



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**ESTIMATIVA DO VOLUME DE UM MACIÇO ROCHOSO PARA A LAVRA DE
ROCHAS ORNAMENTAIS UTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA**

DANILO DE VILHENA AYRES RODRIGUES

OURO PRETO - MG

Agosto de 2021

DANILO DE VILHENA AYRES RODRIGUES

**ESTIMATIVA DO VOLUME DE UM MACIÇO ROCHOSO PARA A LAVRA DE
ROCHAS ORNAMENTAIS UTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de Concentração:** Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro
(*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO - MG

Agosto de 2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696e Rodrigues, Danilo de Vilhena Ayres.

Estimativa do volume de um maciço rochoso para a lavra de rochas ornamentais utilizando aerofotogrametria. [manuscrito] / Danilo de Vilhena Ayres Rodrigues. - 2021.

86 f.

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Pesquisa mineral. 2. Rochas ornamentais. 3. Sensoriamento remoto. 4. Aerofotogrametria. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.1:528.715

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e seis dias do mês de agosto de 2021, às 09h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente Danilo de Vilhena Ayres Rodrigues, intitulado: "ESTIMATIVA DO VOLUME DE UM MACIÇO ROCHOSO PARA A LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS UTILIZANDO AEROFOTOGRAMETRIA", perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Elton Destro, Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza e Eng.º de Minas João Pedro Corona Gava. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º de Minas João Pedro Corona Gava, segundo o Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza e, por último, o Prof. Dr. Elton Destro. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 9,0 (nove vírgula zero), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 26 de agosto de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Elton Destro

Membro: Prof. Dr. Felipe Ribeiro Souza

Membro: Eng.º de Minas João Pedro Corona Gava

Discente: Danilo de Vilhena Ayres Rodrigues

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças e sabedoria para chegar até este momento.

Agradeço ao meu pai Carlos por todo apoio. Agradeço a minha mãe Daniela por todo amor e carinho. Agradeço aos meus avós Cidinha e Jair por toda ajuda e orações. Agradeço, também, a todos os familiares e amigos que de alguma forma contribuíram com essa realização.

À Escola de Minas e UFOP por proporcionarem um ensino gratuito e de extrema qualidade. Ao Professor Doutor José Margarida da Silva pela grande ajuda em diversos momentos nesta caminhada. Agradeço imensamente ao Professor Doutor Elton Destro pela orientação.

À Geostone Engenharia e projetos pela oportunidade de aprender e crescer profissionalmente. Ao Marney Juno de Borgonha por me ajudar diversas vezes nessa caminhada final.

A República Alcatéia pelo acolhimento, pela contribuição com meu desenvolvimento pessoal e por tornar esta fase tão memorável.

Muito obrigado.

RESUMO

O crescimento do setor de rochas ornamentais no Brasil tem exigido cada vez mais das empresas a utilização de novas tecnologias de exploração mineral para que se torne viável o desenvolvimento do empreendimento, cumprindo todas as exigências legais e mercadológicas do setor. Para que se cumpra essas exigências legais, muitas vezes se faz necessário a realização do cálculo do volume como, por exemplo, da pilha de estéril, volume da frente de lavra e volume de rocha aflorante. Atualmente, pode-se destacar a fotogrametria digital para a realização destes serviços, já que esta é uma ciência que tem como objetivo principal a reconstrução de um espaço tridimensional real em ambiente computacional, trazendo seus resultados em formas de mapas bidimensionais e modelos tridimensionais georreferenciados. Desta maneira, torna-se possível a realização de medições do ambiente real a partir de ferramentas computacionais. Além disso, nos últimos anos houve uma consolidação da utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) além do desenvolvimento de câmeras e sensores específicos para a realização dos mais diversos projetos de engenharia, fomentando e democratizando a realização de levantamentos fotogramétricos aéreos (aerofotogrametria). Neste contexto, esta pesquisa propôs a utilização da aerofotogrametria para estimar o volume de um maciço rochoso, trazendo um estudo representativo para a lavra de rochas ornamentais. Assim, foi possível fazer uma análise de técnicas aerofotogramétricas, ou seja, discorrer sobre o levantamento aéreo, aquisição das imagens, processamento dos dados, produtos fotogramétricos gerados e o cálculo do volume do maciço, além da criação de um material que possa ser utilizado como suporte para demais projetos na área de aerofotogrametria.

Palavras-chave: Rochas ornamentais, Exploração mineral, Volume de maciços rochosos, Aerofotogrametria

ABSTRACT

The growth of the ornamental stone sector in Brazil has increasingly demanded from companies the use of new mineral exploration technologies so that the development of the enterprise becomes viable, fulfilling all legal and market requirements of the sector. In order to comply with these legal requirements, it is often necessary to calculate the volume of some structures in the mine, such as the waste rock pile, mine front volume, and outcropping rock volume, among others. Currently, digital photogrammetry can be highlighted to perform these services, since this is a science, whose main objective is the reconstruction of a real three-dimensional space in a computational environment, bringing its results in the form of two-dimensional maps and three-dimensional georeferenced models. In this way, it is possible to carry out measurements of the real environment using computational tools. In addition, in recent years there has been a consolidation of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), in addition to the development of specific cameras and sensors to carry out the most diverse engineering projects, fostering and democratizing the performance of aerial photogrammetric surveys (aerophotogrammetry). In this context, this research proposed the use of aerophotogrammetry to estimate the volume of a rock masses, bringing a representative study for ornamental rocks mining. Thus, it was possible to make an analysis of aerophotogrammetric techniques, that is, to discuss the aerial survey, image acquisition, data processing, photogrammetric products generated and the calculation of the mass volume, in addition to the creation of a material that can be used as support for other projects in aerophotogrammetry.

Keywords: Ornamental stones, Mineral exploration, Volume of rock masses, Aerophotogrammetry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pirâmide quadrangular demonstrando imagens tomadas com eixo óptico da câmara verticalizado em relação ao plano da base da pirâmide.....	24
Figura 2: Configurações da onda eletromagnética constituída por uma onda elétrica senoidal (E) e uma onda magnética senoidal (M).....	25
Figura 3: Espectro Eletromagnético.	26
Figura 4: Reflexão especular.	26
Figura 5: Reflexão difusa.	27
Figura 6: Princípio Básico da Câmara Escura.	28
Figura 7: Esboço de câmara fotogramétrica.	29
Figura 8: Distribuição matricial equivalente a um conjunto de pixels.	32
Figura 9: Parâmetros do voo fotogramétrico.	34
Figura 10: Esquema demonstrativo dos principais componentes da RPA DJI Phantom 4 Pro.	38
Figura 11: Representação de sobreposição das imagens de um levantamento aéreo.	40
Figura 12: Imagem base para cálculo de altura de voo para determinado GSD.	41
Figura 13: Imagem ilustrativa do funcionamento do GNSS RTK.	45
Figura 14: Imagem ilustrativa do equipamento GNSS RTK.....	45
Figura 15: Mapa de localização da área de estudo.	51
Figura 16: Imagem de satélite da área de estudo.....	51
Figura 17: Imagem de satélite com área de interesse hachurada.....	52
Figura 18: Área de decolagem e pouso hachurada.	53
Figura 19: Interface de configuração de voo do Drone Deploy.	54
Figura 20: Interface das configurações avançadas de voo do Drone Deploy.....	55
Figura 21: Drone utilizado para o levantamento aéreo.	56
Figura 22: Parâmetros utilizados para o alinhamento das fotos.	57
Figura 23: Parâmetros utilizados para a construção da nuvem densa de pontos.	58
Figura 24: Parâmetros utilizados para construção da malha triangular.....	58
Figura 25: Parâmetros para construção da textura.....	59
Figura 26: Parâmetros para construção do DEM.....	59
Figura 27: Parâmetros para construção da ortofotomosaico.	60
Figura 28: Delimitação da área de interesse para cálculo do volume.	61
Figura 29: Opções para cálculo de volume a partir do DEM ou Ortofotomosaico.	62
Figura 30: Plano base para cálculo de volume.	62
Figura 31: Classificação da área de interesse na nuvem densa de pontos.	64
Figura 32: Corte da nuvem densa de pontos classificada.	64
Figura 33: Malha triangular formada pela nuvem de pontos cortada.....	64
Figura 34: Modelo tridimensional da área de interesse.	65
Figura 35: Malha triangular preenchida com pirâmides.....	65
Figura 36: Bloco sólido, vista superior.....	65

Figura 37: Bloco sólido, vista inferior.....	66
Figura 38: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 39''; Longitude = 43° 33' 24''; Altitude = 1374,81 m.....	67
Figura 39: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 35''; Longitude = 43° 33' 25''; Altitude = 1374,91 m.....	68
Figura 40: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 34''; Longitude = 43° 33' 22''; Altitude = 1375,01 m.....	68
Figura 41: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 32''; Longitude = 43° 33' 22''; Altitude = 1375,11 m.....	69
Figura 42: Nuvem esparsa de pontos.....	70
Figura 43: Nuvem densa de pontos.	71
Figura 44: Corte da nuvem densa de pontos com aproximação para visualização dos pontos.	71
Figura 45: Malha triangular.....	72
Figura 46: Corte malha triangular com aproximação para visualização dos triângulos.	72
Figura 47: Modelo sólido.	73
Figura 48: Modelo sombreado.....	73
Figura 49: Modelo texturizado vista superior.....	74
Figura 50: Modelo texturizado vista frontal.....	74
Figura 51: Modelo texturizado vista frontal com aproximação.	74
Figura 52: Modelo Digital de Elevação.....	75
Figura 53: Mosaico de ortofoto.	76
Figura 54: Posicionamento e sobreposição das imagens.....	77
Figura 55: Posicionamento e erro estimado	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Erro médio de posicionamento da câmera.....	78
Tabela 2: Resultados encontrados pelo método best fit plane.....	78
Tabela 3: Resultados encontrados pelo método mean level.	78
Tabela 4: Resultados encontrados pelo custom level.	78
Tabela 5: Resultados encontrados pelo cálculo através do modelo 3D.....	79

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

VANT: Veículo Aéreo Não Tripulado

ANM: Agência Nacional de Mineração

MDE: Modelo Digital de Elevação

DEM: *Digital Elevation Model*

MDT: Modelos Digitais do Terreno

MDS: Modelos Digitais da Superfície

ISPRS: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

CCD: *Charge-Coupled Device*

SFM: *Structure From Motion*

MVS: *Movement View Stereo*

RPA: *Remotely-Piloted Aircraft* / Aeronave Pilotada Remotamente

PMD: Peso Máximo de Decolagem

ANATEL: Agência Nacional de Telecomunicações

ANAC: Agência Nacional de Aviação Civil

DECEA: Departamento de Controle do Espaço Aéreo

GSD: *Ground Sample Distance*

GPS: *Global Positioning System*

GNSS: *Global Navigation Satellite System*

RTK: *Real Time Kinematic*

SIRGAS: Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

v: Velocidade de Onda

λ : Comprimento de Onda

f_1 : Frequência

f: Distância Focal

i: Distância-imagem

o: Distância-objeto

Exp: Exposição

S: Brilho da Cena

d: Diâmetro da Abertura da Lente

t: Tempo de Exposição

E: Escala de Voo

h: Altitude da Câmera

h_m: Altitude Média do Terreno

H: Altura de Voo

S_w: Largura Real do Sensor

F_R: Distância Focal Real

D_w: Distância Percorrida no Solo por uma Imagem na Direção da Largura

ImW: Largura da Imagem

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	xi
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Legislação Minerária	18
Plano de Aproveitamento Econômico.....	20
3.2 Fotogrametria.....	21
3.3 História da Fotogrametria	22
3.4 Aerofotogrametria.....	23
3.5 Princípios Básicos da Fotogrametria	23
3.5.1 Paralaxe Estereoscópica	23
3.5.2 Radiação Eletromagnética.....	24
3.5.3 Câmara Fotográfica	27
3.5.4 Câmaras Fotogramétricas	29
3.5.5 Imagens Digitais.....	30
3.5.6 Características dos levantamentos Aéreos	33
3.5.7 Structure From Motion.....	35
3.5.8 Fototriangulação.....	35
3.6 Projeto de levantamento aéreo	36
3.6.1 Classificação das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs).....	36
3.6.2 Regularização das Aeronaves Remotamente Pilotadas.....	37
3.6.3 Parâmetros para Elaboração do Plano de Voo	37
3.6.4 Overlap.....	39
3.6.5 Cálculo do Plano de Voo.....	40
3.6.6 Tempo ou Duração de Voo	43

3.6.7	Aplicativos para planos de voo	43
3.7	GNSS RTK	44
3.8	Produtos Gerados Pelo Processamento de Imagens	46
3.8.1	Modelo 3D.....	46
3.8.2	Modelo Digital de Terreno	47
3.8.3	Ortofoto e ortofotomosaico	47
3.9	Sistemas Geodésicos de Referência.....	48
4.	METODOLOGIA	50
4.1	Área de estudo	50
4.2	Levantamento Aéreo.....	52
4.3	Processamento das imagens.....	56
4.4	Estimativa do volume	60
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Levantamento aéreo	67
5.2	Processamento das Imagens.....	70
Relatório do processamento	76	
5.3	Estimativa do volume	78
6.	CONCLUSÕES	82
Sugestões de trabalhos futuros.....	82	
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

A mineração representa uma das atividades econômicas com maior destaque no setor produtivo do Brasil. A utilização de recursos minerais no Brasil está ligada com sua própria história, ou seja, desde o período colonial a exploração destes bens se faz presente. Assim, observa-se que a mineração é de suma importância para o Brasil e contribui significativamente para o desenvolvimento socioeconômico do país.

No setor minerário brasileiro, uma das áreas que vem se destacando é a de produção de rochas ornamentais. Segundo Filho e Kistemann (2014), a partir da década de 1990, o Brasil contou com um notável crescimento das atividades em todos os seguimentos da cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais e de revestimento. O aumento das exportações foi o principal gatilho para os avanços no setor, proporcionando grande evolução qualitativa e quantitativa da indústria de rochas ornamentais. Com a grande evolução das exportações principalmente para os EUA e China, o Brasil chega a posição de quarto maior produtor e exportador mundial de rochas ornamentais e de revestimento no ano de 2006. Neste ponto, o Brasil superou diversos *players* europeus tradicionais (FILHO; KISTEMANN, 2014).

O crescimento do setor de rocha ornamental no Brasil é notável, no entanto, o desenvolvimento de um empreendimento mineiro demanda o cumprimento de uma série de exigências legais e mercadológicas.

Segundo Silva (2014), as rochas ornamentais devem prioritariamente seguir o regime de concessão de lavra. O aproveitamento de substâncias minerais por este regime segue a regra geral do Código de Mineração, ou seja, o primeiro a protocolizar o Requerimento de Autorização de Pesquisa junto a ANM terá o Direito de Prioridade. Durante o prazo de vigência do Alvará de Pesquisa, o titular do alvará pode requerer a ANM uma Guia de Utilização, para poder explorar provisoriamente uma determinada tonelagem do bem mineral existente na área (SILVA, 2014).

Para obtenção da portaria de lavra é necessário que se cumpram diversas exigências, entre as quais listam-se: a realização de plantas e/ou mapas, fotografias e imagens demonstrando a situação atual da mina, cartas planialtimétricas, modelos digitais de terreno e imagens digitais aéreas com alta resolução, cálculo de áreas e volumes das principais estruturas da mina (maciço rochoso, frente de lavra, pilha de estéril, diques de contenção de finos entre outros), topografia da mina, além do cálculo da relação estéril/minério devem ser apresentados a ANM. Esses trabalhos permitem regularização perante as exigências da

ANM, além de dar suporte para determinação da viabilidade econômica do empreendimento mineiro e contribuir para aumento dos lucros e vida útil da mina.

De acordo com Dalmolin (2018), é possível considerar a fotogrametria com VANTS como sendo uma alternativa eficiente e de baixo custo para levantamentos topográficos, trazendo resultados com padrão de exatidão cartográfica Classe A. Além disso, segundo Barbosa *et al.* (2021), o uso de Drones tem-se destacado no campo da fotogrametria, possibilitando a produção de modelos digitais de terreno de maneira rápida em comparação a técnicas de topografia tradicionais que utilizam estação total. Com os modelos digitais de terreno e modelos tridimensionais gerados pela fotogrametria torna-se possível fazer medições como área e volume das estruturas reais a partir de ferramentas computacionais e que, segundo Bruch *et al.* (2019), trazem resultados tão precisos quanto os métodos tradicionais da topografia e cartografia.

Desta maneira, pode-se destacar a aerofotogrametria georreferenciada para realização das exigências citadas anteriormente. O levantamento aerofotogramétrico é feito com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), sendo este equipamento capaz de produzir imagens fotográficas de alta resolução parcialmente sobrepostas de uma estrutura. Este tipo de levantamento garante a obtenção de dados de forma minuciosa, rápida e atualizada sobre a lavra com custos menores. Proporciona ainda, acesso facilitado a áreas complexas e criação de modelos 3D e modelos digitais de terreno que traduzem o máximo de detalhes possível da estrutura real em ambiente computacional, permitindo análise e mensuração de dados não perceptíveis nas inspeções visuais.

Portanto, a proposta deste trabalho é de execução de um levantamento aerofotogramétrico em uma área que seja representativa a um ambiente de mina de rocha ornamental sendo, assim, possível estimar o volume do maciço rochoso presente na área de estudo selecionada e, por fim, avaliar a técnica de aerofotogrametria para estes tipos de trabalhos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi utilizar a técnica de aerofotogrametria para o cálculo de volume de um maciço rochoso.

2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- I. Selecionar uma área geográfica que viabilize formas de comparação com o ambiente de uma mina de rocha ornamental;
- II. Realizar o levantamento aerofotogramétrico da área de estudo;
- III. Apresentar o modelo 3D, o Modelo Digital de Elevação e a ortofotomosaico;
- IV. Calcular o volume do maciço rochoso na área de estudo;
- V. Fazer uma revisão bibliográfica e implementar uma metodologia que possam ser utilizadas como material didático-pedagógico para os alunos do curso de Engenharia de Minas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento de um empreendimento mineiro demanda-se o cumprimento de uma série de exigências legais e mercadológicas. Além disso, levantamento aerofotogramétrico deve seguir muitas etapas que carecem de estar cientificamente embasadas. Junto a isso, a criação de produtos fotogramétricos para utilização em trabalhos mineiros exige conhecimentos específicos. Neste sentido, este tópico tem como objetivo esclarecer algumas exigências legais relevantes ao desenvolvimento e justificativa deste trabalho, descrever as informações teóricas necessárias para o entendimento da ciência fotogramétrica, além de discorrer sobre planejamento de um levantamento aerofotogramétrico e produtos gerados pela aerofotogrametria.

3.1 Legislação Minerária

O devido conhecimento da Legislação é fundamental para o desenvolvimento de qualquer empreendimento. Na Mineração ele é essencial, uma vez que são investidos vultosos recursos financeiros na aquisição de equipamentos para a exploração de substâncias minerais. Muitas vezes o desconhecimento da Legislação acarreta ao minerador prejuízos significativos.

Assim, é importante que o minerador conheça a Legislação e acompanhe as normas jurídicas da ANM, dos órgãos ambientais e os entendimentos firmados nos Pareceres Jurídicos desses Órgãos.

Para este trabalho, que busca apresentar a aerofotogrametria como alternativa para realização de trabalhos que tem por função o cumprimento de exigências da ANM, cabe ressaltar os artigos 16 e 38 referentes a pesquisa mineral e autorização de lavra respectivamente.

De acordo com o código de mineração Decreto Lei nº 227, disposto no Capítulo relativo a Pesquisa Mineral, assegura-se que:

Art. 16 - A autorização de pesquisa será pleiteada em requerimento dirigido ao Diretor-Geral do ANM, entregue mediante recibo no Protocolo da ANM, onde será mecanicamente numerado e registrado, devendo ser apresentado em duas vias e conter os seguintes elementos de instrução:

- I - Nome, indicação da nacionalidade, do estado civil, da profissão, do domicílio, e do número de inscrição no Cadastro de Pessoas Físicas do Ministério da Fazenda do requerente, pessoa natural. Em se tratando de pessoa jurídica, razão social, número do registro de seus atos constitutivos no Órgão de Registro de Comércio competente, endereço e número de inscrição no Cadastro Geral dos Contribuintes do Ministério da Fazenda;
- II - Prova de recolhimento dos respectivos emolumentos;
- III - designação das substâncias a pesquisar;
- IV - Indicação da extensão superficial da área objetivada, em hectares, e do Município e Estado em que se situa;
- V - Memorial descritivo da área pretendida, nos termos a serem definidos em portaria do Diretor-Geral do ANM;
- VI - Planta de situação, cuja configuração e elementos de informação serão estabelecidos em portaria do Diretor-Geral do ANM;
- VII - plano dos trabalhos de pesquisa, acompanhado do orçamento e cronograma previstos para a sua execução;

De acordo com o código de mineração Decreto Lei nº 227, disposto no capítulo relativo à Lavra, assegura-se que:

Art. 38 - O requerimento de autorização de lavra será dirigido ao Ministro de Minas e Energia, pelo titular da autorização de pesquisa, ou seu sucessor, e deverá ser instruído com os seguintes elementos de informação e prova:

- I - Certidão de registro no Departamento Nacional de Registro do Comércio da entidade constituída;
- II - Designação das substâncias minerais a lavrar, com indicação do Alvará de Pesquisa outorgado, e de aprovação do respectivo Relatório;
- III - Denominação e descrição da localização do campo pretendido para a lavra, relacionando-o, com precisão e clareza, aos vales dos rios ou córregos, constantes de mapas ou plantas de notória autenticidade e precisão, e estradas de ferro e rodovias ou, ainda, a marcos naturais ou acidentes topográficos de inconfundível

determinação; suas confrontações com autorização de pesquisa e concessões de lavra vizinhas, se as houver, e indicação do Distrito, Município, Comarca e Estado e, ainda, nome e residência dos proprietários do solo ou posseiros;

IV - Definição gráfica da área pretendida, delimitada por figura geométrica formada, obrigatoriamente, por segmentos de retas com orientação Norte-Sul e Leste-Oeste verdadeiros, com 2 (dois) de seus vértices, ou excepcionalmente 1 (um), amarrados a ponto fixo e inconfundível do terreno, sendo os vetores de amarração definidos por seus comprimentos e rumos verdadeiros, e configuradas, ainda, as propriedades territoriais por ela interessadas, com os nomes dos respectivos superficiários, além de planta de situação;

V - Servidões de que deverá gozar a mina;

VI - Plano de aproveitamento econômico da jazida, com descrição das instalações de beneficiamento;

VII - Prova de disponibilidade de fundos ou da existência de compromissos de financiamento, necessários para execução do plano de aproveitamento econômico e operação da mina.

O PAE, é peça fundamental e principal para o requerimento de concessão de lavra. Este documento é que dá consistência à economicidade do empreendimento mineiro.

Plano de Aproveitamento Econômico

De acordo com Vidal *et al.* (2014), o planejamento de lavra pode ser definido como sendo realmente uma boa parte do projeto de lavra de uma determinada pedreira contendo os dados técnicos para o nível de produção desejado, dimensionamento completo dos equipamentos e instalações, cálculo dos custos de todas as etapas e sequência das atividades, entre outras. O planejamento em curto prazo compreende períodos de produção que vão desde alguns meses até um ano, e o objetivo é a obtenção de uma determinada produção de blocos do jazimento. O rendimento total de exploração é dado pela relação entre o volume de produto útil e o volume total explorado. O planejamento produtivo de médio-longo prazo finaliza com a determinação e a coordenação dos aspectos estratégicos da exploração. Os tradicionais aspectos técnicos impostos pelas exigências de produção se

aplicam aos órgãos competentes de proteção ao meio ambiente. O responsável pelo planejamento deve procurar sempre uma alternativa que apresente uma solução responsável (VIDAL *et al.*, 2014).

As alternativas escolhidas devem contemplar a definição e a evolução no tempo de:

- Frentes de lavra.
- Sequência de exploração nas frentes de lavra.
- Definição e hierarquias dos grandes volumes.
- Infraestruturas (acessos principais, secundários).
- Área de servidão.
- Depósito controlado de estéril (bota-fora).
- Proteção, recuperação ou reabilitação ambiental.

3.2 Fotogrametria

Etimologicamente, a palavra fotogrametria possui seus radicais advindos do grego e são divididos da seguinte forma: *photon* (luz), *graphos* (escrita) e *metron* (medições), que em conjunto carregam o significado de medições executadas através de fotografias. Segundo Coelho e Brito (2007), interpreta-se fotogrametria como a ciência e tecnologia capaz de obter informação confiável por meio de imagens adquiridas por sensores. A última das definições feita pela *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), propõe que a fotogrametria esteja inserida no contexto global do sensoriamento remoto, definido como ciência e tecnologia de aquisição de informação sobre um objeto sem contato direto entre este e o sensor.

Fisicamente, as imagens utilizadas pela fotogrametria representam interações eletromagnéticas entre um ou mais objetos detectados e registrados por um sensor (COELHO e BRITO, 2007). Os sensores podem ser entendidos como equipamentos capazes de transformar alguma forma de energia em um sinal passível de ser convertido em informações sobre o ambiente, sem contato físico entre eles (NOVO, 1992). Tem-se, como exemplo, as câmeras digitais que utilizam um chip chamado CCD (*Charge-Coupled Device*), sendo este formado por uma série de células fotossensíveis que ao sofrer incidência de luz transformam a onda eletromagnética em carga elétrica. Esta carga é, então, transferida para um circuito digitalizador gerando a imagem digital (DISPERATI *et al.*, 1997).

O principal objetivo da fotogrametria é reconstruir um espaço tridimensional, chamado espaço-objeto, a partir de um conjunto de imagens bidimensionais, chamado espaço-imagem. Para isso, utiliza-se um sistema bidimensional próprio da câmara e um sistema tridimensional que representa o sistema de coordenadas do terreno sobre o qual as imagens são obtidas. O sistema tridimensional pode ser representado por coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude), planialtimétricas do tipo Transversa de Mercator (leste, norte e altitude) ou cartesianas (X, Y, Z) (COELHO e BRITO, 2007).

Para que a transformação do sistema 2D para o 3D seja implementada é necessário um conjunto de pontos de controle que são expressos no espaço-objeto. Além disso, faz-se necessário que pelo menos duas fotos sejam tomadas de ângulos diferentes, com área de sobreposição, para que se tenha visão estereoscópica (tridimensional) do espaço-objeto (COELHO e BRITO, 2007).

3.3 História da Fotogrametria

Pode-se dizer que a fotogrametria teve seu real início com Aimé Laussedat a partir de 1851, que desenvolveu os princípios técnicos desta ciência. No entanto, a primeira grande evolução da fotogrametria aconteceu com a invenção do aparelho estereocomparador, por Puufrich. Este aparelho permite a visão em perspectiva, ou seja, a percepção de objetos com todas as modificações aparentes ou com os diversos aspectos que sua posição e situação determinam com relação à figura e à luz. Com a criação desta técnica, substituiu-se inúmeros cálculos por aparelhos ópticos mecânicos (COELHO e BRITO, 2007).

O avanço na ciência fotogramétrica teve continuidade com Theodore Scheimpflug em 1911, que criou o método de retificação de fotografias aéreas no qual possibilitou o mapeamento de áreas extensas. Posteriormente os retificadores analógicos foram substituídos por restituidores analógicos, que permitiam a visão estereoscópica através de um par de estereoscópicos possibilitando um par de fotografias com sobreposição. Em paralelo ao surgimento dos restituidores foram desenvolvidos os processos de fototriangulação analógica que permitia o adensamento de pontos de controle e câmaras métricas (COELHO e BRITO, 2007).

A segunda grande evolução da fotogrametria veio com o surgimento do computador, que era capaz de realizar todos os cálculos que a princípio foram substituídos pelos aparelhos mecânicos. Assim, surgiu a fotogrametria analítica que

incluía tratamento matricial, soluções por mínimos quadrados, utilização de múltiplas imagens e análise de propagação de erros. Em decorrência, Uki Helava desenvolveu o conceito de restituidor analítico que media coordenadas das marcas fiduciais de pontos homólogos. A partir daí, foi possível a foto triangulação de blocos cada vez maiores e utilização de câmaras não métricas (COELHO e BRITO, 2007).

Na década de 1980, ocorreu mais um grande avanço para ciência fotogramétrica, sendo este progresso marcado pela utilização de imagens digitais como fonte primária de dados. Além disso, nesta época, já existiam computadores com capacidade de processamento suficientes para suportar os elevados volumes de dados gerados pela tecnologia digital. Assim, tornou-se possível a elaboração de produtos digitais como ortoimagens, mosaicos digitais. Coelho e Brito (2007) mostram que a fotogrametria digital tem como objetivo principal a reconstrução automática do espaço tridimensional a partir das imagens bidimensionais.

3.4 Aerofotogrametria

A fotogrametria permite reconstruir a posição, orientação, forma e tamanho dos objetos, ou seja, a reconstrução tridimensional a partir de imagens primariamente bidimensionais. Segundo Kraus (2007), a aerofotogrametria ou fotogrametria aérea é definida como método no qual as imagens fotogramétricas são obtidas por sensores que se encontram embarcados em aeronaves.

Segundo Coelho e Brito (2007), é o método mais empregado e imprescindível na obtenção de dados cartográficos da superfície terrestre e, por consequência, o que mais obteve benefícios de uma organização dos procedimentos e parâmetros.

Neste trabalho, os conceitos e teorias apresentados serão todos voltados a fotogrametria aérea, pois será através desse método que os dados deste projeto serão levantados.

3.5 Princípios Básicos da Fotogrametria

3.5.1 Paralaxe Estereoscópica

Os trabalhos fotogramétricos são possíveis graças ao fenômeno da paralaxe. Segundo Coelho e Brito (2007), paralaxe estereoscópica é definida como o

deslocamento aparente da posição de um corpo ou objeto em relação a um ponto ou sistema de referência, causado pela mudança do ponto de observação.

Se um observador colocar como referência o traço vertical da quina de uma parede e colocar uma garrafa de água entre seus olhos e esta quina, ao observar esta garrafa somente com um olho de forma alternada, ele perceberá que o alinhamento entre a garrafa e o traço vertical se altera. Esse deslocamento aparente é chamado de paralaxe. É importante notar que quanto mais próximo a garrafa está do observador maior será o deslocamento horizontal. Assim, o cérebro é capaz de captar noção de profundidade. Analogamente ao exemplo, tem-se a paralaxe estereoscópica em imagens fotográficas, como é mostrado na Figura 1.

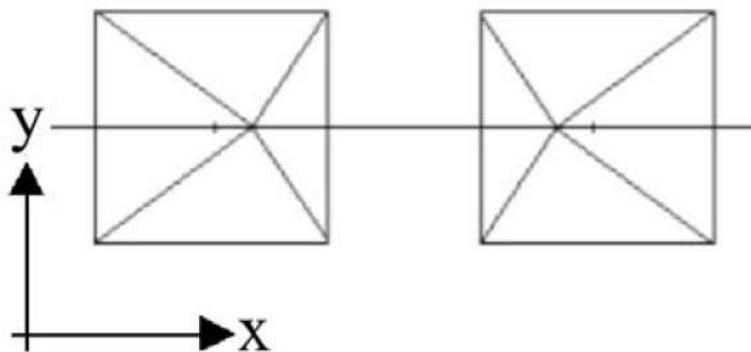


Figura 1: Pirâmide quadrangular mostrando imagens tomadas com eixo óptico da câmara verticalizado em relação ao plano da base da pirâmide.

FONTE: (adaptado de) Coelho e Brito (2007).

O conhecimento da paralaxe estereoscópica é fundamental para o mapeamento fotogramétrico topográfico, pois é por intermédio desse conceito que a fotogrametria cumprirá seu papel de reconstruir o espaço-objeto a partir da visualização do espaço-imagem.

3.5.2 Radiação Eletromagnética

Em geral, os sensores imageadores detectam e registram radiação eletromagnética. Entende-se por radiação eletromagnética toda a energia com propriedades elétricas e magnéticas, movendo-se na velocidade da luz (3×10^8 m/s), em um modelo de onda harmônico e senoidal (SABINS, 1978). A Figura 2 esquematiza os parâmetros físicos que caracterizam radiações eletromagnéticas.

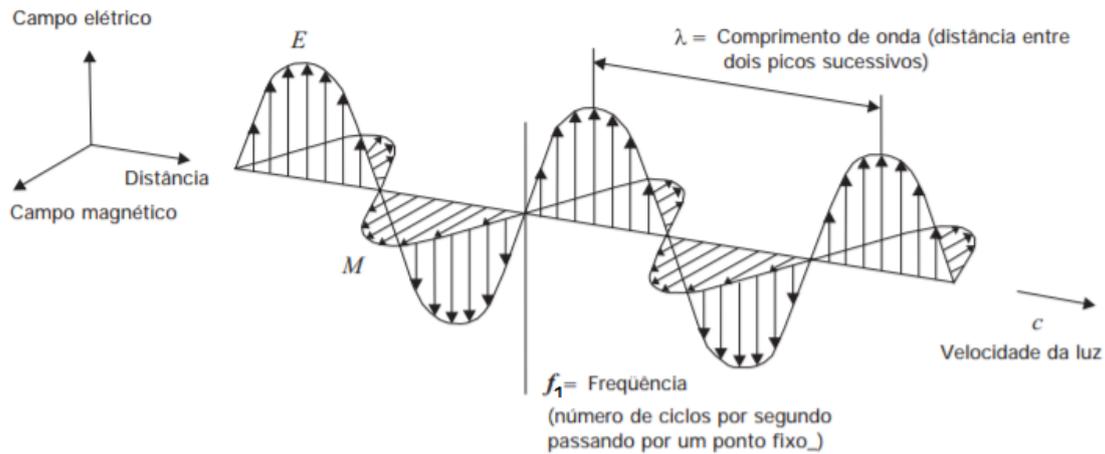


Figura 2: Configurações da onda eletromagnética constituída por uma onda elétrica senoidal (E) e uma onda magnética senoidal (M).
FONTE: (adaptado de) Ferreira *et al.* (2001).

É válido ressaltar que a onda eletromagnética caracteriza-se pela dualidade onda partícula. Vista como onda, possui espectros de comprimentos de onda e de frequência distintos, distinguindo luz visível, região do infravermelho, ultravioleta e ondas de rádio, além dos raios X e gama. Considerando a fórmula de propagação de ondas, observa-se:

$$v = \lambda f_1 \quad (1)$$

Em que:

- v = Velocidade de onda (m/s)
- λ = Comprimento de onda (m)
- f_1 = Frequência (Hz)

As diferentes variedades de onda podem ser classificadas de acordo com a Figura 3. O espectro de luz chamado visível recebe essa denominação pois é a única região do espectro eletromagnético que sensibiliza os olhos do ser humano.

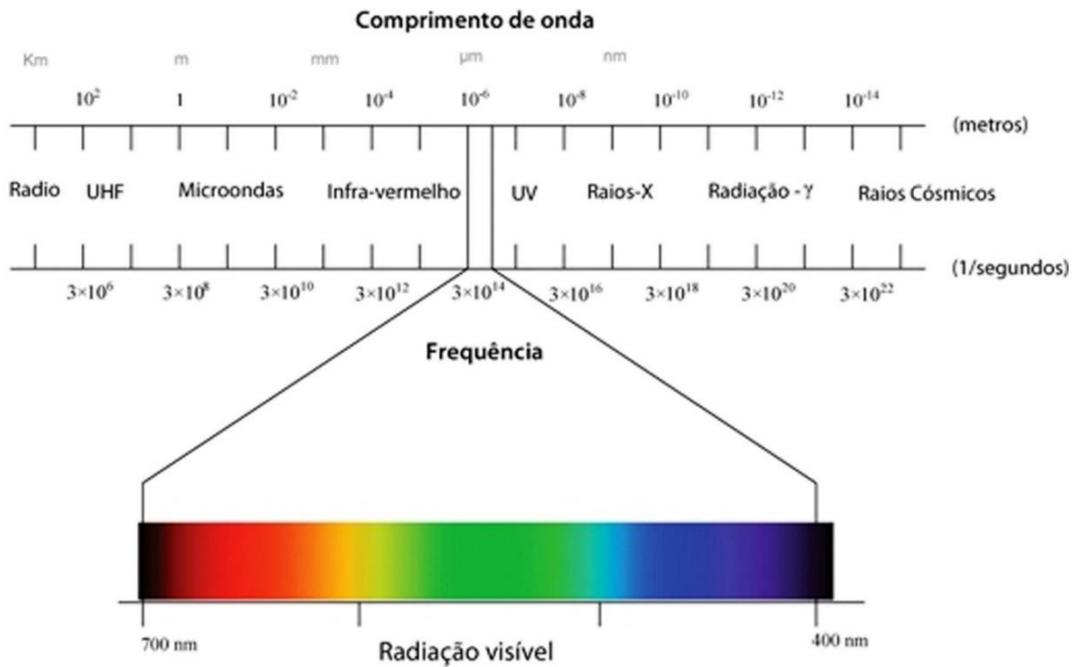


Figura 3: Espectro Eletromagnético.
FONTE: Rodrigues e Brizola (2019).

A resposta de um corpo à incidência de energia eletromagnética pode ser de absorção, transmissão ou reflexão. Além disso, os corpos possuem emissão própria de energia eletromagnética. Para o sensoriamento remoto, interessam principalmente a reflexão e a emissão, pois é a partir do somatório de energia refletida e emitida pelas feições da superfície terrestre que os sensores detectam e registram radiação eletromagnética (COELHO e BRITO, 2007).

A reflexão da radiação eletromagnética ocorre de forma especular e difusa. A reflexão especular caracteriza-se por refletir a luz com um ângulo igual ao de incidência, equivalendo-se a um espelho. Esse fenômeno pode ser visto na Figura 4.

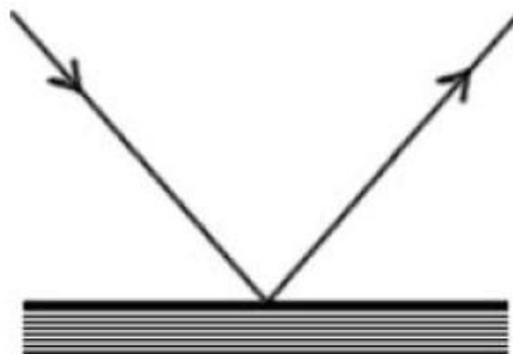


Figura 4: Reflexão especular.
FONTE: Coelho e Brito (2007).

Segundo Coelho e Brito (2007), a reflexão difusa (Figura 5) é a de maior interesse na aquisição de dados fotogramétricos, pois, neste tipo, parte da luz incidente é refletida em diversos ângulos e intensidades. Cada corpo reage de forma diferente a mesma radiação graças as peculiaridades de cada um deles. Assim, para diferentes corpos e radiações e, conseqüentemente, para diferentes comprimentos de onda, há diferentes intensidades refletidas e/ou emitidas. Por este motivo chega-se ao conceito de cores.

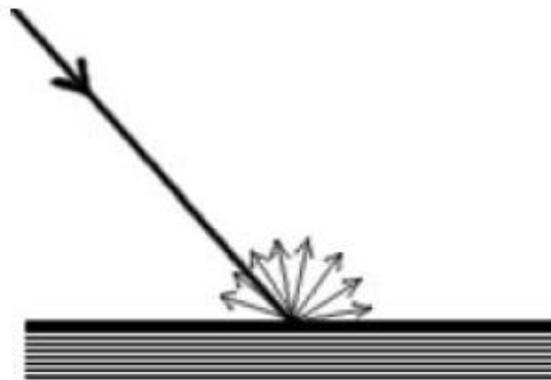


Figura 5: Reflexão difusa.
FONTE: Coelho e Brito (2007).

3.5.3 Câmara Fotográfica

O funcionamento da câmara escura é de natureza física. O princípio da propagação retilínea da luz permite que os raios luminosos que atingem o objeto e passem pelo orifício da câmara sejam projetados no anteparo fotossensível na parede paralela ao orifício. Esta projeção produz uma imagem real invertida do objeto na superfície fotossensível (SOUZA *et al.*, 2007). O fenômeno pode ser representado pela Figura 6.

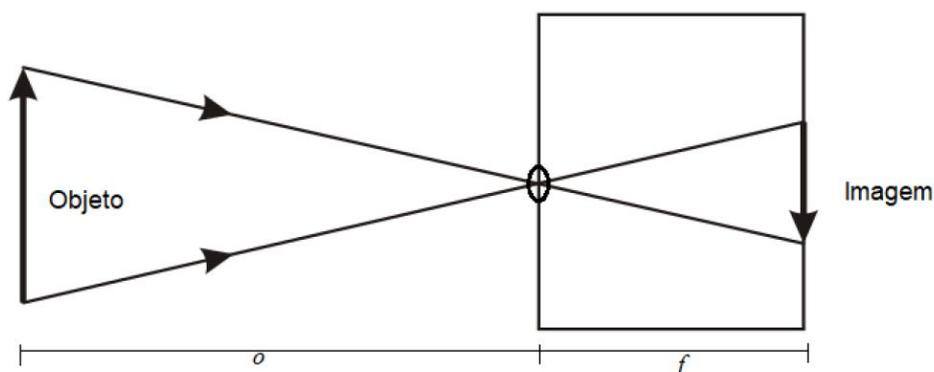


Figura 6: Princípio Básico da Câmara Escura.
FONTE: Dalmolin (2018).

Quando o arranjo está devidamente posicionado, pode-se relacionar a distância focal (f), a distância-imagem (i) e a distância-objeto (o) seguindo a (Lei de Gauss):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (2)$$

Esta fórmula tem por função especificar uma determinada distância-imagem e uma determinada distância-objeto para que o sistema esteja absolutamente focado. Apesar da fórmula expressar rigidez, há um intervalo dentro do qual mudanças de posição do objeto não acarretam perda de nitidez. Tal conceito é chamado profundidade de campo. Como em fotografias aéreas a distância-objeto assume valores altos, a equação 2 se reduz a $f = i$.

Outro conceito importante para as câmaras fotográficas é a exposição em qualquer ponto do plano focal. De acordo com Lillesand e Kiefer (2000), essa exposição é expressa da seguinte forma:

$$Exp = \frac{s d^2 t f^2}{4} \quad (3)$$

Sendo

- Exp = exposição (J/mm^2)
- S = brilho da cena ($Jmm^{-2}s^{-1}$)
- d = diâmetro da abertura da lente (mm)
- t = tempo de exposição (s)
- f = distância focal (mm)

Outro conceito importante é o f-stop da câmara que relaciona a distância focal e o diâmetro da lente. Essa relação permite discernir a quantidade de luz que passa através da lente.

$$f - stop = \frac{f}{d} \quad (4)$$

Ainda, pode-se relacionar as equações 3 e 4:

$$Exp = \frac{st}{4(f - stop)^2} \quad (5)$$

Assim, conclui-se que quanto maior a abertura das lentes, mais luz chegará ao filme o que diminui exposição. Em oposição, pequenas aberturas de lentes obrigam maiores tempos de exposição, mas aumentam profundidade de campo.

3.5.4 Câmaras Fotogramétricas

As câmaras fotogramétricas possuem algumas características especiais. De acordo com Coelho e Brito (2007), é de extrema importância destacar que estes tipos de câmaras possuem maior rigor métrico na definição dos parâmetros que regem a câmara. Assim, pode-se extrair informação métrica e precisa das imagens adquiridas por tal tipo de câmara. As câmaras fotogramétricas mais utilizadas são as aéreas. As partes principais destas câmaras podem ser observadas no esquema da Figura 7, idealizado por (COELHO e BRITO, 2007).

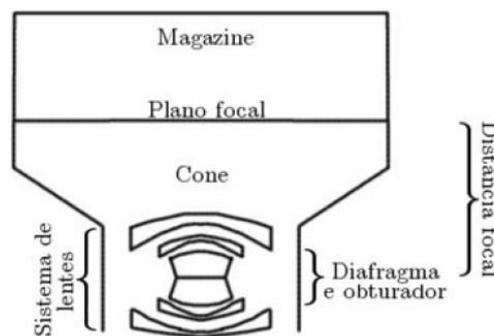


Figura 7: Esboço de câmara fotogramétrica.
FONTE: Coelho e Brito (2007).

De acordo com Coelho e Brito (2007), as partes principais da câmara fotogramétrica e suas funcionalidades são divididas da seguinte forma:

- No *cone*, localizam-se o sistema de lentes da objetiva, o diafragma, o obturador, o suporte de filtros e a esquadria de registros.

- O *sistema da objetiva* é um conjunto de lentes que deve direcionar os raios luminosos vindos do exterior para a imagem a ser formada no plano focal.
- O *obturador* é responsável pela abertura necessária do diafragma (um conjunto de cortinas circulares concêntricas), a fim de se obter uma exposição desejada.
- Os *filtros* podem ser usados caso se queira aplicar determinados efeitos às imagens.
- A *esquadria de registros* comporta várias informações marginais que virão a ser impressas em cada uma das fotografias. As mais importantes são as marcas fiduciais, estas definem um sistema rígido de coordenadas da imagem. Outros dados que podem ser expressos são o número da foto, voo etc.
- O *plano focal* é onde se forma a imagem. Nas câmaras digitais, há uma matriz de detectores nessa região, nas câmaras analógicas é onde se localiza o filme.

Ainda de acordo com Coelho e Brito (2007), toda câmara fotogramétrica vem acompanhada de um certificado de calibração, ou seja, um documento que atesta os valores precisos de determinados parâmetros fundamentais da câmara. Os principais parâmetros são:

- *Tipo de câmara e de lente*: informações sobre o nome do fabricante e o modelo da câmara, bem como as lentes utilizadas;
- *Distância focal*: vem da Lei de Gauss, exemplificada anteriormente na equação 2;
- *Ângulo de abertura*: em geral assume valores pré determinados de ângulo normal, ângulo grande ou ângulo supergrande.

3.5.5 Imagens Digitais

As imagens digitais são formadas graças a radiação eletromagnética que é refletida na superfície da terra e nos objetos dispersos. Essa radiação segue em direção ao sensor da câmara na forma de um fluxo com radiação e intensidade próprios. A intensidade recebe o nome de radiância e pode ser medida em faixas espectrais de

acordo com Shimabukuro e Ponzoni (2017). Durante a trajetória da superfície até os sensores da câmara, o fluxo de radiação interage com a atmosfera terrestre. Ao chegar nos sensores da câmara, a radiância do fluxo é convertida em sinais elétricos. Os sensores, ainda, convertem os sinais elétricos em números digitais, segundo critérios específicos de cada faixa espectral. Os números digitais darão origens aos *pixels*, que caracterizam espectralmente os objetos no terreno. Isto se chama assinatura espectral (SHIMABUKURO e PONZONI, 2017).

Os sensores das câmaras digitais que tem por função captar a radiância e converter em sinais elétricos podem ser de dois tipos: CCD ou CMOS.

Dispositivos CCD e CMOS fazem a detecção de fótons e ficam organizados como matrizes de fotodetectores que entregam um sinal elétrico relacionado a quantidade de fótons que caem em sua superfície durante o tempo de integração. Estes usam o efeito fotoelétrico. CCDs são, de acordo com Fernandes *et al.* (2002) apud Damolin (2018) sensores semicondutores capazes de captar imagens através de células fotoelétricas ligadas a uma matriz de capacitores. O número de capacitores e o arranjo destes estão associados diretamente com o número de pixels gerados para composição de uma imagem e, conseqüentemente, determinam a resolução desta.

A principal diferença entre os sensores está no modo em que a captura de imagem se dá através da sensibilização de cada elemento fotossensível que irá formar os pixels. Sensores CCD tem a capacidade de sensibilizar todos os elementos de sua matriz de uma vez só, o que é conhecido como *total shutter*, ao contrário do CMOS, que captura as imagens pelo processo de *rolling shutter* fazendo a leitura de uma fileira de pixel por fração de segundo.

Pode-se dizer que existem dois tipos fundamentais de imagem digital: vetorial e matricial.

A imagem digital pode ser caracterizada por delimitar objetos pelos pontos que os descrevem através de ligações e representações por elementos de geometria primitiva, como segmentos de retas e polígonos simples (LISBOA FILHO, 2000). Estas imagens possuem uma característica muito interessante, já que permitem a sucessiva ampliação sem que haja perda de resolução. Isso porque a posição de cada objeto no plano de representação é definida de acordo com um sistema de coordenadas, não necessitando que cada espaço do plano de representação esteja preenchido, como ocorre no caso matricial.

A imagem digital matricial, é definida como sendo uma matriz constituída por

células quadradas e sem dimensão, chamadas de *picture elements* ou, como são mais conhecidos no contexto atual, *pixels* (p). Estes elementos irão compor a resolução espacial da imagem em questão, destacam Shimabukuro e Ponzoni (2017). Em cada *pixel* pode haver apenas uma coloração sólida, definida por um número digital (ND).

Pode-se, assim, representar uma imagem digital por uma matriz, tendo por valor de cada um dos termos o número digital equivalente a uma coloração, como pode ser percebido na figura 8.

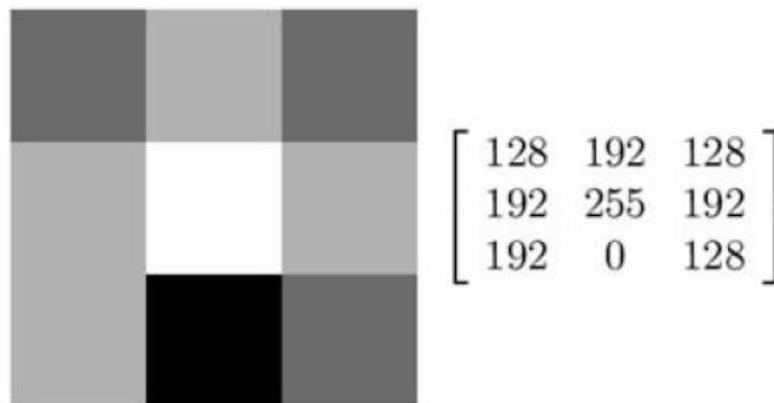


Figura 8: Distribuição matricial equivalente a um conjunto de pixels.
FONTE: Damolin (2018).

Segundo Coelho e Brito (2007), existem 4 conceitos que definem a resolução de uma imagem digital: resolução espacial, radiométrica, espectral e temporal.

A *resolução espacial* está diretamente relacionada com o tamanho do *pixel*. Essa terminologia exprime quanto vale um *pixel* na imagem. Exemplo: determinada imagem de 32 x 32 *pixels*, equivale, no terreno, a uma área de 32 x 32 metros, ou seja, cada *pixel* equivale a um quadrado de 1 x 1 metro. Como dentro de um *pixel* só pode haver uma cor, pode-se dizer que o tamanho do *pixel* está diretamente relacionado com a capacidade de discernir objetos no terreno.

Convém ainda citar que, no momento em que se arranja uma área física da Terra em uma matriz de *pixels* de dimensões definidas, executa-se um processo chamado discretização. O espaço contínuo e de unidades de medida infinitamente complexas é reduzido a um conjunto discreto de elementos arrumados em uma matriz. Se houver mais *pixels* cobrindo uma mesma área, a discretização dar-se-á de modo mais realista, mas isso aumenta proporcionalmente o tamanho do arquivo final.

A *resolução radiométrica* está ligada à capacidade de discernir quantidades

cada vez maiores de tons dentro de uma determinada banda do espectro eletromagnético. Conforme Souza *et al.* (2007), a radiação radiométrica possui valores de intensidade que diferem de um alvo para outro. A representação destes valores, no formato digital, está ligada ao número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar o valor máximo de cada *pixel*, portanto, estes valores devem estar associados a uma potência de 2, como pontua Coelho e Brito (2007). Desse modo, uma resolução radiométrica maior irá proporcionar uma melhor identificação e representação das nuances da superfície analisada de acordo com Souza *et al.* (2007).

As *resoluções espectral e temporal* estão ligadas ao número de bandas e a espessura de cada banda que os sensores são capazes de cobrir, conforme Coelho e Brito (2007). Sensores pancromáticos, por exemplo, cobrem a faixa do espectro visível, exibindo-as em tons de cinza em apenas uma banda. Sensores para captar imagens coloridas cobrem a mesma faixa do espectro, mas em bandas diferentes, no caso, o sistema RGB como no exemplo anterior. Dessa forma, como o sensor para imagens coloridas possui três bandas, elas são mais estreitas que no caso pancromático, uma vez que este equivale às três juntas. Deste modo, pode-se dizer que os sensores coloridos possuem maior resolução espectral do que o pancromático, como exemplifica Coelho e Brito (2007).

3.5.6 Características dos levantamentos Aéreos

A fim de se aproveitar o máximo potencial do levantamento fotogramétrico, faz-se necessária a definição de alguns parâmetros. Assim, a partir da fixação destes parâmetros, facilita-se a manipulação dos modelos matemáticos da fotogrametria. Os principais parâmetros a serem pontualmente definidos estão listados a seguir:

Distância focal e abertura da câmara: obedecem aos padrões de normal, grande angular e supergrande angular;

Recobrimento lateral e Longitudinal: duas imagens adjacentes devem ter um recobrimento (área de sobreposição) que varia de acordo com o tipo e objetivos do levantamento. Para levantamentos aéreos, o recobrimento nominal deve ser de 60%, duas faixas de voo devem possuir recobrimento de no mínimo 30%;

Escala de voo: para imagens aéreas, a câmara está focalizada para o infinito, devido à grande distância até o terreno. Isso possibilita que relações simples de razão

e proporção sejam estabelecidas, a fim de que sejam determinadas variáveis dependentes da escala em um voo fotogramétrico (figura 9).

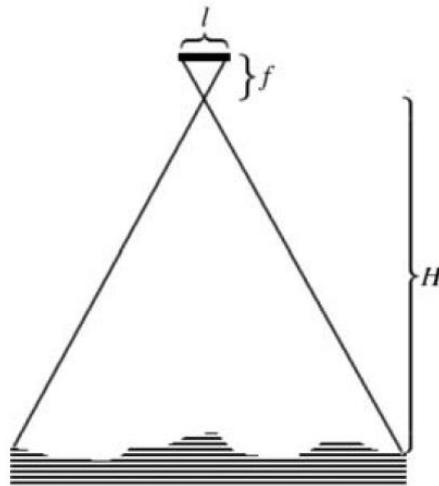


Figura 9: Parâmetros do voo fotogramétrico.
FONTE: Coelho e Brito (2007).

A escala de voo, para obtenção de imagens aéreas, é o parâmetro que descreve a relação de uma distância medida na imagem obtida pelo sensor embarcado (D) e a sua correspondente homóloga no terreno (d).

$$E = \frac{d}{D} \quad (6)$$

Tomando como base a figura 9, outras relações também podem ser escritas:

$$E = \frac{f}{H} \quad (7)$$

$$E = \frac{f}{h_m - h} \quad (8)$$

Em que:

- h = altitude da câmara
- h_m = altitude média do terreno
- H = altura de voo
- f = distância focal da câmara

3.5.7 Structure From Motion

De acordo com Carrivick *et al.* (2016), *Structure from Motion* não é uma técnica ou ferramenta isolada; é, na verdade, um fluxo de trabalho. O SfM é, então, um fluxo de trabalho que utiliza múltiplas imagens (sobrepostas) de um objeto ou superfície, obtidas através de uma câmera fotográfica, a partir de vários pontos de vista, para reconstruir a geometria 3D do objeto ou da superfície (CARRIVICK *et al.*, 2016).

Segundo Khalil (2020), a metodologia de SFM para fotogrametria contribui muito para modelagem 3D, pois é uma ferramenta capaz de automatizar o processamento das imagens. Essa metodologia é aplicada a nova geração de *softwares* fotogramétricos e se baseia no algoritmo SIFT.

SIFT é um algoritmo de visão computacional publicado por David Lowe, em 1999 (Lowe, 1999), que foi patenteado pela universidade canadense, University of British Columbia, nos EUA. SIFT é composto por duas partes distintas: o detector e o descritor. O detector SIFT é baseado em cálculos de diferença de Gaussianas; já o descritor SIFT utiliza histogramas de gradientes orientados para descrever a vizinhança local dos pontos de interesse.

Segundo Lowe (2004) *apud* Gonzáles (2010), o algoritmo SIFT é executado através de quatro etapas principais: detecção de extremos, localização de pontos-chave, definição da orientação e descrição dos pontos-chave. As duas primeiras descrevem a parte do detector e as duas seguintes descrevem a formação do descritor.

Segundo Carrivick *et al.* (2016), o processo fundamental do SfM é a detecção e descrição de características comuns ou texturas em imagens sobrepostas. Após a detecção dos recursos correspondentes, eles recebem coordenadas 3D e, iterativamente, o *software* constrói automaticamente uma rede 3D de pontos correspondentes ou de ligação. Após a criação da rede de ponto de união 3D, uma nuvem densa é gerada para preencher o espaço entre os pontos de ligação por meio de um algoritmo MVS (*Multi View Stereo* ou Estéreo de Múltiplas Visualizações). Este algoritmo funciona essencialmente pesquisando as redes de *pixels* nas imagens, selecionando as melhores correspondências e gerando pontos no espaço 3D.

3.5.8 Fototriangulação

Fototriangulação foi desenvolvida de modo que, a partir de apenas alguns

pontos de controle, possa ser gerada uma infinidade de outros, com precisões aceitáveis para que sejam utilizados como se de controle fossem (BRITO e COELHO, 2007).

A fototriangulação pelo método dos feixes perspectivos permite a reconstrução ótima da geometria dos feixes de raios luminosos formadores do espaço-imagem no momento da aquisição das imagens fotográficas. O processo se vale do Método dos Mínimos Quadrados para minimizar a função que quantifica os resíduos do ajustamento, de forma que cada raio ajustado, originando-se em uma posição qualquer do espaço-objeto, passe o mais próximo possível de seu homólogo no espaço-imagem e do centro de perspectiva da imagem (BRITO e COELHO, 2007).

3.6 Projeto de levantamento aéreo

3.6.1 Classificação das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs)

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (2016), Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely-Piloted Aircraft* – RPA) indica uma aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota com finalidade diversa e estas podem ser classificadas de acordo com o peso máximo de decolagem (PMD) ordenado da seguinte maneira:

- a) Classe 1: RPA com PMD maior que 150 kg;
- b) Classe 2: RPA com PMD maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg;
- c) Classe 3: RPA com PMD menor ou igual a 25 kg.

As aeronaves utilizadas para levantamentos aerofotogramétricos são, em geral, as de Classe 3. As RPAs também podem ser classificadas de outras formas, considerando:

- a) Motorização elétrica, a combustão ou híbrido (elétrico e a combustão);
- b) Arquitetura da aeronave: asa fixa, multirrotor ou híbrido (decolagem com um multirrotor e, após atingir altura de cruzeiro, assume a dinâmica de um modelo de asa fixa);
- c) Autonomia de voo;
- d) Altitude de voo.

3.6.2 Regularização das Aeronaves Remotamente Pilotadas

De acordo com Circular Técnica da EMBRAPA, antes de iniciar qualquer trabalho com RPAs, o profissional deve legitimar seus equipamentos nas agências reguladoras do setor de telecomunicações (ANATEL) e aeronáutica (ANAC).

Após a regularização do equipamento, o profissional deve buscar legitimar a operação de voo. No Brasil, o espaço aéreo é controlado e regulado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (Decea), vinculado ao Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica. Dessa forma, em dezembro de 2016 foi reeditada a Instrução de Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40, que regulamenta o uso das RPAs e institui os Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro (Brasil, 2016). A legitimação do voo deve ser feita em ambiente online através do site do Sarpas (<http://servicos.decea.gov.br/sarpas/>).

3.6.3 Parâmetros para Elaboração do Plano de Voo

O sucesso da missão de mapeamentos com RPAs começa com a definição do plano de voo adequado para cada objeto de interesse que se pretende mapear, mas o bom desempenho dos trabalhos envolve inúmeras possibilidades de combinações de alturas de voo, velocidade de cruzeiro da RPA, configuração das câmeras, luminosidade do dia, características do ambiente a ser mapeado e *overlap* ou sobreposição lateral e longitudinal das linhas de sobrevoo.

Um dos principais Drones utilizado para levantamentos aéreos é da fabricante DJI. Na figura 10 são mostradas as principais partes do DRONE DJI Phantom 4 Pro.



1. Hélice de encaixe (modelo prata e preto);
2. Rotor;
3. *Led* indicativo de condição funcional;
4. Sensor ultrassônico de desvio de obstáculos;
5. Protetor de lente rosqueável (sem filtro de luz);
6. Câmera fotográfica;
7. Gimbal eletrônico de três eixos;
8. *Slot* de inserção do cartão microSD;
9. *Slot* de conexão de cabo USB;
10. Ponto de *reset*;
11. Sensor infravermelho de desvio de obstáculos;
12. Posição superior onde se encontra o GNSS na parte interna da shell.

Figura 10: Esquema demonstrativo dos principais componentes da RPA DJI Phantom 4 Pro.
FONTE: Figueiredo e Figueiredo (2018).

Um dos parâmetros que permitem extrair máxima qualidade das fotografias é a exposição a luz que, por sua vez, deve se apresentar de forma balanceada. Esse balanceamento depende de três fatores: sensibilidade ISO, a abertura e a velocidade do obturador (FIGUEIRDO; FIGUEIREDO, 2018).

De acordo com Circular Técnico da Embrapa, que baseou seus estudos em Zeegen (2009), a sensibilidade ISO, a abertura e a velocidade do obturador são interdependentes, portanto, se um dos três parâmetros oscilar, e o objetivo é registrar uma mesma quantidade de luz no sensor da câmera, pelo menos um dos outros dois parâmetros também deverá ser alterado.

O parâmetro ISO representa a sensibilidade à luz do sensor da imagem da câmera fotográfica, conforme definida pela *International Organization for Standardization*.

A abertura do diafragma é o segundo parâmetro que define a quantidade de luz a ser registrada no sensor. Quanto maior for a abertura, mais claro será o registro de luz na imagem. A determinação da abertura do diafragma é feita por meio de uma nomenclatura própria f-stop já descrito anteriormente nesta obra. Quanto maior for o número, menor será a quantidade de luz a ser transmitida pela objetiva e menos luminosa a imagem se formará. Essa escala se apresenta da seguinte forma: f/1, f/1.4, f/2, f/2.8, f/4, f/5.6, f/8, f/11, f/16, f/22, f/32, f/64. Os melhores resultados com imagens obtidas com RPA são alcançados com abertura entre f/2.8 e f/5.6, porém ressalta-se que a interdependência dos parâmetros e as condições ambientais de luminosidade podem requerer inúmeras combinações (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

A velocidade de abertura do obturador ou *shutter* é a último incremento para o balanceamento da exposição fotográfica. Esse parâmetro determina por quanto tempo o obturador ficará aberto para capturar a luz e registro da imagem no sensor (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

A velocidade de abertura do obturador é fortemente relacionada com a velocidade da RPA e sua altura de voo; portanto, quanto mais rápida e mais baixa (menor distância entre o drone e a superfície mapeada), mais rápida deverá ser a abertura do obturador, caso contrário será observado o efeito *rolling shutter* (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

O *rolling shutter effect* ocorre quando a relação da posição da câmera sobre o alvo que se pretende mapear foi alterada em decorrência do deslocamento da RPA, gerando uma imagem distorcida (PIX4D)

3.6.4 *Overlap*

Para construção da ortofoto é necessário que as imagens aéreas sejam captadas com uma determinada sobreposição (*overlap*). Essa sobreposição de fotos obtidas em um mesmo local permite que o algoritmo do *software* de processamento de imagens encontre automaticamente milhares de pontos comuns entre as imagens.

Cada ponto comum encontrado em uma imagem é chamado de ponto-chave. Quando dois pontos-chave em imagens diferentes são os mesmos, passam a ser denominados de pontos-chave correspondentes. Cada grupo de pontos-chave adequadamente combinados gerará um ponto 3D. Quando há alta sobreposição entre

duas imagens, a área comum capturada é maior e mais pontos-chave podem ser combinados. Quanto mais pontos-chave existem, mais precisamente os pontos 3D podem ser computados. Portanto, a regra principal é manter alta sobreposição entre as imagens (PIX4D, 2015a).

A sobreposição pode ser longitudinal (dentro da linha de voo) e lateral (entre as linhas de voo). No mínimo, o plano de voo deve prever um *overlap* longitudinal de 70% e lateral de 60%, no entanto, cada situação demandará um ajuste específico, conforme a figura 11 (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

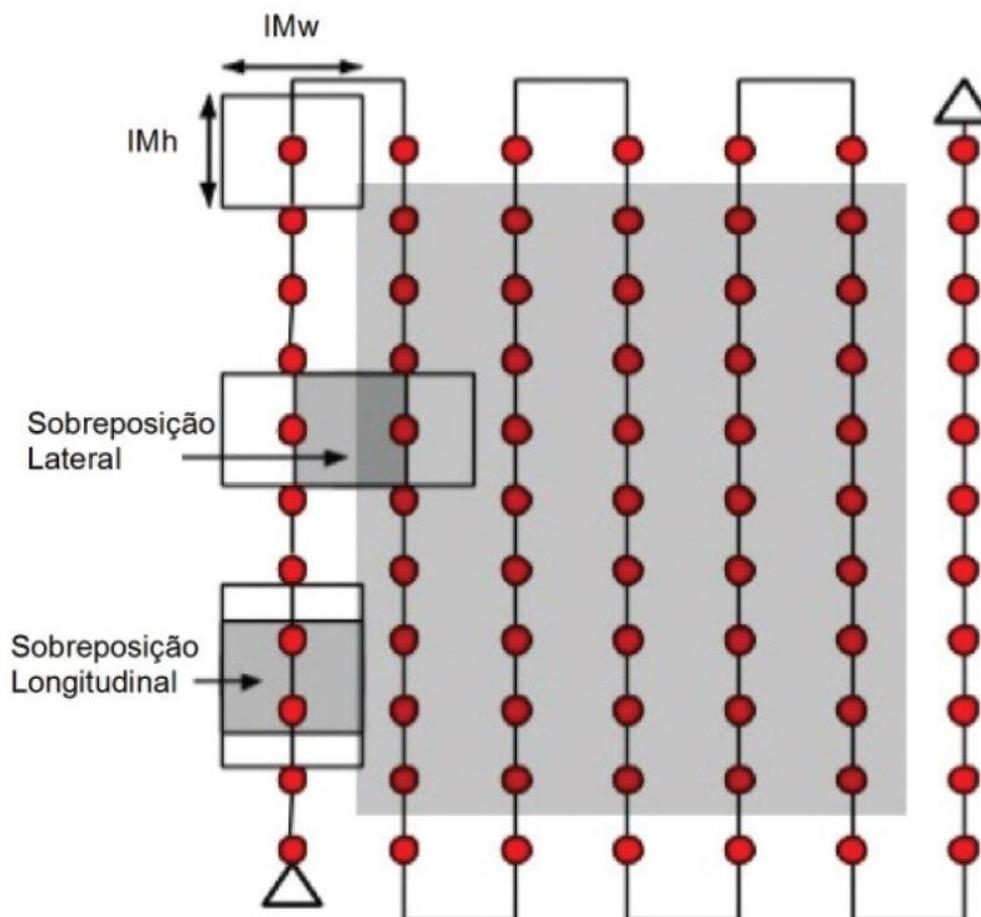


Figura 11: Representação de sobreposição das imagens de um levantamento aéreo.
FONTE: PIX4D.

3.6.5 Cálculo do Plano de Voo

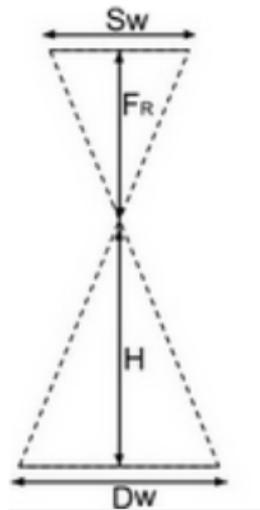
A definição dos parâmetros técnicos do plano de voo é o princípio para o sucesso da construção dos modelos estereoscópicos. Um dos pontos cruciais desta etapa é encontrar um GSD (*Ground Sampling Distance*) que seja compatível com a

superfície que se pretende mapear (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

O GSD é a representação do *pixel* de uma imagem em unidades de terreno, e está relacionado diretamente à altitude de voo (SILVA *et al.*, 2018). Considerando o interesse do mapeamento, deve-se previamente calcular a altura de voo para um GSD desejado e, então, derivar vários cálculos e informações úteis para a realização de um plano de voo exitoso visando à coleta de imagens para fotogrametria digital (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

Assim, voos mais altos, para uma mesma configuração de câmera, possibilitam obter ortofotos com maior GSD ou menor resolução espacial, enquanto voos baixos geram ortofotos com maior nível de detalhamento. Assim, o GSD é pré-estipulado de acordo com os objetivos do seu voo (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

Utilizando dados técnicos de acordo com as especificações das câmeras embarcadas das RPAs, tem-se os parâmetros de planos de voo recomendados em função dos objetivos do mapeamento. O cálculo inicial utiliza os seguintes dados: altura de voo para um dado GSD (H), distância longitudinal percorrida no solo por uma imagem (D_{long}), distância lateral percorrida no solo por uma imagem (D_{lat}) e área de abrangência de uma imagem (I_{area}). As fórmulas foram adaptadas de Pix4D (2015b). A figura 12 apresenta, esquematicamente, os parâmetros base para o cálculo da altura de voo para um determinado GSD.



S_w = largura real do sensor [mm]

F_R = distância focal real [mm]

H = altura de voo [m]

D_w = distância percorrida no solo por uma imagem na direção da largura (largura da pegada) [m]

Figura 12: Imagem base para cálculo da altura de voo para determinado GSD.

FONTE: PIX4D.

Alguns fabricantes de lentes fornecem a distância focal (F_{35}) no equivalente a 35 mm. Não é o equivalente a 35 mm, mas sim a distância focal real que deve ser usada no Pix4Dmapper. Para encontrar o comprimento focal real, alguns cálculos são necessários. No caso de uma proporção de 4: 3, a fórmula para a distância focal real F_R é dada por:

$$F_R = (F_{35} \cdot S_W) / 34,6 \quad (9)$$

Sendo:

F_{35} = distância focal que corresponde ao equivalente a 35 mm

F_R = comprimento focal real [mm]

S_W = a largura real do sensor

Sabendo-se que:

$$\frac{H}{F_R} = \frac{D_W}{S_W} \quad (10)$$

Logo, a altura de voo é dada por:

$$H = \frac{(F_R \cdot D_W)}{S_W} \quad (11)$$

A distância percorrida no solo por uma imagem na direção da largura (largura da pegada) é fornecida por:

$$D_W = \frac{(imW \cdot GSD)}{100} \quad (12)$$

Em que:

D_W = distância percorrida no solo por uma imagem [m] na direção da largura (largura da pegada)

imW = largura da imagem [pixel]

GSD = GSD desejado [cm / pixel]

Combinando as equações (11) e (12), a altura de voo é dada por:

$$H = \frac{(imW \cdot GSD \cdot F_R)}{(S_W \cdot 100)} \quad (13)$$

O resultado é dado em [m], considerando que o GSD está em [cm / pixel]. Para exemplificar, observa-se o cálculo da altura de voo para obter um GSD de 5 cm/pixel usando uma câmera com uma distância focal real de 5 mm e uma largura real do sensor de 6,17 mm. Assumindo que a largura da imagem é 4000 pixels e usando a equação (4), a altura de voo deverá ser 162 m.

3.6.6 Tempo ou Duração de Voo

A duração ou tempo de cada missão de voo para o mapeamento de uma superfície deve ser avaliada em função da capacidade de amperagem da bateria, vida útil da bateria e condições climáticas (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

Dependendo do modelo da RPA utilizado, o usuário terá alguns minutos a mais ou a menos na programação de seu tempo de voo. Apesar do fabricante indicar que seu equipamento apresenta uma autonomia de voo de até 28 minutos (para os modelos estudados), isso na prática não se concretiza (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

Sempre é prudente considerar um plano de voo entre 55% e 65% da capacidade da bateria, o que corresponde a um tempo de voo entre 14 a 16 minutos. O piloto remoto deve incluir nesse intervalo o tempo gasto para a decolagem e pouso da aeronave (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

Uma margem de segurança ampla para o tempo de voo permitirá que o piloto remoto enfrente possíveis intempéries do clima sem colocar em risco a aeronave e o patrimônio de terceiros presentes na localidade mapeada (FIGUEIRDO e FIGUEIREDO, 2018).

3.6.7 Aplicativos para planos de voo

Atualmente, tem-se no mercado diversos aplicativos para tablets e smartphones no sistema Android e IOS, destinados a criação de planos de voo. Na maioria dos aplicativos, os cálculos de velocidade, ajuste de câmeras, *overlap* lateral e longitudinal e altura de voo são realizados pelo sistema do aplicativo, porém nem sempre o plano proposto pelo sistema será o mais adequado. A realização de cálculos prévios servirá para estabelecer um novo plano de voo de acordo com a necessidade do usuário para o

mapeamento de um determinado local.

3.7 GNSS RTK

O GPS (*Global Positioning System*) é uma ferramenta que, através de satélites, consegue disponibilizar geoposicionamento. O GPS é essencial na aerofotogrametria; no entanto, somente o GPS não é capaz de dar a precisão exigida pelos projetos de aerofotogrametria já que carrega erros métricos. Assim, o sistema RTK (*Real Time Kinematic*) se mostra de extrema importância.

O posicionamento relativo em tempo real denominado *Real Time Kinematic* (RTK) tem sido muito empregado, pois permite ao usuário determinar a sua posição acurada em tempo real. Sua precisão chega à escala centimétrica (BARBOSA *et al.*, 2010). São utilizados dois receptores coletando dados continuamente no posicionamento RTK. Um dos receptores é chamado estação de referência (base) e fica posicionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas. O outro receptor (receptor móvel), localizado nas proximidades, coleta dados nos pontos de interesse do usuário para determinação da posição em tempo real (BARBOSA *et al.*, 2010).

O funcionamento RTK consiste basicamente em um par de Receptores GNSS com rádio interno ou rádio externo que formam um link. O receptor base, que fica estático (parado) em uma coordenada conhecida, envia correção do posicionamento via rádio para o receptor Móvel (ou *Rover*) que normalmente é instalado em um bastão e obtém a fixação da ambiguidade após uma série de algoritmos e cálculos, baseados no princípio da triangulação/trilateração. Após o levantamento, os dados devem ser tratados no processamento.

A figura 13 ilustra o funcionamento do sistema RTK. A partir da imagem, pode-se observar o receptor base representado pela letra “A” e o receptor móvel (*Rover*) representado pela letra B.

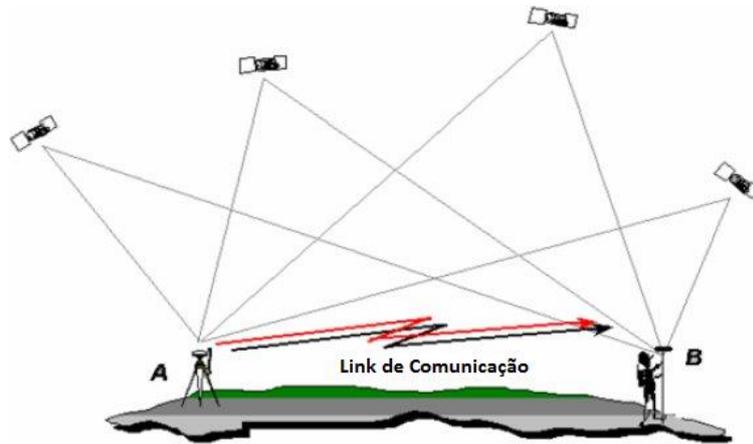


Figura 13: Imagem ilustrativa do funcionamento do GNSS RTK.
FONTE: CanadianGIS (2013).



Figura 14: Imagem ilustrativa do equipamento GNSS RTK.

Na prática do levantamento, sabe-se que o DRONE tem o GPS interno, no entanto, esse GPS pode proporcionar um erro métrico. Esse erro representa o deslocamento da ortofoto em relação ao eixo X, Y e Z. Para evitar este erro usa-se o RTK, que possibilita amarrar as coordenadas exatas. As imagens feitas pelo DRONE devem obrigatoriamente capturar esses pontos, para isto são necessárias marcações no chão. Em geral são feitas marcações com tapetes próprios ou usam-se tintas e marca-se com um “X” o local da coordenada. É feito cerca de uma marcação por hectare. Então, durante o processamento, são inseridas as coordenadas marcadas, amarrando estas e evitando os erros de georreferenciamento.

3.8 Produtos Gerados Pelo Processamento de Imagens

A partir do processamento de dados, três principais produtos cartográficos são gerados: o modelo 3D, o modelo digital de terreno e a ortofotomosaico.

3.8.1 Modelo 3D

A transição de sistemas gráficos computacionais de modelagem bidimensional (2D) para sistemas tridimensionais (3D) auxiliam projetos de engenharia nas mais diversas áreas. A tecnologia de modelos 3D georreferenciados estão sendo cada vez mais utilizados nos projetos de mineração, construção civil, projetos agrícolas, entre outros (BORJA e CASTRO, 2011).

Um modelo estrutural 3D é uma representação numérica de informações estruturais, trazidas de um ambiente real e introduzidas em um ambiente computacional. O modelo estrutural 3D é uma forma de visão simplificada da realidade. Na maioria dos campos de aplicação de geotecnologias, a modelagem 3D é um meio de obter modelos quantitativos de superfície e subsuperfície a partir das informações obtidas em campo. Esse Sistema de Informação Geológica 3D pode ser muito bem utilizado, por exemplo, no mapeamento do potencial mineral (CAUMON *et al.*, 2009).

Uma das questões de grande interesse das empresas do setor mineral é como definir as porções de minério do depósito que podem ser economicamente extraídas. A construção de modelo geológico em 3D a partir de dados de campo e subsuperfície é uma tarefa típica em estudos geológicos envolvendo avaliação de recursos naturais. Entender a organização espacial de estruturas subsuperficiais é essencial para a modelagem quantitativa de processos geológicos. Como não é possível acessar diretamente a subsuperfície, exceto através de escavações, túneis e poços, a maior parte dessa compreensão deve vir de vários processos de aquisição indiretos. A modelagem de subsuperfície 3D geralmente não é um fim, mas um meio de melhorar a interpretação de dados através da visualização de dados (CAUMON *et al.*, 2009; PASETTO, 2018).

3.8.2 Modelo Digital de Terreno

Os modelos em perspectiva são conhecidos como Modelos Digitais do Terreno (MDT) ou Modelos Digitais da Superfície (MDS) ou, ainda, Modelo Digital de Elevação (MDE). Todas essas expressões fazem referência à aquisição, processamento e utilização de dados digitais para a elaboração de modelos que representem, graficamente, o relevo da superfície terrestre (ASPIAZÚ *et al.*, 1990).

Os produtos gerados na elaboração do MDT podem ser aplicados para criação de mapas topográficos de altimetria, análise de geomorfologia, mapas de erosão, mapas de bacias hidrográficas, classificação de tipos de vegetação e apresentação tridimensional do terreno. Com o MDT é possível a criação de perfis transversais, elaboração e criação de projeto, cálculo de volume, delimitação de bacias e redes hidrográficas (COSTA, 2014).

A modelagem digital do terreno é um campo do conhecimento que cresceu bastante nos últimos tempos. Suas aplicações nas áreas que exigem uma visualização tridimensional do terreno são cada vez mais exigidas e bem aproveitadas. Em consequência disso, refinam-se os métodos fotogramétricos de extração dos modelos numéricos de elevação. Então, destaca-se a tecnologia fotogramétrica para estas tarefas, já que esta demanda menor trabalho de campo e menor esforço logístico (COELHO e BRITO, 2007).

3.8.3 Ortofoto e ortofotomosaico

As ortofotos são produtos fotogramétricos advindos de um processo chamado de retificação diferencial, no qual são eliminados os deslocamentos causados pela deformação perspectiva, pela inclinação da câmera fotográfica em relação ao plano principal da facada do objeto fotografado e pela variação de relevo do referido objeto Projeto de Levantamento Aéreo (COSTA e AMORIN, 2009).

Em uma ortofoto, as imagens produzidas são apresentadas em um sistema de projeção ortogonal, enquanto que, em uma câmera fotográfica comum, as imagens são apresentadas em perspectiva central. O centro perspectivo de uma ortofoto é deslocado para o infinito, portanto as projetantes são paralelas entre si, mantendo sua verdadeira posição ortográfica. As ortofotos são geometricamente equivalentes a mapas de linhas (SILVA, 2000; COSTA e AMORIN, 2009).

Ortofotomosaicos são produtos em que uma série de ortofotos individuais conjugadas são apresentadas juntas em uma imagem contínua, com escala uniforme e que pode ser utilizada como mapa (MIKHAIL *et al.*, 2001; SOUZA, 2018).

3.9 Sistemas Geodésicos de Referência

A Geodésia, ciência caracterizada por fazer o estudo da Terra como um todo ou parcialmente, é dividida em três ramos: Geodésia Física, Geodésia Geométrica e Geodésia por satélites. A Topografia é um ramo da Geodésia Geométrica, sendo que essas duas ciências estudam, em muitas vezes, os mesmos métodos, utilizando os mesmos instrumentos para determinar porções da superfície terrestre. Entretanto, a Topografia estuda apenas uma porção limitada da superfície terrestre, enquanto que a Geodésia admite uma maior dimensão estudando porções maiores que à limitada para a Topografia, ou seja, até mesmo a toda a Terra (COELHO JÚNIOR *et al.*, 2014).

Em qualquer atividade que exija posicionamento geodésico é importante que a definição e a realização dos sistemas de referência celeste e terrestre sejam apropriados, precisas e consistentes (BOCK, 1996 *apud* LIMA *et al.*, 2010).

O sistema de referência associado ao GPS é o WGS 84 que possui origem no centro de massa da Terra com os eixos cartesianos X, Y e Z. O elipsoide de referência é o WGS 84, o qual é um elipsoide de revolução geocêntrico que coincide com o elipsoide GRS 80 (MONICO, 2008 *apud* LIMA *et al.*, 2010).

A primeira realização do WGS 84 ocorreu com a utilização de 1591 estações determinadas pelo *Defense Mapping Agency* (DMA) com o uso das observações Doppler do sistema Transit atingindo precisão de um a dois metros (DMA, 1987 *apud* LIMA *et al.*, 2010). Outras duas atualizações foram feitas, sendo que as coordenadas determinadas na última atualização passaram a serem usadas no dia 20 de janeiro de 2002. Esta última atualização é a G1150, onde indica que o método empregado foi o GPS e 1150 é a semana GPS do período de observação (LIMA *et al.*, 2010).

O sistema WGS 84 sofre atualizações periódicas, através de levantamentos GPS, os quais atualizam os parâmetros que determinam o elipsoide de referência. No Brasil, o sistema de referência adotado é o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) que, em princípio, seria adotado em toda América do Sul, mas foi adotado somente pelo Brasil (LIMA *et al.*, 2010).

O elipsoide associado ao SIRGAS2000 é o GRS 80, permitindo, com isto, que se afirme que o WGS 84 e o SIRGAS2000 são compatíveis, não necessitando de conversão de coordenadas entre estes dois sistemas de referência (LIMA *et al.*, 2010).

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para este trabalho tem como fontes principais o estudo de caso da área selecionada, fontes de dados literários de projetos semelhantes e experiência em campo. Assim, obtém-se um método com substancialidade de informações para conclusão dos objetivos deste trabalho.

4.1 Área de estudo

Alguns critérios foram de suma importância para seleção da área de estudo. O primeiro critério de seleção foi de que a área deveria ter características que davam condições de comparação com um ambiente de mina de rocha ornamental. Em segundo plano estavam questões que permitiam que o voo fosse realizado de forma segura. Assim, foram procuradas áreas que contivessem locais abertos e planos para decolagem e pouso da aeronave, locais com certo distanciamento de construções civis e ausência de objetos que causassem grande interferência eletromagnética, já que este tipo de interferência pode resultar em perda de controle do DRONE e, conseqüentemente, a queda do mesmo.

Com esses critérios bem definidos foi selecionada uma área no município de Ouro Preto, a leste da Rodovia MG 129, próximo ao trevo para o distrito de Lavras Novas, conhecida como Serra da Máscara Perdida. A área escolhida apresenta um maciço de rocha aflorante, permitindo assim o desenvolvimento deste projeto.

O mapa de localização da área de estudo apresentado pela figura 15 foi realizado através do ArcGIS Pro. A área do polígono que representa a área de estudo possui cerca de 24,025 ha.

Para seleção da área de estudo, foram feitas visitas de campo e análises a partir de imagens de satélite obtidas pelo Google Earth Pro e ArcGIS Pro. Desta maneira, a área de estudo pode ser amplamente observada a partir das figuras 15, 16 e 17.

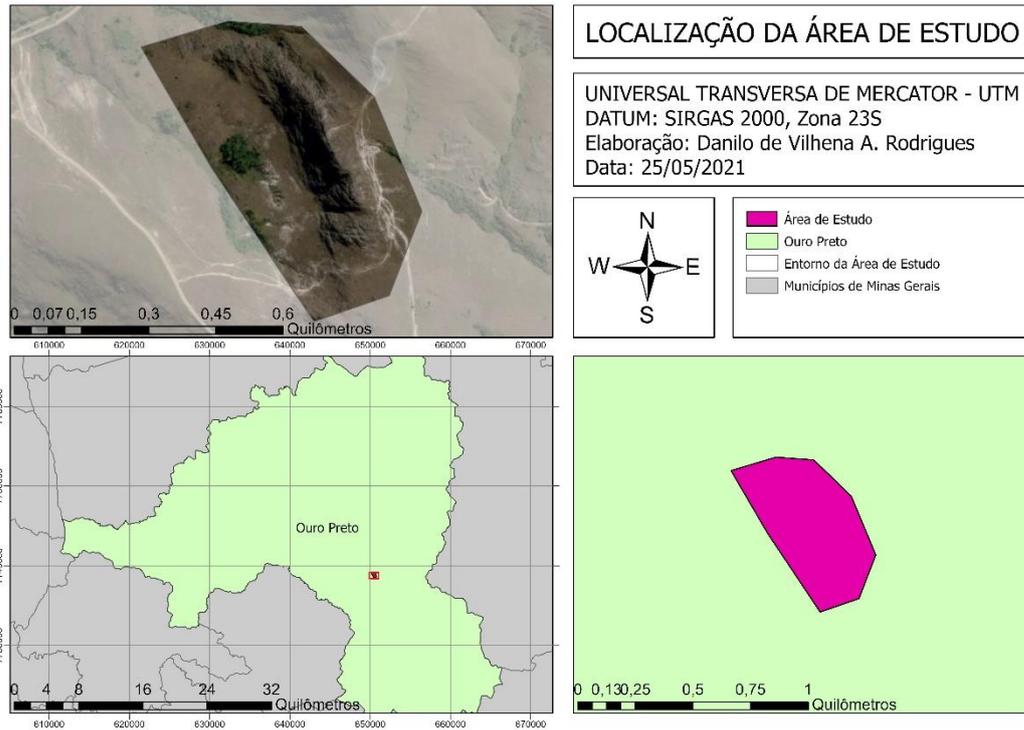


Figura 15: Mapa de localização da área de estudo.



Figura 16: Imagem de satélite da área de estudo.



Figura 17: Imagem de satélite com área de interesse hachurada (cor azul).

4.2 Levantamento Aéreo

O levantamento aéreo foi realizado na área já descrita anteriormente. Inicialmente foi analisado qual seria o local mais seguro para decolagem e pouso. A partir de visitas de campo, definiu-se que a área para esta tarefa seria a área hachurada indicada por seta na figura 18, sendo, esta, uma área plana e com grande raio de espaço livre. Cabe ressaltar que foram realizados quatro voos até chegar as configurações de voo que resultassem na qualidade ideal para o processamento de imagens.



Figura 18: Área de decolagem e pouso hachurada indicada pela seta.

Para definição da altura de voo, inicialmente foi calculada qual a diferença de altitude entre a área de decolagem e a parte mais alta do maciço rochoso. Para este cálculo foi utilizado o Google Earth Pro. A diferença de altitude encontrada foi cerca de 90 m. Para que aeronave fizesse o voo de forma segura, era necessário que ela decolasse e realizasse o voo acima de 90m. O voo que implicou a melhor qualidade foi realizado a uma altura de 140 m e, desta maneira, a aeronave sobrevoaria cerca de 50 m acima do maciço.

Todos os voos foram planejados e executados pelo aplicativo DroneDeploy. Optou-se por este *software* já que ele se encontra bem consolidado no mercado, possui a modalidade de voo automático, sendo esta a melhor opção para aerofotogrametria. É um aplicativo que atribui maior liberdade pra definição da poligonal que define as linhas de voo além de ser um aplicativo gratuito.

Foi utilizado a modalidade de voo autônomo para mapas e modelos 3D. A altura de voo de 140m, atribuiu um GSD teórico de acordo com o cálculo do DroneDeploy de 6,0 cm/px. A área do voo foi de cerca de 16 ha. O tempo estimado de voo foi de 13:23 minutos, fazendo-se necessária a utilização de apenas uma bateria.

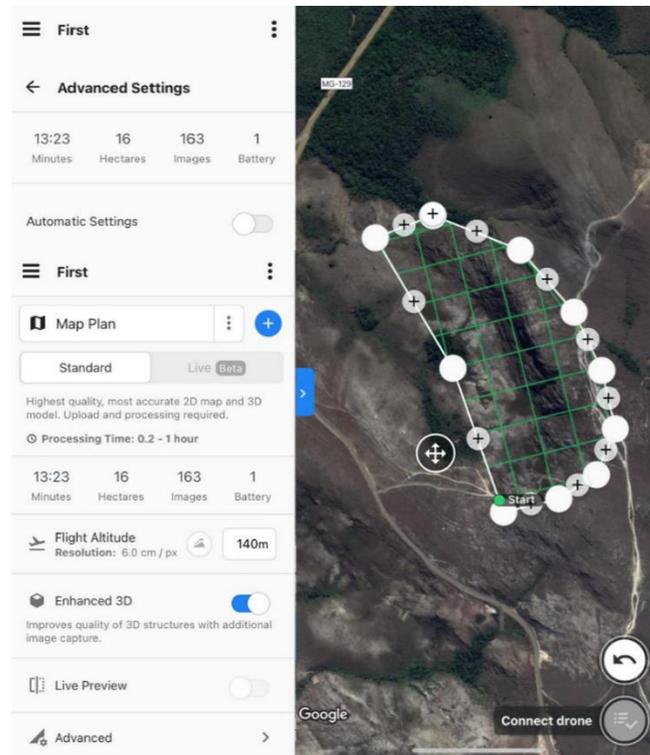


Figura 19: Interface de configuração de voo do Drone Deploy.

A sobreposição longitudinal estipulada foi de 75% e a lateral de 70%. A velocidade de voo foi de 15 m/s. Optou-se pelas linhas de voo em formato de grid; além disso, ajustou-se para que a aeronave fizesse a cobertura fotográfica nas margens da poligonal, atribuindo maior qualidade para o modelo 3D. Os parâmetros de exposição foram definidos da seguinte forma: a escala de número f foi de f/2,8, a ISO foi de 100, o tempo de exposição de 1/1000 segundos e o balanço de branco foi de 4900K. O foco foi configurado para que se ajustasse de forma automática.

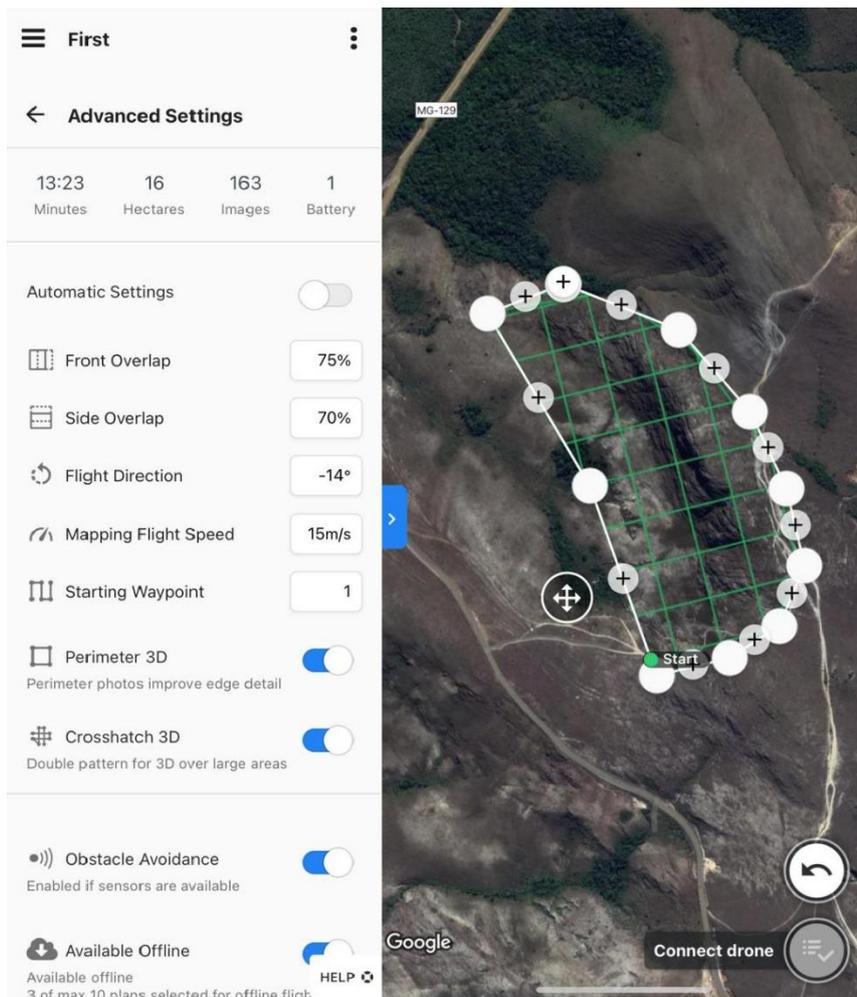


Figura 20: Interface das configurações avançadas de voo do Drone Deploy.

Para aquisição das imagens, foi utilizado VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), modelo DJI Phantom 3 Professional. Este equipamento conta com câmera de 12 Megapixels e GPS integrado. Além disso, foi necessária a utilização de um smartphone para conexão com o rádio controle e execução do plano de voo pelo aplicativo DroneDeploy. O voo que apresentou o melhor resultado foi realizado no dia 24 de junho por volta de 13:20 e foram captadas um total de 369 imagens.



Figura 21: Drone utilizado para o levantamento aéreo.

Para aumentar a acuracidade do georreferenciamento do projeto, seria interessante a utilização de pontos de controle. Para isto, seria necessário marcar em campo diversos alvos que fossem visíveis pelas fotografias e, então, coletar as coordenadas de cada alvo com o GNSS RTK. No entanto, devido a necessidade de aluguel de equipamento e elevados custos, descartou-se a utilização desta técnica.

4.3 Processamento das imagens

O processamento das imagens foi realizado em ambiente computacional. Para realização desta etapa, utilizou-se o *software* Agisoft Metashape. O computador utilizado para as operações de processamento e pós-processamento possui as seguintes configurações:

- Intel(R) Core(TM) I5-9300H CPU 2.40 GHz;
- 8GB de memória RAM – DDR4;
- NVIDIA GeForce GTX 1650 – memória dedicada de 4GB;
- SSD de 128Gb de capacidade;
- HD de 1TB de capacidade;
- Windows 10 Pro;
- Sistema Operacional de 64 bits.

O principal objetivo do processamento é a geração dos produtos fotogramétricos a partir das imagens coletadas em campo. Os principais produtos criados pelo processamento são: nuvem densa de pontos, modelo 3D, modelo digital de superfície, modelo digital de elevação e ortofotomosaico. A partir destes produtos, torna-se possível a geração de diferentes tipos de soluções na área da engenharia como curvas de nível do terreno, cálculo de volume, cálculo de área, análise do perfil topográfico do terreno, declividade do terreno entre outros.

O processamento das fotografias ocorreu na forma de um fluxo de trabalho que é pré determinado pelo *software*. Procurou-se utilizar as configurações de processamento que extraíssem o máximo de qualidade para modelos 3D de terrenos rochosos.

O primeiro passo consiste em importar as imagens. Assim, foram adicionadas as 369 imagens. No entanto, foi necessária a exclusão de 13 fotos, 11 delas por estarem posicionadas fora da área de interesse e 2 devido a falta de qualidade das imagens. O sistema de coordenadas associadas ao GPS do Drone é o WGS 84; desta maneira, faz-se necessária a conversão do sistema de coordenadas das imagens para o sistema UTM, Datum SIRGAS 2000, zona 23S (zona em que se encontra Ouro Preto). Assim, pôde-se seguir para próxima fase do processamento, o alinhamento das fotos.

Na etapa de alinhamento das fotos, a partir da identificação de pontos em comum nas diversas imagens, o *software* cria os *tie points* ou pontos de amarra. Através destes pontos criados, o *software* realiza o ajustamento posicional das imagens e cria a nuvem esparsa de pontos. Os parâmetros utilizados no alinhamento das fotos podem ser observados na figura 22.

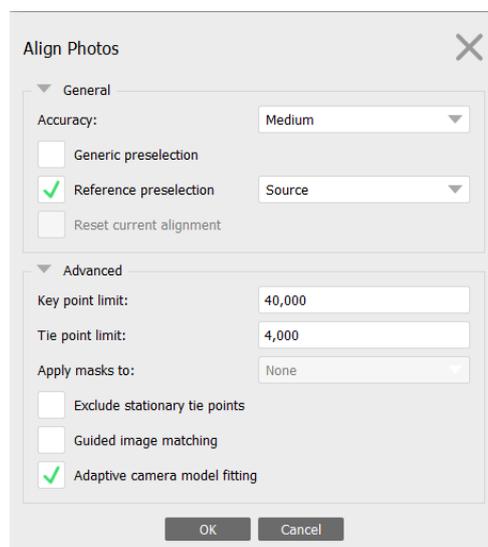


Figura 22: Parâmetros utilizados para o alinhamento das fotos.

A próxima etapa do processamento consiste na construção da nuvem densa de pontos. O conceito teórico utilizado nesta etapa é o de fototriangulação, que a partir dos pontos de amarra (pontos em comum) já criados, é gerado um número elevado de outros pontos, com alta precisão para que sejam utilizados para criação da malha triangulada. Esta metodologia possibilita um melhor detalhamento do relevo do terreno. Os parâmetros utilizados no *software* para a construção da nuvem densa podem ser notados na figura 23.

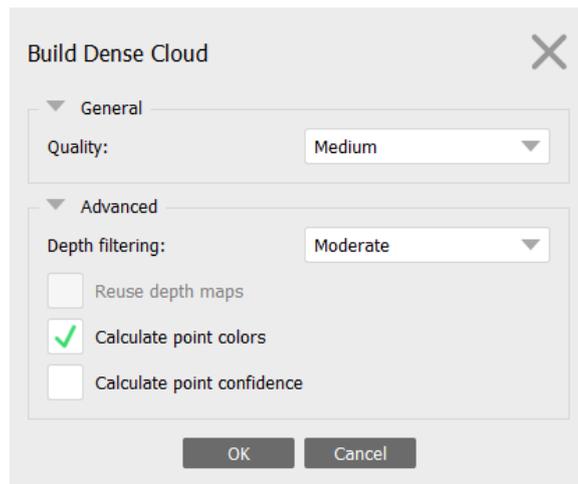


Figura 23: Parâmetros utilizados para a construção da nuvem densa de pontos.

Após, foi criada a malha triangular. Esta etapa tem por objetivo conectar os pontos criados pela nuvem densa de pontos para gerar uma rede de triângulos. Posteriormente, essa rede de triângulos é utilizada como suporte para criação dos modelos tridimensionais ou modelos digitais de superfície. Os parâmetros utilizados nesta etapa podem ser analisados na figura 24.

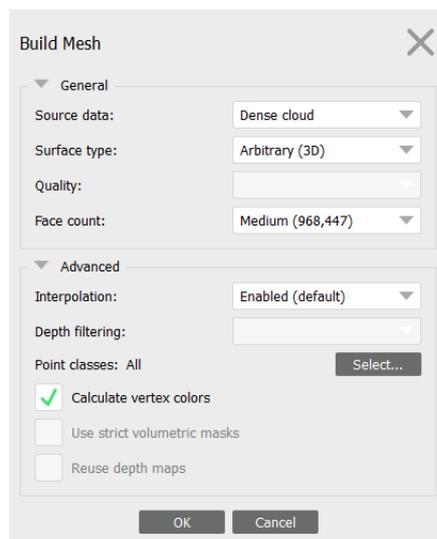


Figura 24: Parâmetros utilizados para construção da malha triangular.

A próxima etapa do trabalho, constituiu-se da texturização do modelo ou construção do modelo 3D propriamente dito. Os parâmetros utilizados podem ser observados na figura 25.

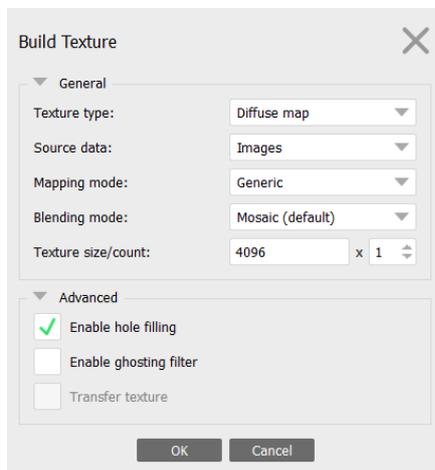


Figura 25: Parâmetros para construção da textura.

Em seguida, foi gerado o Modelo Digital de Elevação. Este produto fotogramétrico é uma representação 2D da superfície do terreno, onde, as cores quentes representam a maiores altitudes e, as cores frias, as menores altitudes. Além disso, em cada pixel da imagem é atribuída uma coordenada com os valores de latitude, longitude e altitude. Os parâmetros utilizados para a criação do MDE podem ser observados na figura 26.

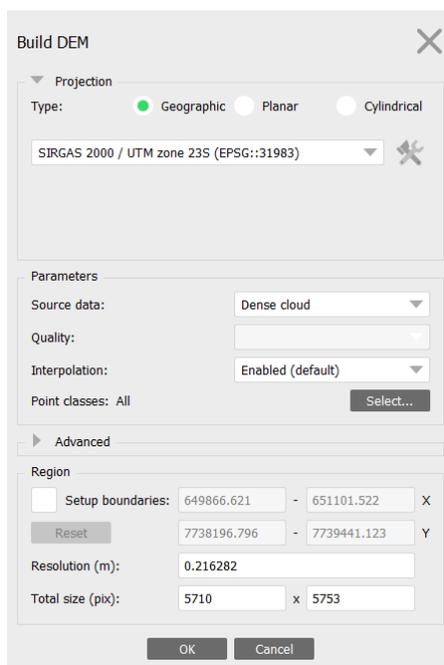


Figura 26: Parâmetros para construção do DEM.

A última etapa realizada neste projeto foi a criação do mosaico de ortofoto ou ortofotomosaico. Como já mencionado neste trabalho, em uma ortofoto, as imagens produzidas são apresentadas em um sistema de projeção ortogonal, ou seja, as ortofotos são geometricamente equivalentes a mapas de linhas. Os parâmetros utilizados no *software* para criação da ortofotomosaico podem ser analisados na figura 27.

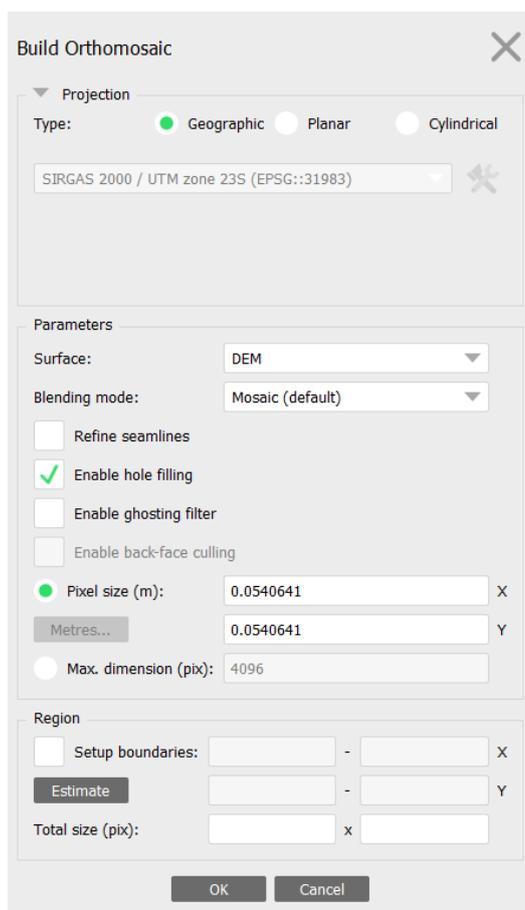


Figura 27: Parâmetros para construção da ortofotomosaico.

4.4 Estimativa do volume

Foram realizadas quatro diferentes estimativas de volume, sendo três delas originadas do modelo digital de elevação (DEM) e, a quarta, originada dos produtos fotogramétricos tridimensionais (nuvem densa de pontos, malha triangular e modelo texturizado).

Para realização do cálculo a partir do DEM foi necessário delimitar o objeto de interesse através de um arquivo vetorial (*shapefile*). Observa-se na imagem da figura 28 o *shapefile* criado para delimitação da área de interesse.

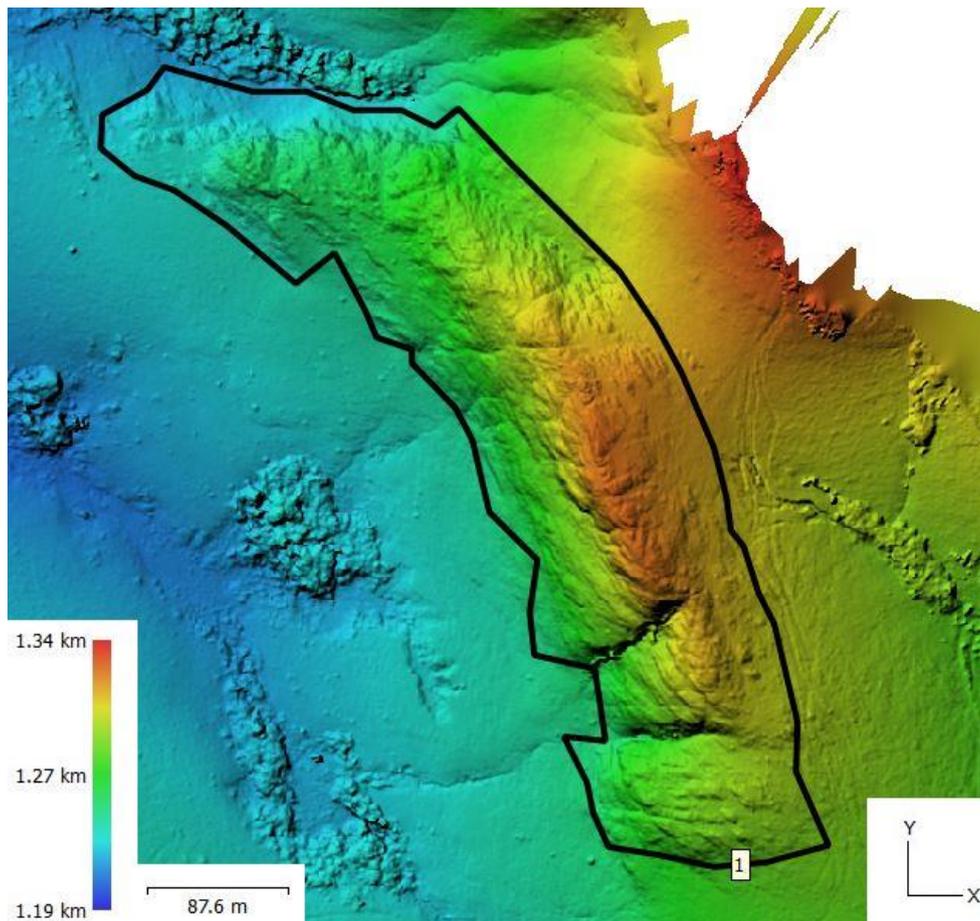


Figura 28: Delimitação da área de interesse para cálculo do volume.

Com o *shapefile* criado no DEM, tornou-se possível a utilização de três diferentes metodologias para o cálculo de volume. As metodologias disponíveis são *best fit plane* (melhor plano de ajuste), *mean level* (plano de nível médio) e *custom level* (plano de nível customizado) como observa-se na figura 29.

Para todas estas opções, o *software* cria um plano que é utilizado para o cálculo do volume. O *software* estima o volume acima e abaixo do plano criado. Esta metodologia pode ser melhor observada na figura 30. Além disso, o *software* determina o volume total, que é resultado da subtração do volume acima pelo volume abaixo.

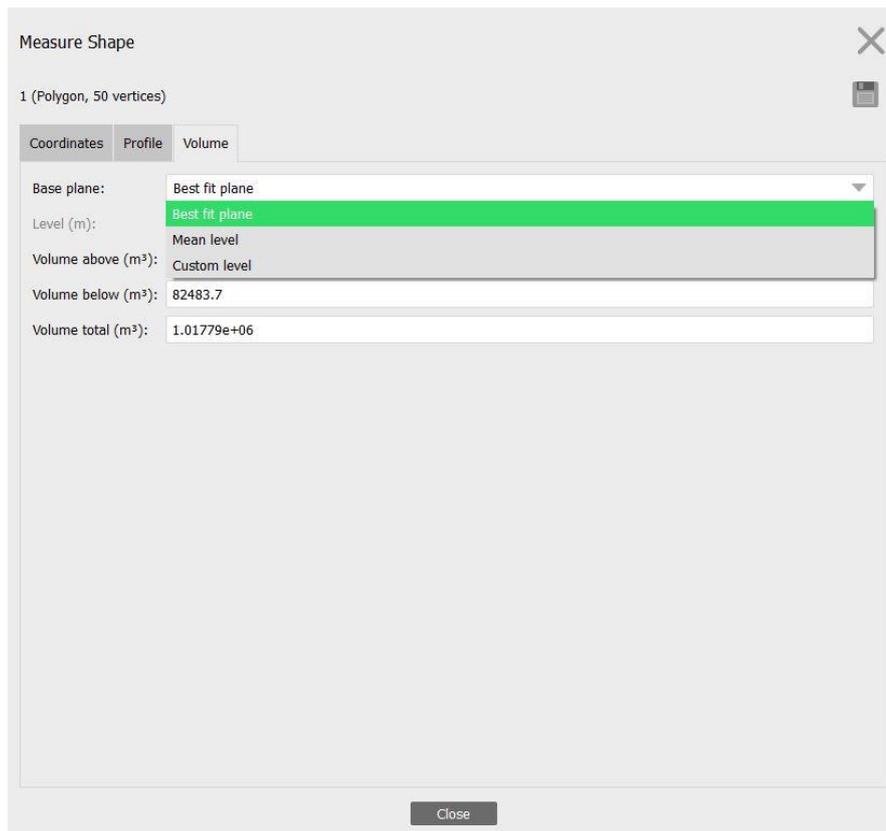


Figura 29: Opções para cálculo de volume a partir do DEM ou Ortofotomosaico.

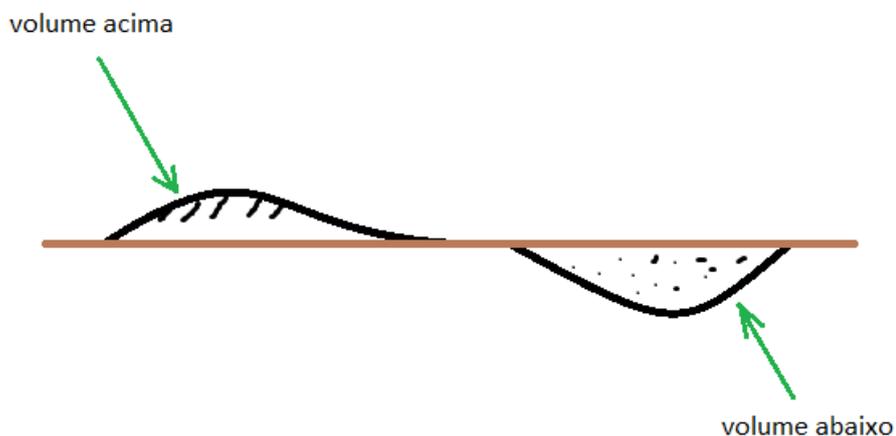


Figura 30: Plano base para cálculo de volume.

Na opção *best fit plane*, o plano base é criado a partir das altitudes dos vértices da poligonal delimitadora, ou seja, o *software* cria um plano que melhor se ajusta às altitudes destes vértices. O plano de melhor ajuste é obtido de forma a minimizar a distância ortogonal entre o plano e cada vértice do polígono. Segundo informações do suporte Agisoft, o plano de melhor ajuste considera as coordenadas X, Y e Z de cada vértice e, desta forma, o plano dificilmente será paralelo ao plano X e Y.

Na opção *mean level* cria-se uma média das altitudes, ou seja, calcula-se a média das coordenadas Z dos vértices e cria-se um plano a partir dessa média. O plano criado será paralelo ao plano X e Y. Com esse plano obtido, o cálculo de volume acima e abaixo é realizado.

Na opção *custom level* é possível inserir um valor de cota onde será criado um plano também paralelo ao plano X e Y. Com esse plano obtido, a estimativa do volume acima e abaixo é realizado.

A fim de se fazer uma análise de cada metodologia, foram utilizadas as três formas neste trabalho. Na opção *mean level*, a média de altitude encontrada pelo *software* foi de 1259.983 m e, por este motivo, esta foi a cota utilizada no *custom level*.

Para realização do cálculo de volume a partir dos produtos fotogramétricos tridimensionais, alguns passos devem ser seguidos. Nesta metodologia, inicialmente, deve-se selecionar área de interesse na nuvem densa de pontos e então atribuir uma classificação a essa área selecionada, como pode ser observado na figura 31. A seguir, todos os pontos que estão fora da área classificada são excluídos como pode ser notado na figura 32. Os pontos que permanecem são usados para criar uma nova malha triangular e um novo modelo tridimensional como pode ser observado nas figuras 33 e 34, respectivamente. Para que seja possível o cálculo de volume, o modelo tridimensional deve ser transformado em um bloco sólido, ou seja, todos os espaços devem ser preenchidos. A metodologia utilizada pelo *software* para criação de um bloco sólido passa por duas etapas: primeiramente, há o preenchimento dos espaços vazios da malha triangular com diversas pirâmides, em que as faces são formadas por triângulos (este processo pode ser observado na figura 35); posteriormente, o *software* preenche o interior das pirâmides, transformando a malha em um bloco sólido, como pode ser notado nas figuras 36 e 37. Para o cálculo do volume, utiliza-se a ferramenta “*measure area and volume*”. Conceitualmente, o cálculo do volume é realizado a partir da soma do volume de todas as pirâmides que foram utilizadas para formar o bloco sólido.



Figura 31: Classificação da área de interesse na nuvem densa de pontos.

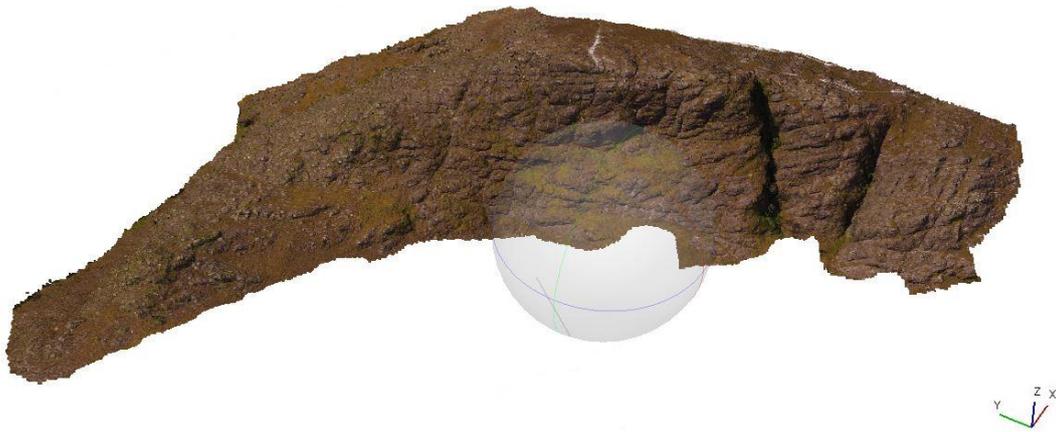


Figura 32: Corte da nuvem densa de pontos classificada.



Figura 33: Malha triangular formada pela nuvem de pontos cortada

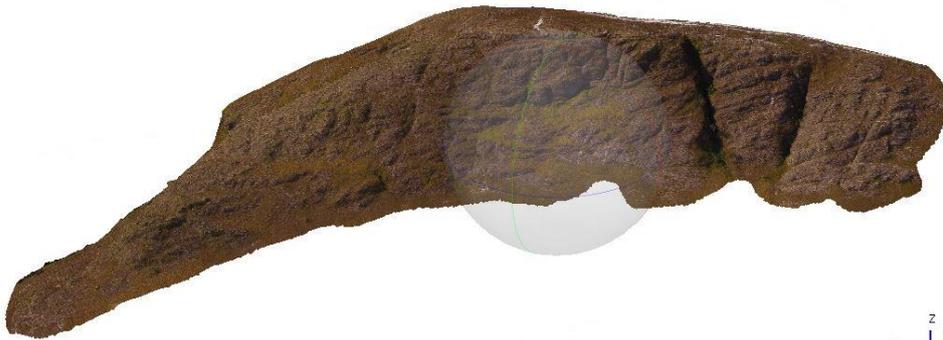


Figura 34: Modelo tridimensional da área de interesse.

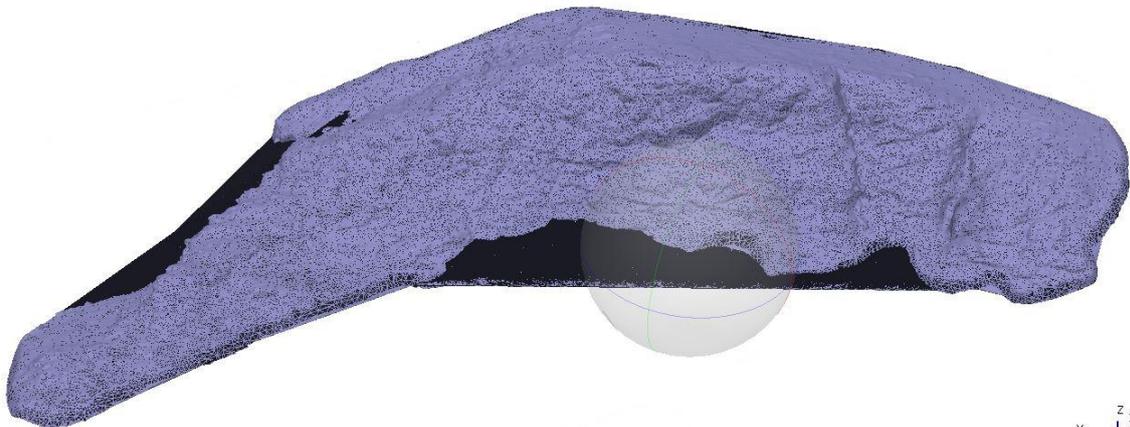


Figura 35: Malha triangular preenchida com pirâmides.

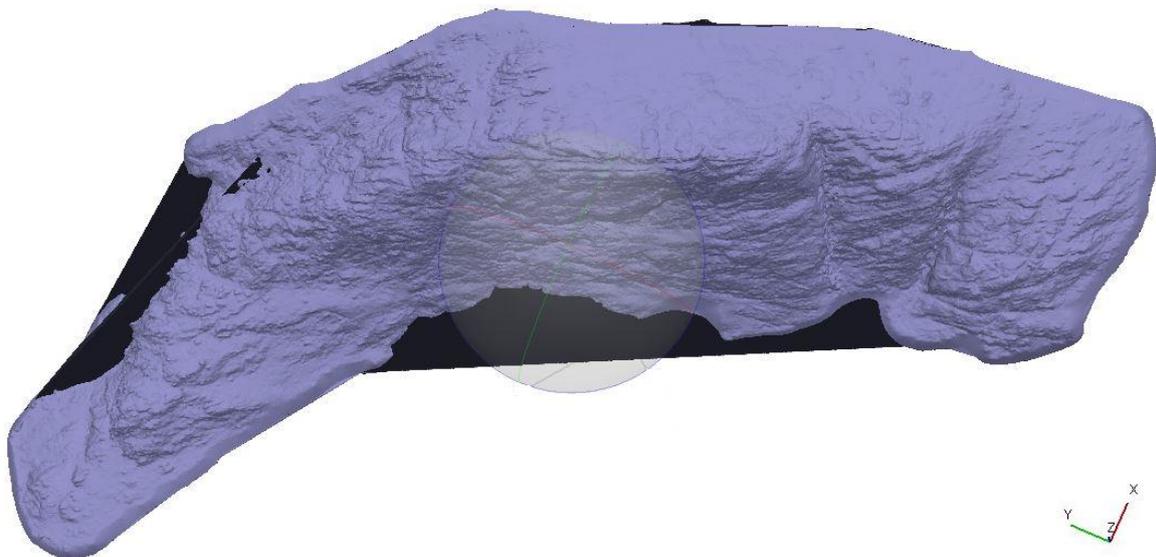


Figura 36: Bloco sólido, vista superior.

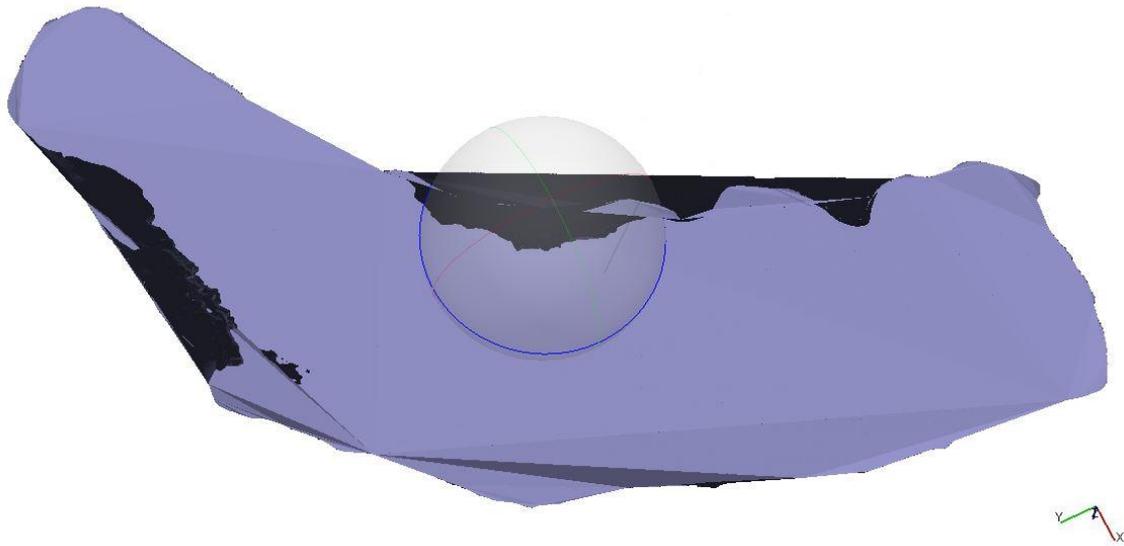


Figura 37: Bloco sólido, vista inferior.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação deste tópico está organizada de forma que possa ser analisada e discutida as principais etapas descritas na metodologia, sendo apresentados o levantamento aéreo, o processamento das imagens com a geração dos produtos fotogramétricos, o cálculo de volume e a topografia. Serão feitas análises com foco na técnica aerofotogramétrica e nas técnicas utilizadas para o cálculo de volume.

5.1 Levantamento aéreo

O levantamento que implicou a melhor qualidade nas imagens foi realizado dia 24 de junho as 13:20 e resultou em um total de 369 imagens captadas. O objetivo da apresentação das figuras 34 a 37 é trazer perspectiva da qualidade atingida pelas fotografias deste levantamento.



Figura 38: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 39'', Longitude = 43° 33' 24'' e Altitude = 1374,81 m.



Figura 39: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 35'', Longitude = 43° 33' 25'' e Altitude = 1374,91 m.



Figura 40: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 34'', Longitude = 43° 33' 22'' e Altitude = 1375,01 m.



Figura 41: Fotografia tomada no levantamento Aéreo. Drone posicionado nas seguintes coordenadas: Latitude = 20° 26' 32'', Longitude = 43° 33' 22'' e Altitude = 1375,11 m.

Observa-se das imagens que os parâmetros de exposição escolhidos geraram imagens de boa qualidade. O balanço de branco, que é a forma como a câmera interpreta a temperatura da luz, permitiu que as imagens apresentassem colorações bem próximas da realidade. A configuração ideal destes dois parâmetros são pontos-chaves para um bom levantamento e foram os que trouxeram grande dificuldade para este projeto.

Outro ponto a se destacar é o clima. Para este tipo de levantamento é necessário que o clima esteja completamente ensolarado ou completamente nublado. Desta maneira, os parâmetros de exposição e balanço de branco podem ser configurados de forma mais assertiva, concretizando-se em um levantamento mais realista, sem diferença de qualidade e coloração entre as imagens. No entanto, observou-se que dias ensolarados implicam levantamentos de maior qualidade, já que a luminosidade influencia diretamente na qualidade de cada fotografia.

Outro parâmetro que necessita de esforço logístico é a altura de voo, já que é um parâmetro que engloba questões de qualidade do levantamento, segurança de voo e gestão da bateria do DRONE. Voos mais baixos implicam maior qualidade dos produtos gerados pelo processamento, no entanto, podem colocar o DRONE em risco de colisão

com estruturas do local de estudo. Além disso, voos mais baixos necessitam de mais linhas de voo para que se concretize a sobreposição desejada das imagens, resultando em voos com maior duração, fazendo-se necessário a utilização de mais de uma bateria em alguns casos. Em contrapartida, voos mais altos implicam menor qualidade, porém menor risco de colisão com estruturas do local de estudo, além de exigir menor tempo de voo. Porém, voos muito altos podem levar risco à aeronaves de terceiros que podem vir a sobrevoar o local no mesmo momento do seu levantamento, como helicópteros.

Outro aspecto que demandou atenção foi a definição da poligonal que fixa as linhas de voo. O ideal é que a poligonal cubra toda área de interesse com certa sobra. No entanto, poligonais com áreas muito extensas exigem maior tempo de voo e podem prejudicar a gestão das baterias.

5.2 Processamento das Imagens

Como já mencionado neste trabalho, o processamento segue um fluxo de trabalho. O alinhamento das fotos, primeira etapa do processamento, resulta na nuvem esparsa de pontos que é constituída pelos pontos de amarra. Foram encontrados um total de 143.806 pontos de amarra, gerando a nuvem de pontos esparsa que pode ser observada na imagem da figura 38.



Figura 42: Nuvem esparsa de pontos.

Na sequência, gerou-se a nuvem densa de pontos, que pode ser analisada a partir

das figuras 39 e 40. Esta etapa foi realizada em resolução média, resultando em uma nuvem 14.525.777 pontos gerados. Além disso, observa-se boa qualidade do produto gerado, já que apenas com os pontos da nuvem gerada é possível notar grande semelhança com a estrutura original do local de estudo.



Figura 43: Nuvem densa de pontos.

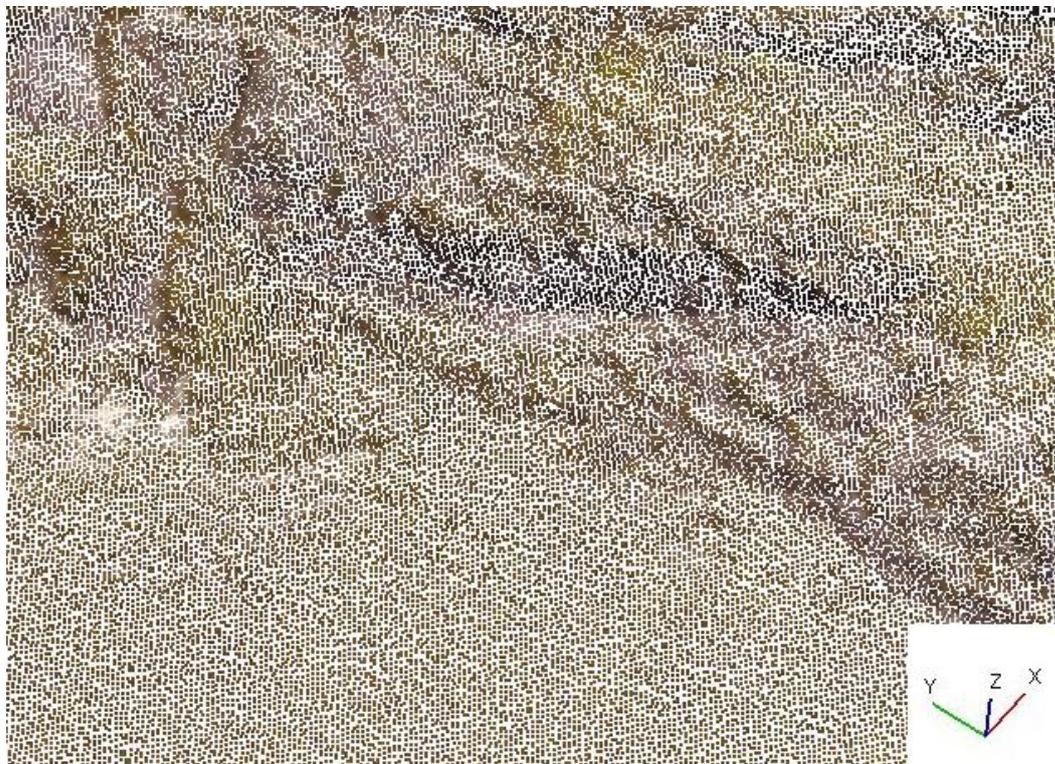


Figura 44: Corte da nuvem densa de pontos com aproximação para visualização dos pontos.

Na sequência, foi realizada a construção da malha triangular. Esta etapa resultou em uma malha com 968.447 faces de triângulos, utilizando-se também da

resolução média para seu desenvolvimento. A malha triangular pode ser observada nas figuras 41 e 42.

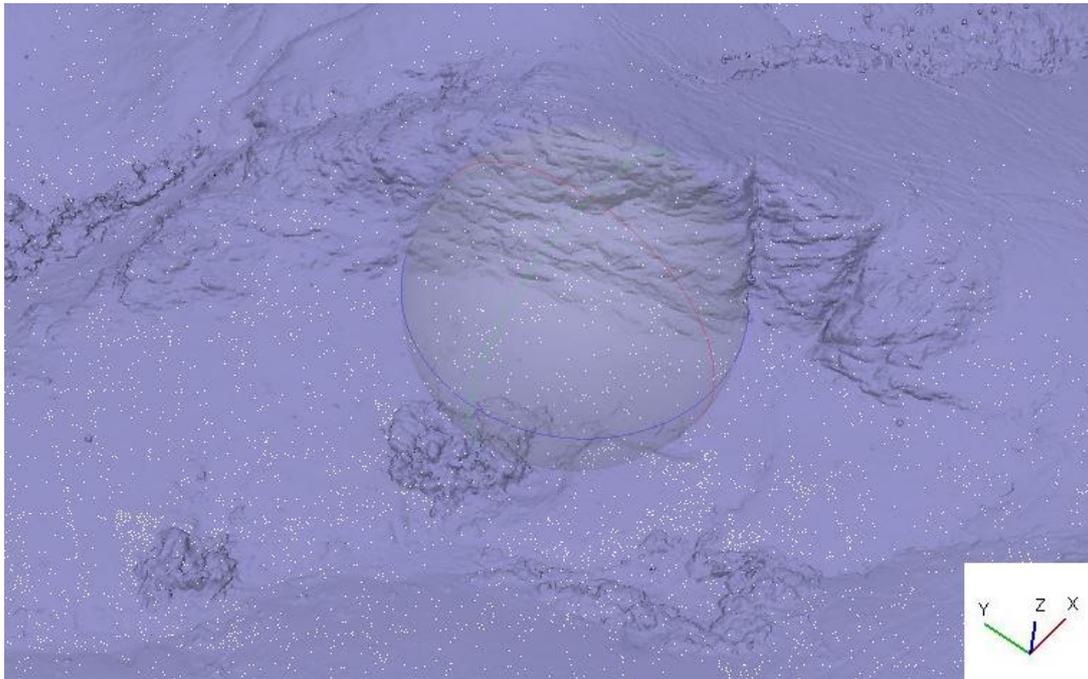


Figura 45: Malha triangular.

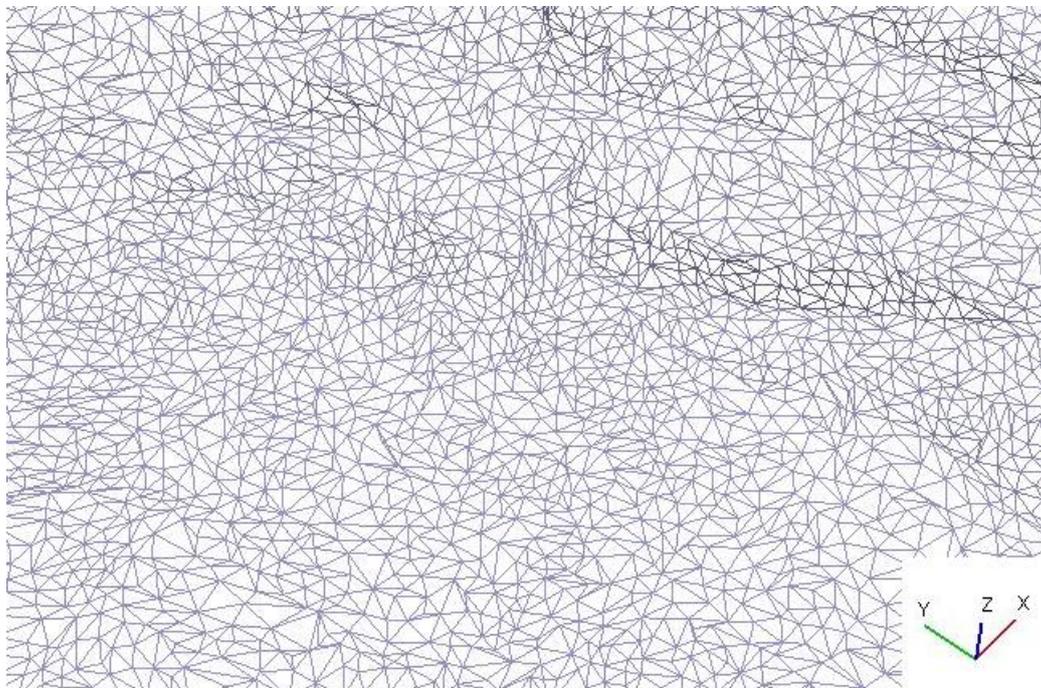


Figura 46: Corte malha triangular com aproximação para visualização dos triângulos.

Após a realização da malha triangular, dois outros produtos são gerados: o modelo sólido e o modelo sombreado, que podem ser observados nas figuras 43 e 44,

respectivamente.

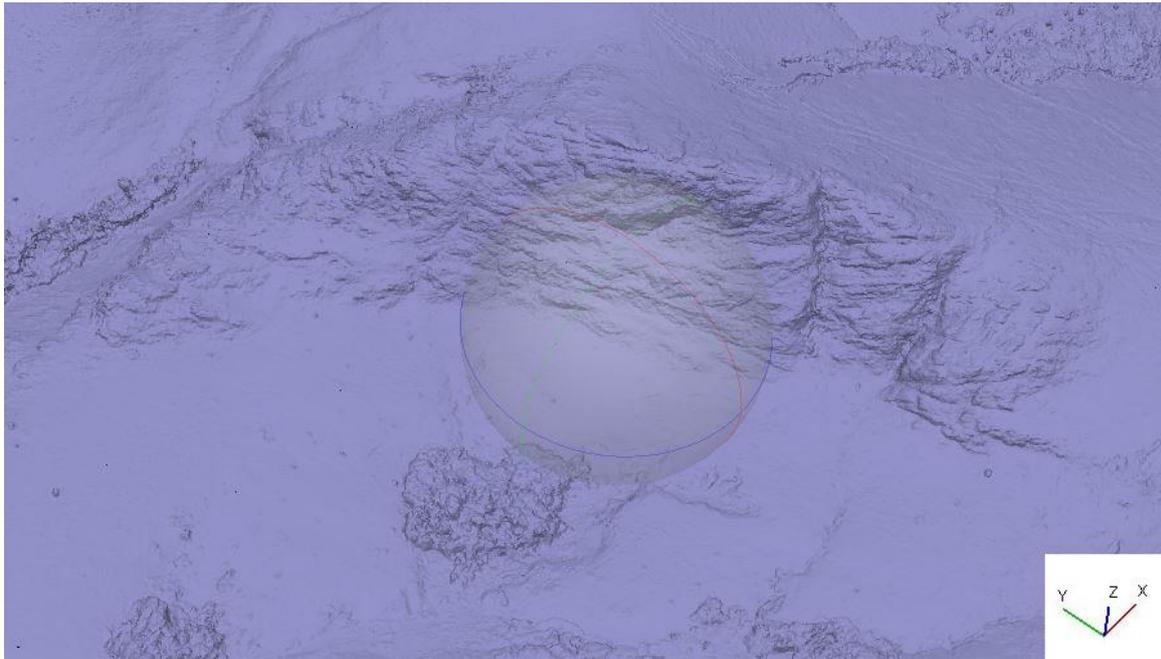


Figura 47: Modelo sólido.



Figura 48: Modelo sombreado.

Na sequência foi realizado a texturização das imagens que resulta em uma representação mais realista do espaço objeto, além de deixar algumas estruturas do maciço mais visíveis e com maior nível de detalhe. O resultado da texturização pode ser observado nas imagens das figuras 45, 46 e 47.



Figura 49: Modelo texturizado vista superior.



Figura 50: Modelo texturizado vista frontal.

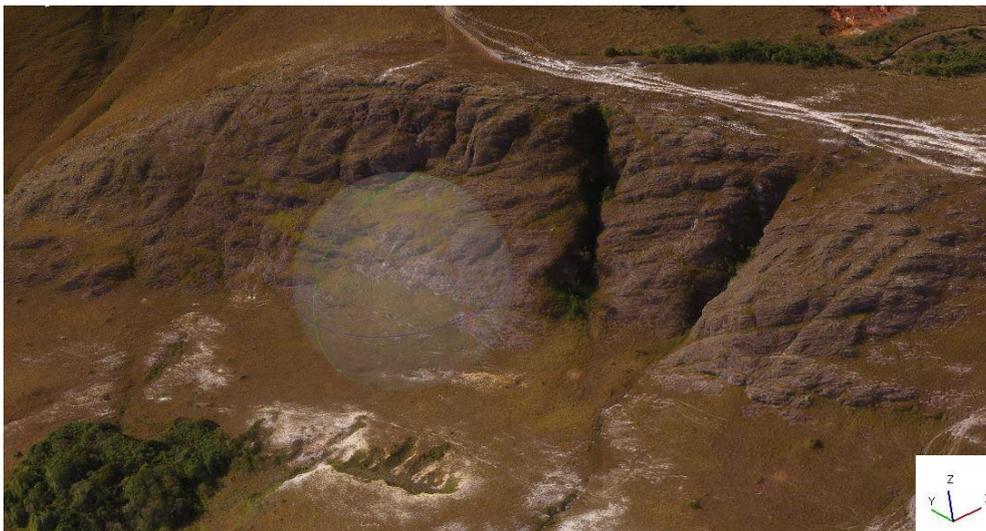


Figura 51: Modelo texturizado vista frontal com aproximação.

Na sequência, foi gerado o DEM, que é uma representação 2D do relevo da área

de estudo. As cores quentes representam as maiores altitudes e, as cores frias, as menores altitudes em relação ao nível do mar. Além disso, são atribuídos valores de altitude longitude e altitude em cada *pixel* da imagem. Neste levantamento, o GSD calculado atingido para o DEM foi de 21,6 cm/pix, ou seja, no DEM cada *pixel* representa 21,6 cm de área.

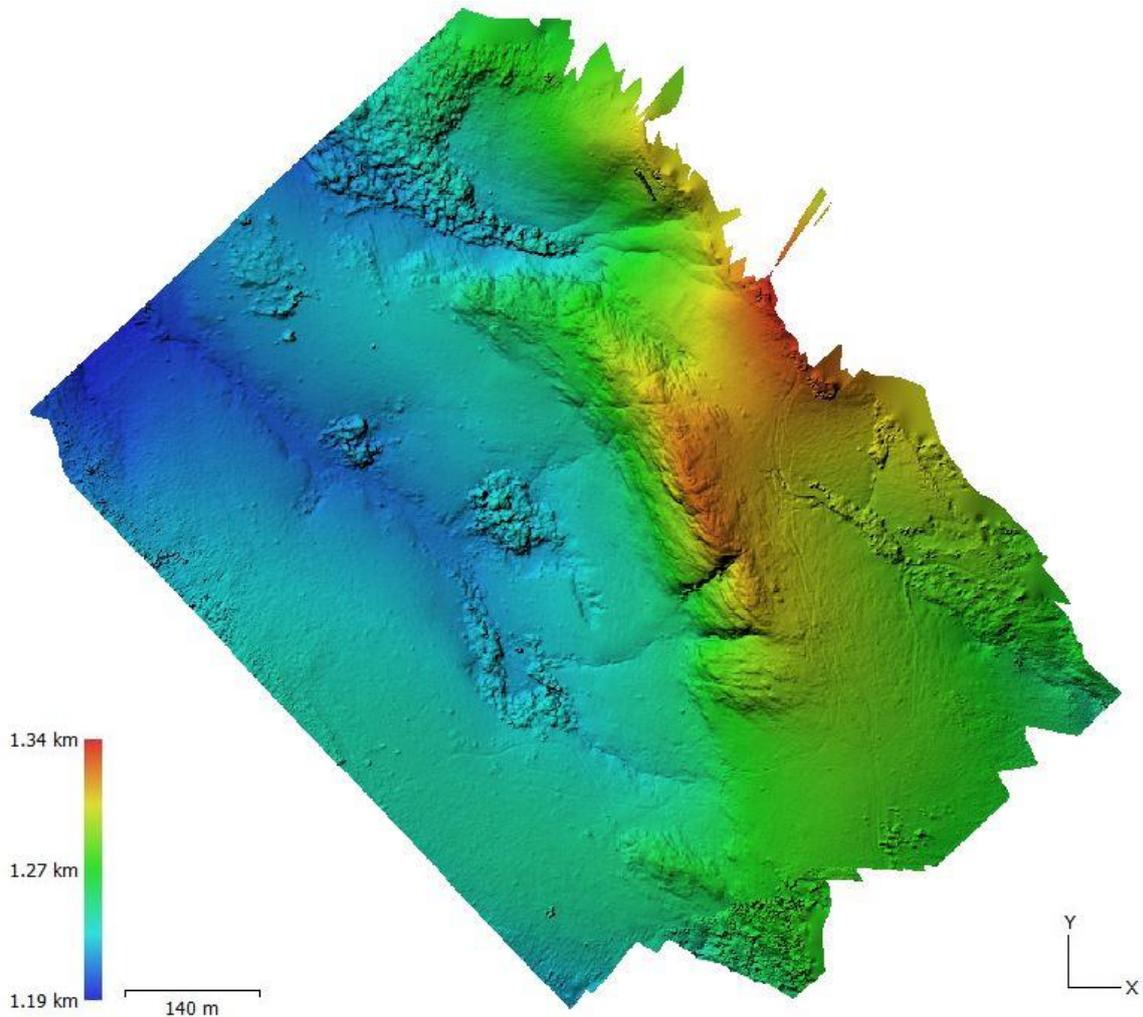


Figura 52: Modelo Digital de Elevação.

A última etapa do processamento foi a de realização da ortofotomosaico. Neste projeto, a ortofotomosaico foi concretizada com um GSD calculado de 5,41cm/pix.

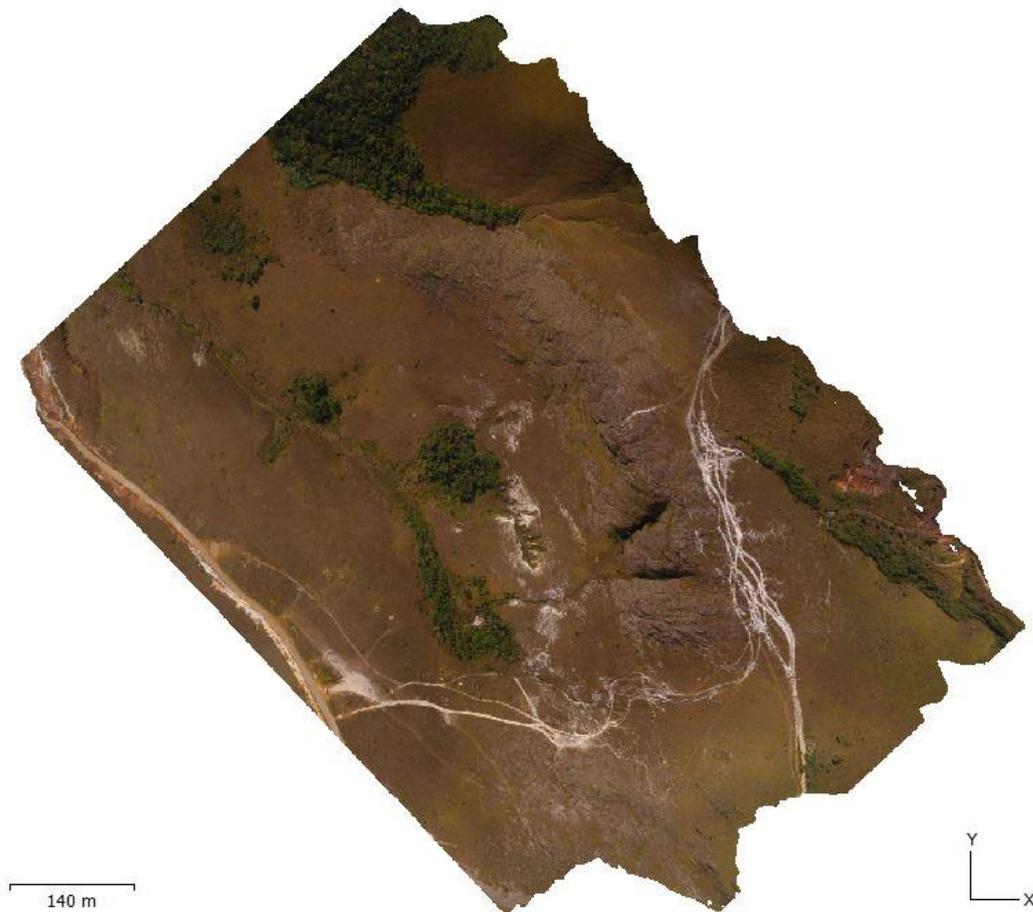


Figura 53: Mosaico de ortofoto.

Relatório do processamento

O *software* utilizado é capaz de gerar um relatório com diversas informações relevantes a qualquer projeto de aerofotogrametria. Para este trabalho, será apresentado as informações referentes a sobreposição das imagens e do erro de posicionamento estimado.

A figura 50 mostra o posicionamento de cada imagem, ou seja, onde foi tomada cada imagem e mostra, também, o nível de sobreposição das imagens. Por esta imagem, observa-se um bom nível de sobreposição exceto pelas extremidades (fora da área de interesse) e uma pequena parte central.

A figura 51 representa o posicionamento de cada imagem e mostra a estimativa de erro de posicionamento de cada imagem, enquanto a tabela 1 mostra a média dos erros de posicionamento em cada eixo e a média do erro total. O erro médio em X representa os erros ao leste; Y, erros ao norte e, Z, erros na altitude.

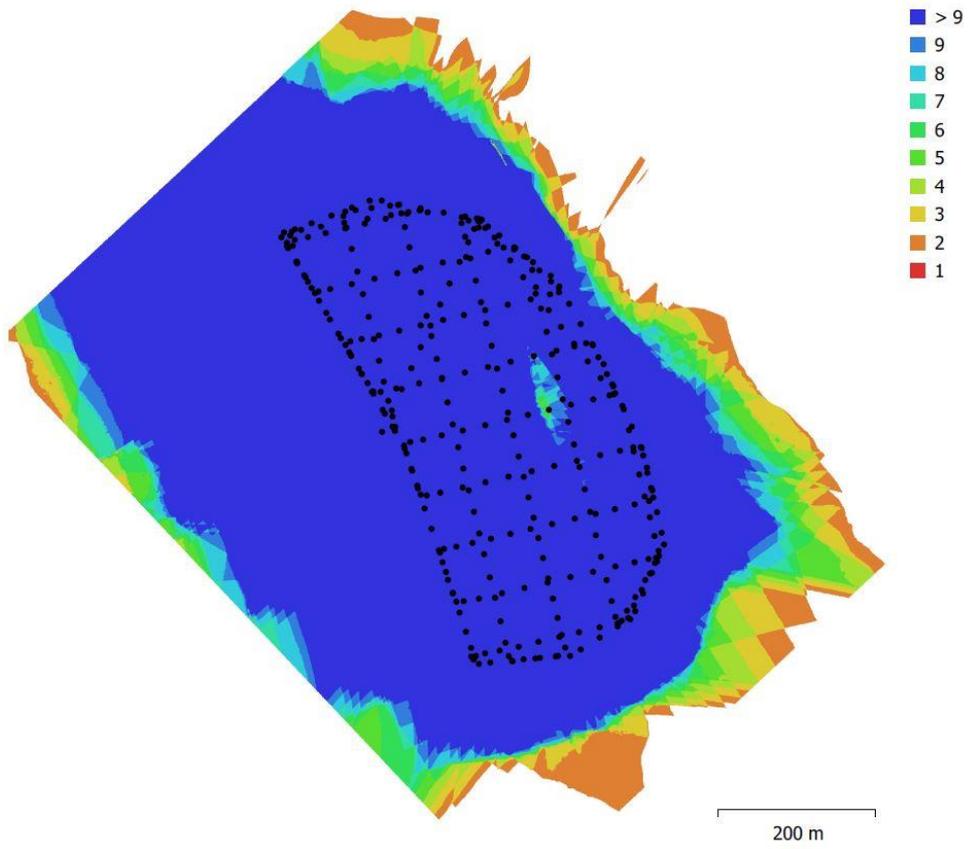


Figura 54: Posicionamento e sobreposição das imagens.

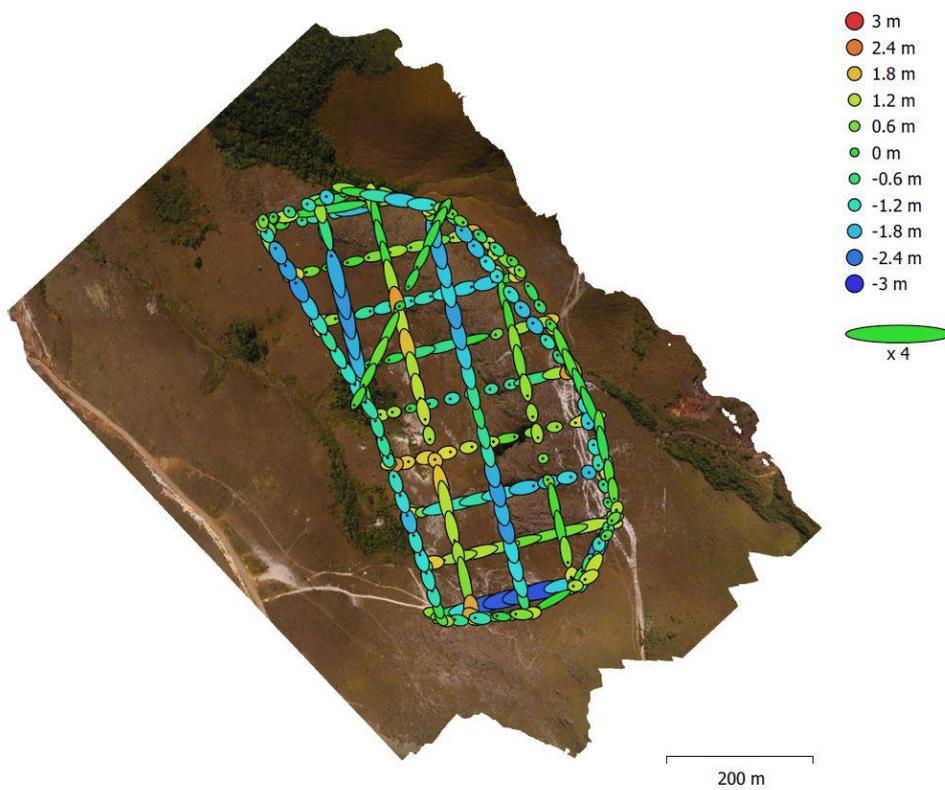


Figura 55: Posicionamento e erro estimado.

Tabela 1: Erro médio de posicionamento da câmera.

X (m)	Y (m)	Z (m)	Total (m)
3,60564	4,26369	1,11575	5,69426

5.3 Estimativa do volume

A partir do polígono de delimitação criado no DEM, foram feitos os cálculos pelos métodos *Best Fit Plane*, *Mean Level* e *Custom Level*. Os resultados encontrados para cada um deles são apresentados nas tabelas 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 2: Resultados encontrados pelo método *best fit plane*.

Perímetro (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)		
		Above	Below	Total
1585,6	76423,0	1100280	82483,7	1017796,3

Tabela 3: Resultados encontrados pelo método *mean level*.

Perímetro (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)		
		Above	Below	Total
1585.6	76423.0	1840010	334024,4	1505985,6

Tabela 4: Resultados encontrados pelo método *custom level*.

Perímetro (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)		
		Above	Below	Total
1585.6	76423.0	1839990	334030,9	1505959,1

Observa-se maior proximidade entre os valores de volume total do *mean level* e *custom level*, com uma diferença de cerca de 0,0018%. No entanto, nota-se uma diferença de cerca de 32% destes dois métodos para o método *best fit plane*.

Esta diferença pode ser atribuída às características de cada método. Na opção *best fit plane*, o *software* cria um plano a partir das altitudes dos vértices da poligonal delimitadora, ou seja, o *software* cria um plano que melhor se ajuste as altitudes destes vértices. O plano de melhor ajuste é obtido de forma a minimizar a distância ortogonal entre o plano e cada vértice do polígono. Segundo informações do suporte Agisoft, o plano de melhor ajuste considera as coordenadas X, Y e Z de cada vértice e, desta forma, o plano dificilmente será paralelo ao plano X e Y.

Na opção *mean level* cria-se uma média das altitudes, ou seja, calcula-se a média das coordenadas Z dos vértices e cria-se um plano a partir dessa média. O plano criado será paralelo ao plano X e Y. Assim, como no *mean level*, o plano criado no *custom level* é paralelo ao eixo X e Y, no entanto, a cota pode ser escolhida e editada nesta opção.

Nota-se que as principais diferenças entre os valores de volume total dos métodos citados acima estão atribuídas às variações de inclinação entre os planos criados em cada método. Neste aspecto, é importante ressaltar que o maciço rochoso da área de estudo é um quartzito que pertence ao Grupo Itacolomi do Quadrilátero Ferrífero. Esta litologia define superfícies muito acidentadas e, desta maneira, a poligonal delimitadora da área de interesse será naturalmente definida por vértices com alta variação de altitudes, propiciando uma grande inclinação do plano criado na opção *best fit plane*.

Com os resultados deste trabalho e os conceitos teóricos, é possível afirmar que os métodos de cálculo de volume que são realizados a partir do modelo digital de elevação são mais indicados para o cálculo de volume de maciços rochosos em que os vértices da poligonal tenham altitudes mais próximas, ou seja, cálculo de volume de maciços que estejam localizados em superfícies mais planas. Além disso, de acordo com o suporte técnico do Pix4D, a opção *best fit plane* é indicado para o cálculo de volume de estruturas em que todas as fronteiras da estrutura estejam visíveis.

O cálculo de volume utilizando-se dos produtos fotogramétricos tridimensionais levou aos seguintes resultados (tabela 5).

Tabela 5: Resultados encontrados pelo cálculo através do modelo 3D.

ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
227188.1	1419110

Com todos os resultados apresentados, nota-se a diferença do volume encontrado para cada metodologia. Isto se deve às diferenças nas técnicas utilizadas para o cálculo de volume.

Nota-se diferença entre a área encontrada pelos métodos já que a medição da área baseada no DEM oferece uma estimativa de área 2D em perspectiva, enquanto a área estimada pela malha triangular é uma área de superfície total.

Para este trabalho, o método mais indicado seria o cálculo de volume utilizando os produtos fotogramétricos tridimensionais. Este método é o mais interessante devido à irregularidade do local onde o maciço se encontra.

A partir da metodologia utilizada, dos resultados encontrados e de referências bibliográficas, pode-se fazer a análise da aerofotogrametria para cálculo de volume de uma forma mais geral. Nota-se que a aerofotogrametria gera produtos de boa resolução, o que pode ser interessante para o cálculo de volume. Os resultados encontrados neste trabalho apresentaram um GSD de 21,6 cm/pix (MDE) e 5,41 cm/pix (ortofotomosaico).

Uma forma interessante de análise dos resultados seria a partir da comparação com dados provenientes de sensores orbitais. De acordo com Nascimento e Oliveira (2020), o Modelo Digital de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) é disponibilizado com resoluções espaciais de 30m e 90m. Nos últimos anos, tem sido muito utilizado também o MDE oriundo do satélite ALOS e do seu sensor radar PALSAR que possui 12,5m de resolução espacial. Sendo assim, observa-se que aerofotogrametria é a melhor opção para a realização do cálculo de volume de estruturas semelhantes ao maciço utilizado neste trabalho, quando comparado ao cálculo utilizando dados de sensores orbitais. Pode-se afirmar que a aerofotogrametria traz uma precisão maior, devido ao nível de detalhamento dos modelos digitais de elevação gerados por este método.

De acordo com Bruch *et al.* (2019) a utilização de aerofotogrametria para cálculo de volume traz resultados mais próximos a realidade quando comparado a estimativa de volume utilizando-se de topografia tradicional. Isso se deve ao fato de que a nuvem de pontos de amostra é muito maior nos modelos fotogramétricos. No entanto, o mesmo autor expõe a necessidade da utilização do GNSS para coleta dos pontos de controle para correção do georreferenciamento do levantamento. A utilização dos pontos de controle permite a realização de projetos fotogramétricos com erro estimado de poucos centímetros, possibilitando a entrega de trabalhos topográficos com padrão de exatidão Classe A.

Outro ponto a ser destacado da fotogrametria é que o *software* de processamento dos dados fornece suporte para a utilização de diferentes metodologias para o cálculo de volume. Além disso, os produtos gerados ainda podem ser utilizados em outros *softwares* para o cálculo de volume. Desta maneira, pode-se dizer que a aerofotogrametria pode ser utilizada para o cálculo de volume de diferentes tipos de

estruturas. Observa-se que o cálculo do volume de cada projeto dependerá do tipo de estrutura, exigências do projeto e do julgamento do profissional para a decisão de qual a melhor metodologia a ser utilizada para o cálculo, sendo esta última umas das partes cruciais e exigindo do profissional um nível elevado de conhecimento sobre cada metodologia.

Ao final desta discussão, destaca-se que, somente com os resultados deste trabalho, não é possível fazer a validação do volume encontrado para o maciço rochoso estudado. Para validação do volume seria necessário a aplicação de outra metodologia de cálculo de volume de maciço rochoso, como por exemplo, o método das seções transversais.

6. CONCLUSÕES

Através da metodologia e dos resultados desta pesquisa, foi possível realizar a análise da técnica de aerofotogrametria para a cálculo de volume de um maciço rochoso. Com esta análise, pôde-se notar rapidez em todo processo, a automatização, a segurança e democratização da técnica.

A área de estudo selecionada proporcionou condições para a utilização de aerofotogrametria para o cálculo de volume de maciço rochoso. Assim, pode-se concluir que esta etapa foi essencial para o cumprimento do objetivo geral deste trabalho.

A partir do levantamento dos dados, destaca-se o tempo necessário para os trabalhos de campo como um dos pontos fortes da aerofotogrametria. Isso se deve ao fato de que é possível concluir o levantamento de áreas relativamente extensas em pouco tempo e, ainda, com elevado grau de informações.

Pode-se destacar o tempo utilizado para o processamento dos dados também como um dos pontos positivos da fotogrametria. Percebeu-se que os produtos fotogramétricos gerados possuem alto nível de detalhes e alta resolução, o que auxilia na precisão e qualidade de projetos de engenharia.

Através do cálculo de volume, foi possível concluir que, com a aerofotogrametria, é possível estimar o volume de diferentes tipos de estrutura, já que o *software* de processamento entrega o devido suporte para utilização de diferentes metodologias para cálculo de volume. No entanto, deve-se destacar que com os resultados deste trabalho não foi possível fazer a validação do volume encontrado pra o maciço rochoso estudado.

Durante o desenvolvimento das atividades, percebeu-se a possibilidade de utilização deste trabalho como material didático-pedagógico para área de aerofotogrametria. Assim, espera-se que este trabalho possa contribuir para a evolução da ciência fotogramétrica, fomentando sua utilização no setor de rochas ornamentais. Espera-se, também, que esta obra possa contribuir para futuros projetos acadêmicos que envolvam aereofotogrametria.

Sugestões de trabalhos futuros

Os métodos utilizados neste trabalho para estimativa de volume dependem

altamente da topografia ao redor. Desta maneira, seria de grande valor para complementação deste trabalho, fazer a relação dos dados deste trabalho com a geologia estrutural do local estudado. Assim, tem-se como sugestão a realização de um estudo geoestrutural da área e com estes dados dar assertividade ao cálculo do volume do maciço.

Como sugestão subsequente, seria interessante a utilização de outro método para o cálculo de volume do maciço rochoso, como por exemplo, o método das seções transversais. Desta maneira, seria possível fazer a validação do volume estimado através do levantamento aerofotogramétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Requisitos gerais para veículos aéreos não tripulados e aeromodelos.** Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf. Acesso em: 05 mai. 2021.

ASPIAZÚ, C., ALVES, L.M., VALENTE, O.F. Modelos Digitais de Terrenos: Conceituação e Importância. Boletim de Pesquisa Florestal, EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Colombo, n 21, p. 27-36, dez. 1990.

BARBOSA, E. M., *et al.* Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba-PR, v.16, n.4, p. 589-605, Out/Dez. 2010.

BARBOSA, L. C., *et al.* Modelo Digital do Terreno obtido por RPA para cálculo de volume de terra em morros. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**.v.7, n.1, p. 1-9, Mar/Mar. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/12035/6522>. Acesso em: 29 jul 2021.

BORJA, L.C.; CASTRO, D.A. Aplicações da Modelagem 3D: estudo de caso de prédio educacional do campus uefs. **XX Simpósio de Geometria Descritiva e Desenho Técnico**. Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL. Decreto-Lei n. 227, de 28 de fevereiro de 1967. Código de Mineração.

BRUCH, A. F., *et al.* Avaliação da Acurácia das Cubagens de Volumes de Mineração através de Levantamentos Convencionais e Fotogramétricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Pelotas, v.12, n.1, p. 283-298, Ago/Jan. 2019.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from Motion in the Geosciences**. Londres, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd., 2016.

CAUMON, G.; COLLO-DROUAILLET, P.; LE CARLIER DE VESLUD, C. VISEUR, S.; SAUSSE J. **Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures**. Mathematical Geosciences, v.41, n.8, p. 927-945, 2009.

COELHO JUNIOR, J. M.; ROLIM NETO, F. C.; ANDRADE, J.S.C.O. **Topografia Geral**. Recife: UFRPE, 2014.

COELHO, L.; BRITO, J.N. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 196p. 2007.

COSTA, F.S. da. **Extração Fotogramétrica de Modelos Digitais de Superfície: Um Estudo Comparativo para a Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha/RJ**. 2014. 176F. Dissertação – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 2014.

COSTA, L.G.G.; AMORIM, A.L. **Geração de Ortofotos para Produção de Mapas de Danos**. SIGraDi 2009 - Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, São Paulo, Brasil, Novembro, 2009.

DALMOLIN, J.A. **Avaliação do Uso da Fotogrametria Digital em Levantamentos Topográficos**. 2018. 92f. Monografia - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Joinville, 2018.

DISPERATI, A.A.; BERNARDI, D.; KINAPP, A. Avaliação das Imagens da Câmara Digital 35mm Kodak DCS 420 CIR. **Floresta**. Curitiba, v.27, n.1, p. 17-40, 1997.

FERREIRA, M.E.; ANDRADE, L.R.M.; SANO, E.E.; CARVALHO, A.M.; JUNQUEIRA, N.T.V. Uso de imagens digitais na avaliação da cobertura do solo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 21. EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Distrito Federal. Planaltina, 2001.

FIGUEIREDO, E.O.; FIGUEIREDO, S.M.M. Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3. Circular Técnica 75. EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Acre, Rio Branco, 2018.

FILHO, C.C.; KISTEMANN, D. **O setor de rochas ornamentais no Brasil**. In: **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, Cap.10, p.495-527. 2014.

Geographic Information and Geospatial Resources. CanadianGis: Guideline for Real Kinematic Time – RTK Sourveying, 2013. Disponível em: <https://canadiangis.com/guidelines-for-real-time-kinematic-rtk->

surveying.php?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+CanadianGis+%28Canadian+GIS%29#sub_menu1. Acesso em: 03 ago 2021.

GONZÁLES, G.L.G. **Aplicação da Técnica SIFT para determinação de Campos de Deformações de Materiais Usando Visão Computacional**. 2010. 108f. Dissertação – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 2010.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans**. Second edition. Walter de Gruyter Textbook. De Gruyter, 2007.

KHALIL, O.A. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry as Alternative to Laser Scanning for 3D Modelling of Historical Monuments. **Open Science Journal**. S.i., v.5, n.2, p. 1-17, Jan/Jun. 2020.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. **Remote sensing and image interpretation**. 4 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2000.

LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento Aerofotogramétrico Digital Utilizando Fotografias de Médio Formato**. 2010. 126f. Monografia – UNIVESIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2010.

LISBOA FILHO, J. **Projeto de banco de dados para sistemas de informação geográfica**. In: ESCOLA DE INFORMÁTICA DA SBC - SUL, 8., 2000, Ijuí. Artigo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p. 1-38. 2000.

LOWE, D.G. **Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints**, International Journal of Computer Vision, 60, 2, pp. 91-110, 2004.

LOWE, D.G. **Object recognition from local scale-invariant features**. Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 2. pp. 1150-1157, 1999.

NASCIMENTO, F. J.B.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação SRTM e LIDAR e suas aplicações em análises morfométricas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**. Rio de Janeiro, v.37, n.1, p. 20-27, 2020.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

PASETTO, G.A. **Modelagem Geológica 3D Utilizando Aerofotogrametria com VANT em Mina de Mármore no Município de Caçapava do Sul – RS**. 2018. 56f. Monografia – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, Caçapava do Sul, 2018.

PIX4D. **Selecionando o tipo de plano de aquisição de imagens**. 2015a. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type>.

Acesso em: 05 mai 2021.

PIX4D. **Step 1. Before Starting a Project > 1. Designing the Image Acquisition Plan > b. Computing the Flight Height for a given GSD**. 2015b. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557469-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-b-Computing-the-Flight-Height-for-a-given-GSD>. Acesso em: 05 mai 2021.

PIX4D. **TOOLS - Vertical Pixel Displacement Calculator. How to correct for the Rolling Shutter Effect** 2015d. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/208460436-How-to-correct-for-the-Rolling-Shutter-Effect>. Acesso em: 05 mai 2021.

RODRIGUES, F.G.F.; BRIZOLA, A. Radiação de baixa frequência e possível influência nociva a sistemas biológicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Ouro Preto, v.41, n.3, p. 1-10, Out/Jan. 2019.

SABINS, F.F. **Remote Sensing: Principles and Interpretation**. 3 ed. San Francisco W.H. Freeman, 426 p. 1978.

SHIMABUKURO, Y.E.; PONZONI, F.J. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SILVA, P. de L. e; CRUZ, D.T. da; SANTOS, A. de P. Estudo comparativo entre a acurácia posicional planimétrica de ortofotos com GSD médio distintos. **Anais 7º Simpósio de Geotecnologias No Pantanal**. Embrapa Informática Agropecuária/INPE. Out. 2018.

SILVA, R.E.C. da. **Aspectos Legais das Rochas Ornamentais**. In: **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap.5, p.260-284.

SOUZA, C.E.R. de; NEVES, J.R.; MURAMATSU, M. Fotografando com Câmara Escura de Orifício: A Óptica e o Processo Fotográfico na Sala de Aula. **Física Na Escola**. São Paulo, v.8, n.2, p. 19-22, Jan/Abr. 2007.

SOUZA, C.C. de; *et al.* **No Brasil**: Uma revisão bibliográfica. In: CIÊNCIA FLORESTAL SANTA MARIA, 17., Santa Maria. Artigo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p. 409-417, 2007.

VIDAL, F.W.H.; MARQUES, M.N.; ALENCAR, C.R.A. **Plano de Aproveitamento Econômico de Rochas Ornamentais**. In: **Tecnologia de rochas ornamentais**: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, Cap.6, p.287-326, 2014.