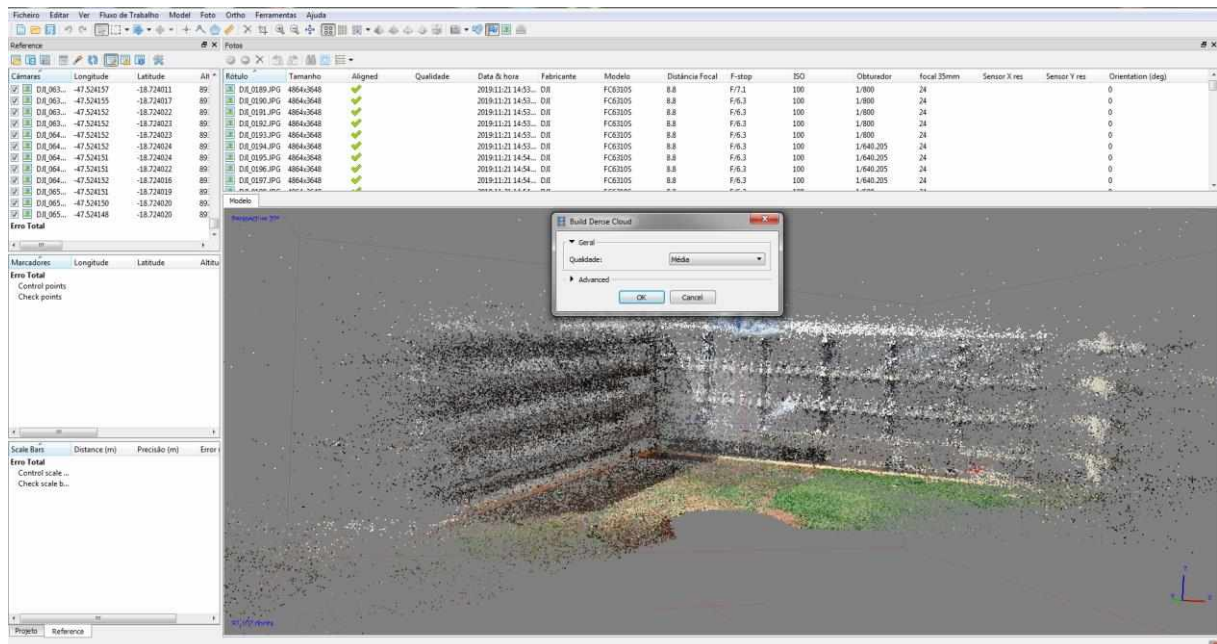
Figura 12 – Alinhamento das fotos.



Fonte: O autor.

A partir do alinhamento das fotos, foi feito a densificação da nuvem gerada por tal alinhamento, através da ferramenta ‘*Build Dense Cloud*’, como mostra a Figura 13. A nuvem gerada a partir desta etapa consiste na nuvem final que será analisada seguidamente.

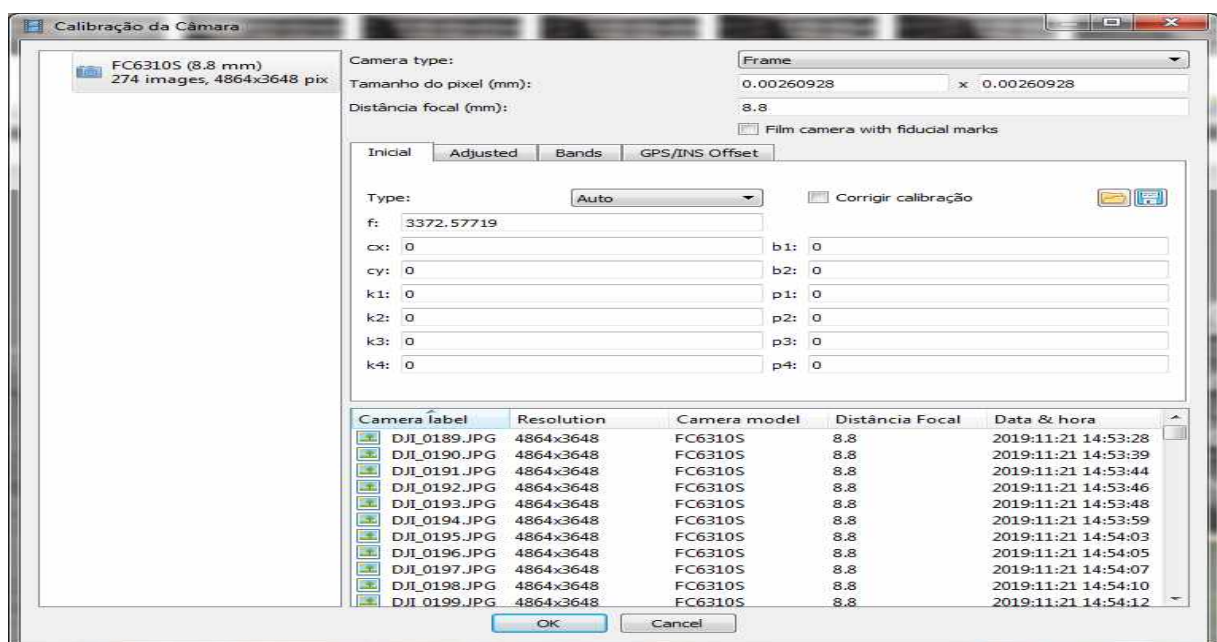
Figura 13 – Densificação da nuvem de pontos.



Fonte: O autor.

Um fator importante que vale ressaltar é sobre a calibração da câmera, realizada pelo próprio *software* automaticamente, ao solicitar algum processamento. A Figura 14 mostra os parâmetros iniciais antes da calibração.

Figura 14 – Parâmetros iniciais da câmera.



Fonte: O autor.

Consequentemente, a partir da nuvem de pontos densa, foi realizado o cálculo das distâncias entre os alvos instalados nas duas faces do prédio, visando a comparação com as distâncias calculadas através das coordenadas encontradas pelo processamento dos dados topográficos. A Figura 12 mostra a realização dos cálculos dessas medidas também pelo *software* Agisoft.

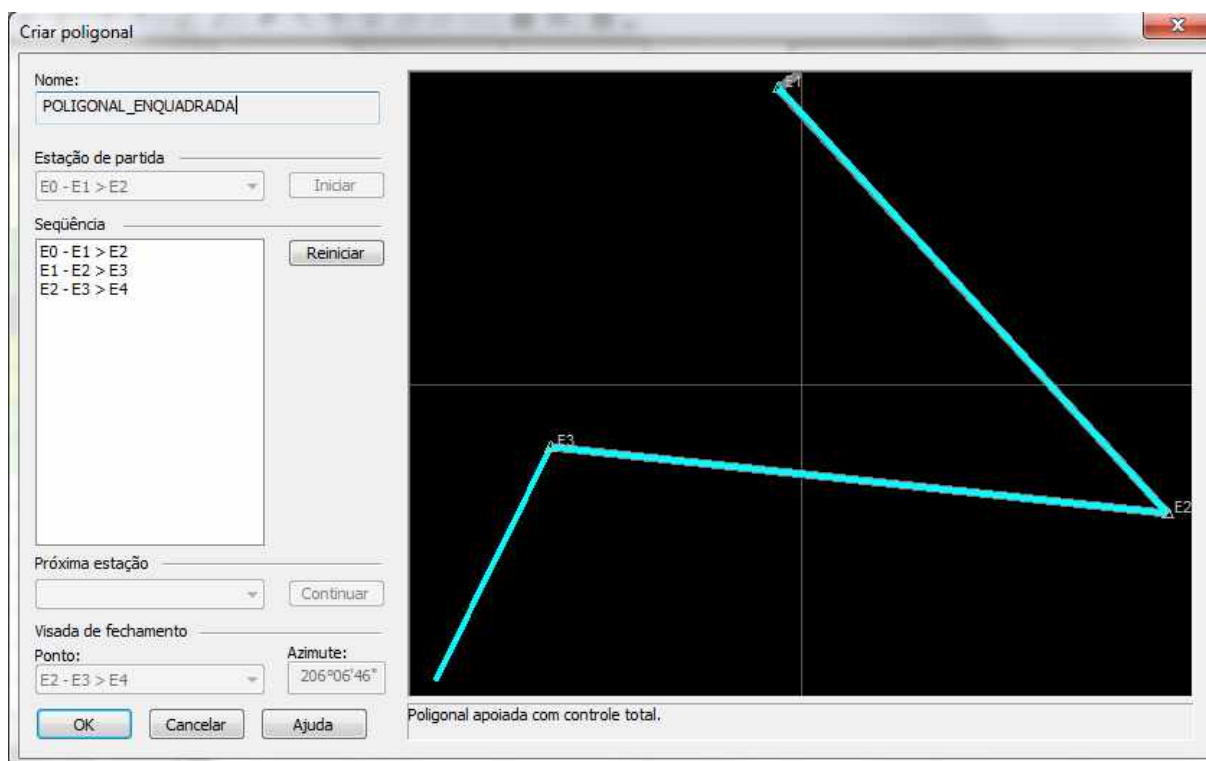
Figura 15 – Medição de distância entre dois pontos.



Fonte: O autor.

Já todo o processamento, criação e ajustamento da poligonal mensurada em campo, foi realizado através do *software* DataGeosis. Tendo como intuito principal a verificação dos erros angular e linear e consequentemente o cálculo das coordenadas das irradiações. Isso, levando em consideração que a poligonal de apoio estava dentro dos limites de erros. A Figura 13 mostra o desenho da poligonal criada e o caminhamento percorrido pelo operador.

Figura 16 – Poligonal e caminhamento criados no *software* DataGeosis.



Fonte: O autor.

Depois da realização do processamento da nuvem, da poligonal e dos cálculos das irradiações, foi feita a comparação entre as distâncias obtidas através das coordenadas calculadas por topografia e as distâncias medidas diretamente na nuvem de pontos. Tendo como foco a verificação da variação entre elas. Foi utilizado o *software* Excel para calcular essa variação.

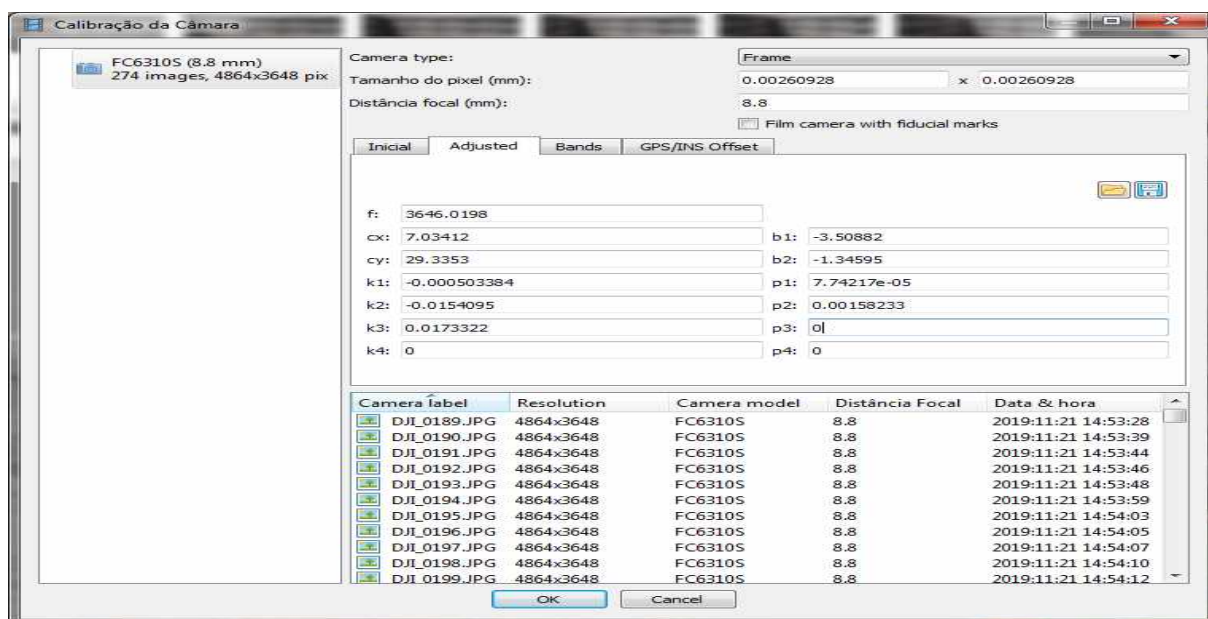
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Calibração da câmera

Na parte de calibração e ajustamento da câmera, o software associa um modelo específico, para realização desses processos, à uma projeção central da câmera. As distorções não lineares são modeladas usando o modelo de distorção de Brown.

O modelo da câmera especifica a transformação das coordenadas do ponto no sistema de coordenadas da câmera local, para as coordenadas de pixel do quadro da imagem. A Figura 17 mostra os parâmetros calibrados e ajustados através do Agisoft.

Figura 17 – Parâmetros da câmera calibrados e ajustados.



Fonte: O autor.

O sistema de coordenadas da câmera local tem origem no centro de projeção da câmera. Se tratando do modelo 3 D, o eixo Z aponta para a direção de visualização, o eixo X aponta para a direita e o eixo Y aponta para baixo. As coordenadas das imagens são medidas em pixels. A tabela 3 abaixo mostra os erros médios de localização da câmera.

Tabela 1 – Erro médio de localização da câmera.

Descrição	Erro (metros)
X - Longitude	0,638124
Y - Latitude	0,963288
Z - Altitude	0,875955
Plano (X,Y)	1,15548
Tridimensional (X,Y,Z)	1,44997

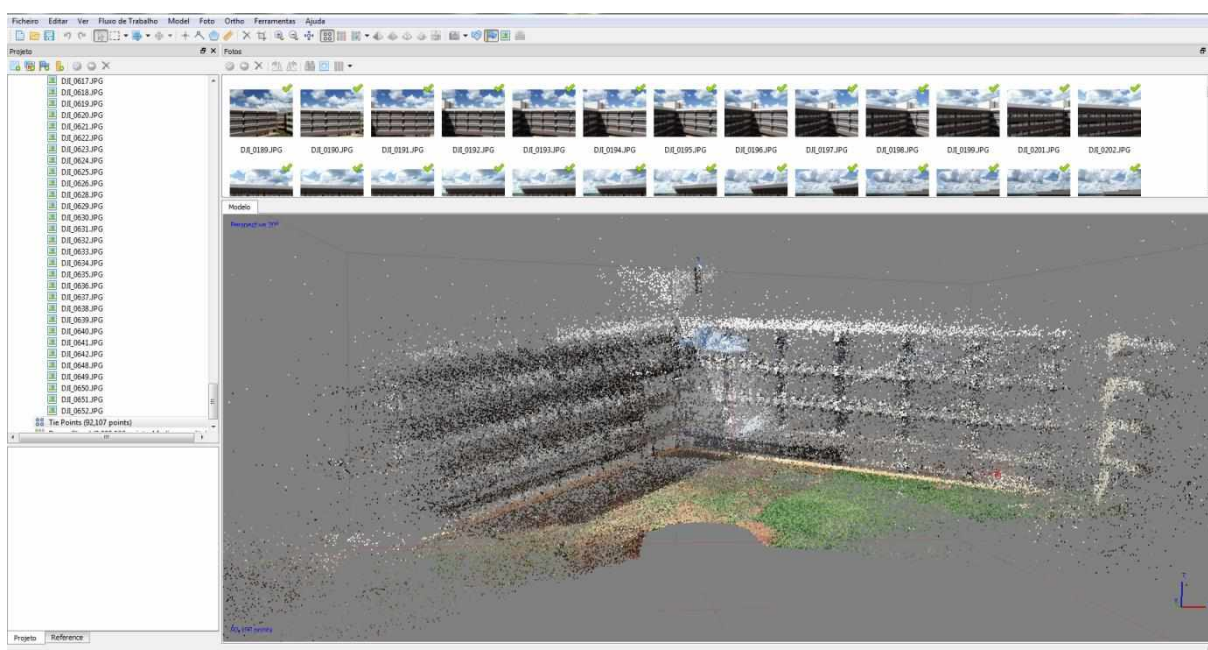
Fonte: O autor.

6.1. Geração da nuvem de pontos 3D

A nuvem de pontos foi gerada a partir de 274 imagens coletadas de diversos ângulos e posições. Os pontos de interesse foram identificados, porém houve distorções de textura em algumas partes da nuvem. Um provável fator que explica essas distorções é o pequeno espaço em que o ARP teve que operar, dificultando a tomada correta das fotografias em alguns lugares.

Após a inserção das fotografias no *software* Agisoft, a primeira etapa realizada para produção da nuvem de pontos final, se dá pelo alinhamento dessas imagens. Nessa etapa o *software* identifica e alinha cada imagem coletada a sua posição correta referente ao terreno (de acordo com os dados de orientação das imagens). A Figura mostra a nuvem de pontos a priori, gerada apenas pelo alinhamento das fotos, contendo 92 107 pontos.

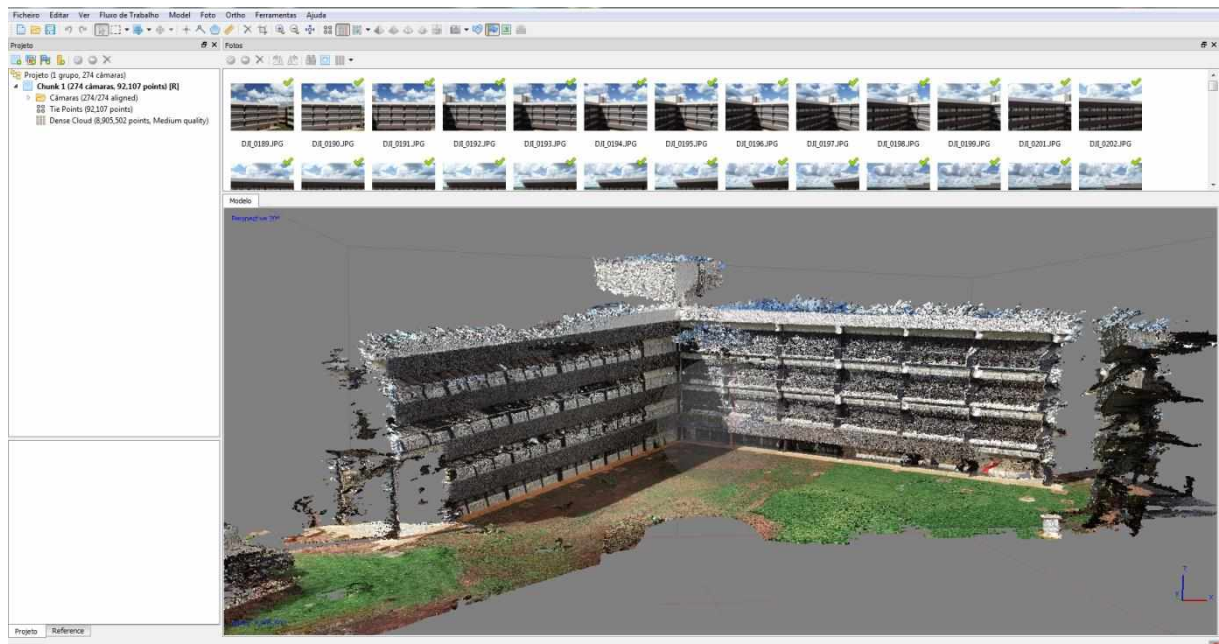
Figura 18 – Nuvem gerada a partir do alinhamento das fotografias.



Fonte: O autor.

A segunda etapa levou à composição da nuvem de pontos final, que será analisada neste trabalho. Nesta etapa o *software* gerou uma nuvem de pontos densa, a partir da nuvem de pontos gerada a priori pelo alinhamento das fotos. O número de pontos contidos na nova nuvem formada passa a ser de 8 905 502 pontos. A Figura 15 mostra a nuvem gerada após o processo de densificação.

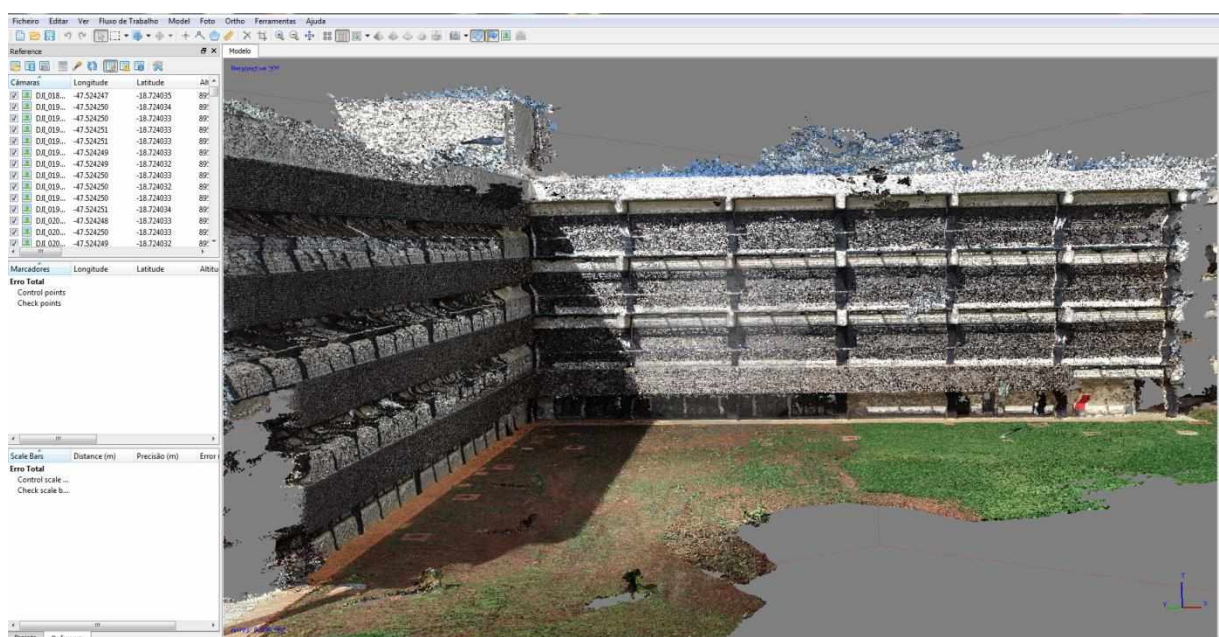
Figura 19 – Nuvem gerada após o processo de densificação.



Fonte: O autor.

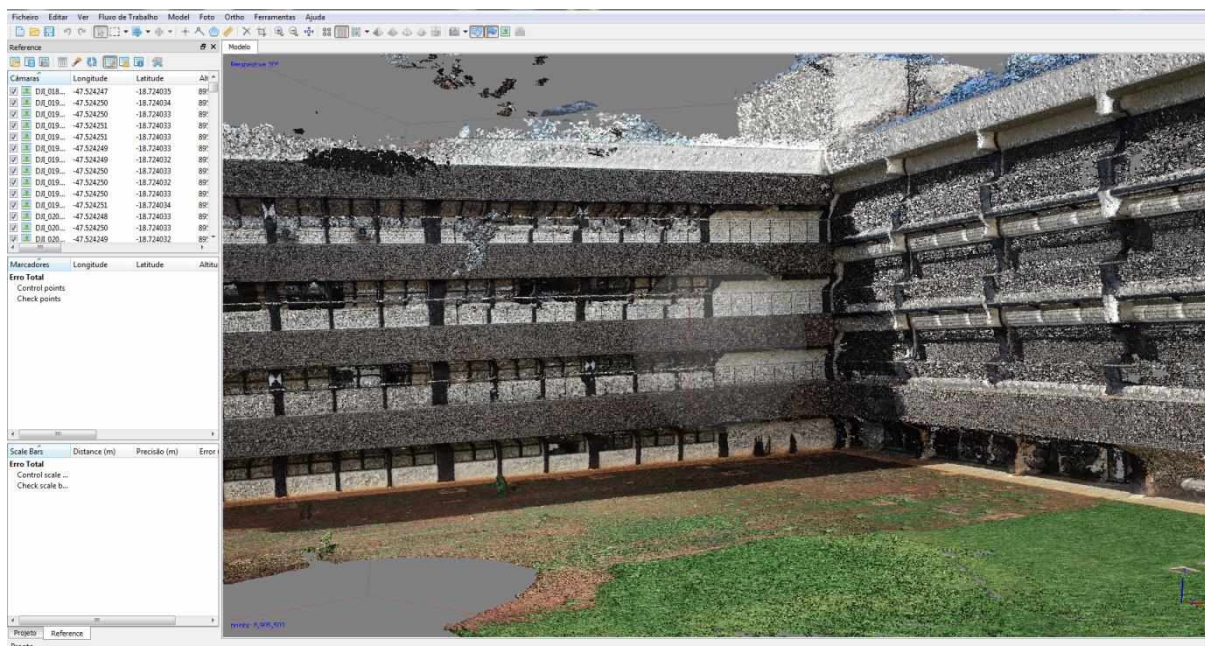
A Figura 16 e a Figura 17 também mostram a nuvem de pontos densificada (em diferentes ângulos), que foi utilizada na realização das análises e comparações.

Figura 20 – Nuvem de pontos gerada através da aerofotogrametria.



Fonte: O autor.

Figura 21 – Nuvem de pontos gerada através da aerofotogrametria.

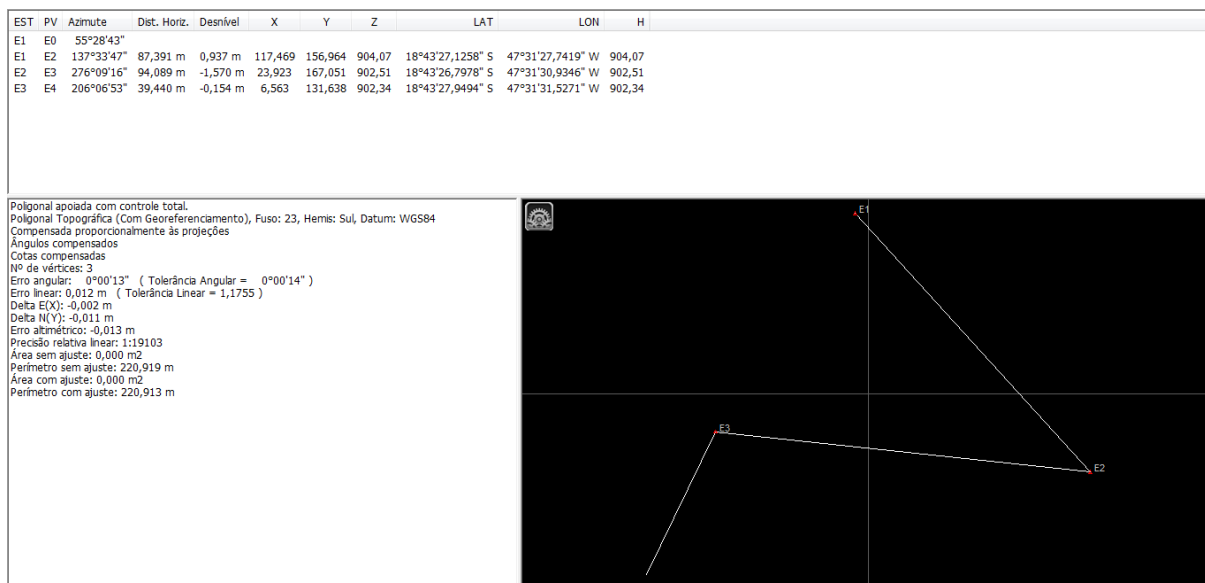


Fonte: O autor.

6.2. Cálculo e ajustamento da poligonal principal e das irradiações

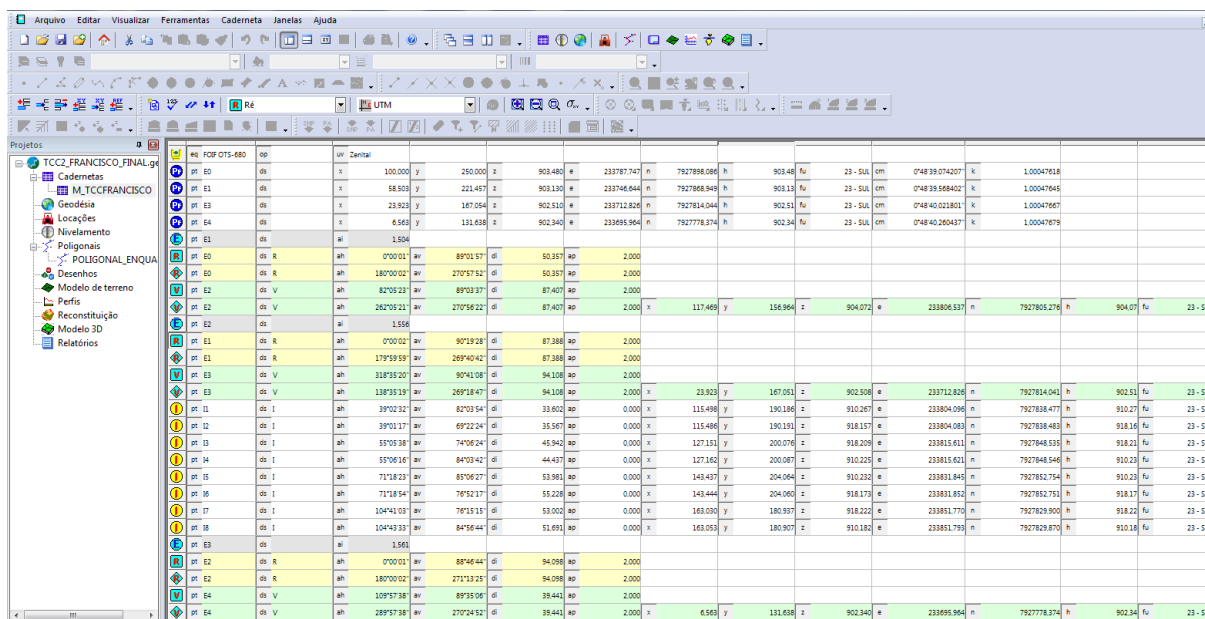
A poligonal enquadrada criada para apoio das irradiações e cálculo das coordenadas se estabeleceu dentro da precisão. O limite dos erros é estabelecido de acordo com o número de vértices (estacionadas com o equipamento) e a precisão que o equipamento utilizado oferece (qual o erro oferecido pela estação a cada coleta). O *software* Datageosis calcula e estabelece o limite dos erros. A Figura 16 traz os resultados do processamento da poligonal principal, os valores dos erros calculados e as coordenadas dos vértices da poligonal depois de ajustada. O ajustamento também foi feito pelo *software* Datageosis pelo método de projeções. A opção de ajustamento da poligonal é dada, depois de verificar se a poligonal atente a precisão necessária. Já a Figura 17 e a Figura 18 trazem os dados do levantamento de campo e os resultados das coordenadas dos pontos de apoio também ajustadas conforme a poligonal principal.

Figura 22 – Dados referentes à poligonal principal depois do ajustamento.



Fonte: O autor.

Figura 23 – Dados coletados em campo e irradiações calculadas.



Fonte: O autor.

Figura 24 – Irradiações calculadas e ajustadas.

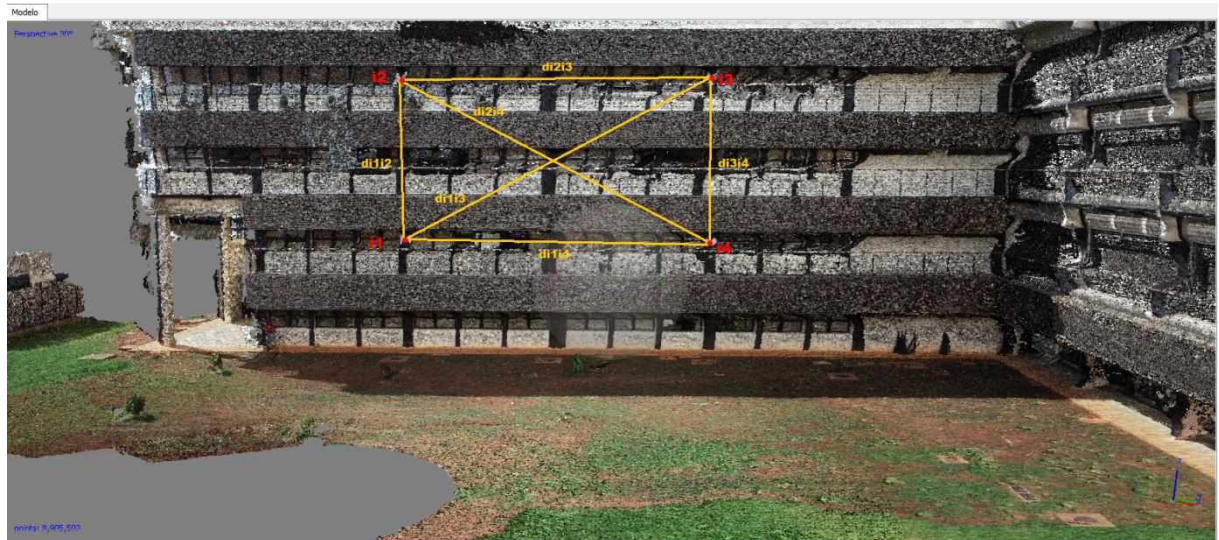
pt 11	ds 1	ah 39°02'32"	av 82°03'54"	di 33,602	ap 0,000	x 115,498	y 190,186	z 910,267	e 233804,096	n 7927838,477	h 910,27	fu 23 - SUL
pt 12	ds 1	ah 39°01'17"	av 69°22'24"	di 35,567	ap 0,000	x 115,486	y 190,191	z 918,157	e 233804,083	n 7927838,483	h 918,16	fu 23 - SUL
pt 13	ds 1	ah 55°05'38"	av 74°06'24"	di 45,942	ap 0,000	x 127,151	y 200,076	z 918,209	e 233815,611	n 7927848,535	h 918,21	fu 23 - SUL
pt 14	ds 1	ah 55°06'16"	av 84°03'42"	di 44,437	ap 0,000	x 127,162	y 200,087	z 910,225	e 233815,621	n 7927848,546	h 910,23	fu 23 - SUL
pt 15	ds 1	ah 71°18'23"	av 85°06'27"	di 53,981	ap 0,000	x 143,437	y 204,064	z 910,232	e 233831,845	n 7927852,754	h 910,23	fu 23 - SUL
pt 16	ds 1	ah 71°18'54"	av 76°52'17"	di 55,228	ap 0,000	x 143,444	y 204,060	z 918,173	e 233831,852	n 7927852,751	h 918,17	fu 23 - SUL
pt 17	ds 1	ah 104°41'03"	av 76°15'15"	di 53,002	ap 0,000	x 163,030	y 180,937	z 918,222	e 233851,770	n 7927829,900	h 918,22	fu 23 - SUL
pt 18	ds 1	ah 104°43'33"	av 84°56'44"	di 51,691	ap 0,000	x 163,053	y 180,907	z 910,182	e 233851,793	n 7927829,870	h 910,18	fu 23 - SUL

Fonte: O autor.

6.3. Análise da variação das distâncias entre alvos

Os pontos observados foram distribuídos de forma a formar retângulos sobre as duas faces estudadas. As medidas de distâncias comparadas foram determinadas através de geometria analítica (por meio das coordenadas calculadas) e por medições de forma direta na nuvem pelo *software* Agisoft. A Figura 19 e a Figura 20 mostram a distribuição dos pontos e as referentes distâncias entre eles. Já a Tabela 1 trás as devidas distâncias e a diferença entre os dois métodos de coleta.

Figura 25 – Distribuição dos alvos e as respectivas distâncias entre eles.



Fonte: O autor.

Figura 26 – Distribuição dos alvos e as respectivas distâncias entre eles.



Fonte: O autor.

Tabela 2 – Diferença entre as distâncias.

Descrição	Dist_topografia	Dist_Nuvem	Diferença
I1i2	7,89	7,46	0,43
I3i4	7,98	7,43	0,55
I1i4	15,3	14,6	0,7
I2i3	15,295	14,5	0,795
I1i3	15,289	16,1	-0,811
I2i4	15,389	16	-0,691
I5i6	7,94	7,47	0,47
I7i8	8,04	7,5	0,54
I5i8	30,35	29	1,35
I6i7	30,31	28,8	1,51
I6i8	30,35	29,9	0,45
I5i7	30,32	29,7	0,62

Fonte: O autor.

A diferença sobre os dois métodos utilizados na definição das distâncias entre os pontos de interesse variou de 0,43 metros a 1,51 metros. Tendo assim uma média de variação

de 0,49275 metros e um RQEMQ (Raiz quadrada do erro médio quadrático) de aproximadamente 0,81 metros. Alguns fatores contribuíram de forma direta nos erros apresentados. No dia de realização do voo o vento estava forte e consequentemente atrapalhou a estabilidade do ARP utilizado. Além disso, como o voo foi feito manualmente sobre uma área muito pequena, não se conseguiu ter certa regularidade na coleta das imagens, podendo também este fator ter influência nos erros. O RQEMQ não foi tão alto tendo em vista as condições de coleta das informações. Porém para trabalhos específicos de modelagem de estrutura já é um valor bastante considerável.

6.4. Análise da variação das coordenadas dos alvos

Foi feito também a comparação entre as coordenadas dos pontos de interesse visando analisar suas variações. A Tabela 2 mostra a diferença entre as três coordenadas do sistema tridimensional.

Tabela 3 – Diferença entre as coordenadas.

Diferença em X	Diferença em Y	Diferença em Z
0,894	1,257	2,51
0,57	0,772	2,902
1,984	1,755	1,168
2,012	0,535	0,747
3,657	-0,475	-0,859
4,237	0,235	0,695
3,642	-2,294	0,663
1,316	-2,048	-0,173

Fonte: O autor.

Em média a maior variação ocorreu sobre as coordenadas do eixo X. Analisando separadamente se observa uma grande discrepância entre as coordenadas, chegando à uma variação de menos de 0,20 metros no eixo Z (altitude) e a mais de 4 metros no eixo X. O RQEMQ no eixo X foi de aproximadamente 2,63 metros, no eixo Y de 1,38 metros e no eixo Z de 1,51 metros. Tais valores foram bem altos e todas as diferenças entre as coordenadas

tridimensionais dos alvos apresentaram resultados bem acima do que se espera quando se trabalha com modelagem de estruturas. O ponto que houve uma maior variação na questão tridimensional (x, y, z) foi o ponto sete. A Figura 21 mostra a posição deste ponto específico na nuvem e a direção em que foi deslocado.

Figura 27 – Demonstração da direção em que o ponto foi deslocado.



Fonte: O autor.

Porém além dos fatores que contribuíram para o acúmulo de erros citados acima, nos cálculos da variação das distâncias, ainda deve-se salientar nesse caso, sobre a precisão das coordenadas obtidas diretamente pelo sistema GPS embarcado no ARP, que não é necessariamente boa para determinados tipos de trabalhos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem de estrutura trabalha visando dois aspectos, sendo eles um modelo preciso em relação às coordenadas e um modelo bem estruturado geometricamente. Para cada trabalho específico há uma análise a se fazer e se considerar.

O trabalho teve como intuito avaliar a precisão da nuvem de pontos a priori, sem um robusto georreferenciamento, em relação a alguns pontos de apoio que foram coletados por topografia convencional. Ocorreu uma grande variação entre os dados comparados, não sendo viável a utilização dessa metodologia nas condições enfrentadas. Salientando as dificuldades

encontradas no levantamento aerofotogramétrico e a precisão fornecida pelo GPS integrado no ARP.

Geometricamente, a nuvem de pontos apresentou bons resultados, mesmo havendo distorções em algumas partes. Provavelmente essas distorções estão ligadas à dificuldade de coleta das fotos em várias posições.

Como o intuito do trabalho é fazer uma análise trazendo conceitos de modelagem de estrutura nas condições apresentadas, houve-se um grande aprendizado conceitual e técnico agregado durante todo o processo.

Um fator muito importante para o bom desenvolvimento de um trabalho como esse é o planejamento constante e os testes para atingir uma grande eficácia.

Surge como proposta para trabalhos futuros, a comparação e análise entre dados aerofotogramétricos e topográficos, seguindo os conceitos apresentados, porém fazendo a utilização de um robusto georreferenciamento dos dados coletados por ARP. Além disso, trabalhar em condições mais favoráveis para não atrapalhar os resultados do projeto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13133: **Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. 35p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL(ANAC). Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017. **Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil**. Brasília, DF, 2017.
- ANDRADE, H. J. L. F. **Varredura a laser aplicada na reconstrução 3D de bens materiais do patrimônio histórico de Igarassu e Olinda**. 101p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- CASTRO JUNIOR, R. M. **Topografia**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo: Centro tecnológico – Laboratório de Topografia e Cartografia, 1998.
- CENTENO, J. S.; WUTKE, J. D.; KERSTING, A. P. B. **Comparação de Geração de Modelos Tridimensionais Usando Laser Scanner Terrestre e Restituição Fotogramétrica Monocular**. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - SIMGEO, 2004, Recife, v. 1.
- COELHO FILHO, L.C.T. & BRITO, J. L. N.S. **Fotogrametria Digital**. Editora da Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- CORTÊS, M. A.; AMORIM, A. L. **Restituição fotogramétrica digital das fachadas do Pelourinho, Salvador-Bahia, Brasil..** In: SIGRADI 2007: Congresso Iberoamericano de Gráfica Digital, set, 2007, Lima - Peru. Anais. Lima: Universidade Peruana de Ciências Aplicadas.
- DOUBECK, A. **Topografia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1989.
- ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. 9 ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987.
- FAGGION, P. L. **Obtenção dos Elementos de Calibração e Certificação de Medidores Eletrônicos de Distância em Campo e Laboratório**. Curitiba, 134p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2001.
- FERNANDES, S. D. F. **Levantamento e Diagnóstico Estrutural com recuso a fotogrametria**. 153p. Dissertação (Mestrado) – Ciclo de Estudos Integrados ao grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2016.
- FERREIRA, A. M. R. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado-vant, para uso em aerolevanteamento**. 93p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Brasília, 2014.
- GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. 151p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

GONÇALVES, G. R. **Elementos da fotogrametria analítica**. Departamento de Matemática da FCTUC, Coimbra, 2006.

ISPRS, 2016. **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, 2010, p. 2–5.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007..

McCORMAC, J. C. **Topografia**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MORGADO, A. M. **Fotogrametria Digital – Automatização da orientação de imagens digitais**. Publicação do Instituto Português de Cartografia e Cadastro. Lisboa, n. 6, p. 03-11, jun, 1997.

OLIVEIRA, M. M. **A Documentação como Ferramenta de Preservação da Memória**. Brasília, DF: IPHAN / Programa Monumenta, 2008. 144 p.

OSELLO, A.; RINAUDO, F. **3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage**. STYLIANIDIS, E.; REMONDINO (Ed). Published by Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK. 2016.

SIMMONS, G. Orthophoto data: what is it? **GeoEurope Magazine**, Godmanchester, UK. n. 6, p. 38-40, jun, 2000.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância**. Geodésia Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, abr, 2003.

TULER, M; SARAIVA, S. **Fundamentos da Topografia**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

VEIGA, L. A. K; ZANETTI, M. A; FAGGION, P. L. **Fundamentos de topografia**. Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná. Curitiba: 2012.

WOLF, P.; DEWITT, B.; Wilkinson, B. **Elements of Photogrammetry**: with applications in GIS (Vol. 3). New York: McGraw-Hill. 2000.

WEHR, A.; LOHR, U. **Airborne laserscanning-an introduction and overview**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 1999.

**ANEXO A – PLANILHA CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DAS DISTÂNCIAS
(EXEL)**

dist_topografia	dist_nuvem		Diferença	D^2	
7,89	7,46		0,43	0,1849	
7,98	7,43		0,55	0,3025	
15,3	14,6		0,7	0,49	
15,295	14,5		0,795	0,632025	
15,289	16,1		-0,811	0,657721	
15,309	16		-0,691	0,477481	
7,94	7,47		0,47	0,2209	
8,04	7,5		0,54	0,2916	
30,35	29		1,35	1,8225	
30,31	28,8		1,51	2,2801	
30,35	29,9		0,45	0,2025	
30,32	29,7		0,62	0,3844	
		media	0,49275	0,662219	
		RQEMQ		0,813768	

**ANEXO B – PLANILHA CÁLCULO DAS VARIAÇÕES DAS
COORDENADAS (EXEL)**

[illegible]