

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA DEPARTAMENTO ACADÊMICOS DE ÁREAS III
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA**

ANTONIO CARLOS VIEIRA DE QUEIROZ JUNIOR

ARTHUR RODRIGUES MAGALHÃES

**O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS OBTIDAS COM O AUXÍLIO DE RPAS PARA A
DETERMINAÇÃO VOLUMÉTRICA DE EXPLORAÇÃO MINERAL**

**GOIÂNIA
MARÇO/2021**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

ANTONIO CARLOS VIEIRA DE QUEIROZ JUNIOR
ARTHUR RODRIGUES MAGALHÃES

**O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS OBTIDAS COM O AUXÍLIO DE RPAS PARA A
DETERMINAÇÃO VOLUMÉTRICA DE EXPLORAÇÃO MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Coordenação da Área de Geomática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Ramos Cortes.

GOIÂNIA
MARÇO/2021

Q3u Queiroz Junior, Antonio Carlos Vieira de.

O uso de fotografias aéreas tomadas com o auxílio de RPAS para a determinação volumétrica / Antonio Carlos Vieira de Queiroz Junior; Arthur Rodrigues Magalhães. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
50f. ; il.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Ramos Cortes.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Coordenação de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Departamento Acadêmico da Área III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
Inclui apêndice.

1. Aerofotogrametria. 2. Altimetria. I. Magalhães, Arthur Rodrigues. II. Cortes, João Batista Ramos (orientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631

Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autores: Arthur Rodrigues Magalhães, matrícula: 20162011190014 e Antonio Carlos Vieira de Queiroz Junior, matrícula: 20162011190065

Título do Trabalho: O uso de fotografias aéreas obtidas com o auxílio de RPAS para a determinação volumétrica de exploração mineral

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 14 / 04 / 2021

Antonie Lecky In

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

Antônio Carlos Jr. Arthur R. Magalhães
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

ATA Nº ECA 02 - TCC/2021.1

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 17 dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, às 13:00 horas, na sala virtual meet.google.com/kte-mrvf-uzw, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso dos Graduandos **Antonio Carlos Vieira de Queiroz Junior** (matrícula 20162011190065) e **Arthur Rodrigues Magalhaes** (matrícula 20162011190014) do curso de Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, do Departamento III, Câmpus Goiânia, do Instituto Federal de Goiás, no primeiro semestre do ano de dois mil e vinte e um. A banca foi composta pelos seguintes membros:

- João Batista Ramos Côrtes (Professor-Orientador)
- Avilmar Antonio Rodrigues
- Halan Faria Lima

sob a presidência da(o) primeira(o). O Trabalho de Conclusão de Curso tem como título "**Uso de fotografias aéreas tomadas com o auxílio de RPAS para a determinação volumétrica de uma pilha de minério**", sob orientação do Prof. **João Batista Ramos Côrtes**. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, tendo sido os autores arguidos pela Banca Examinadora, a banca sugeriu a alteração do título para "**Uso de fotografias aéreas obtidas com o auxílio de RPAS para a determinação volumétrica de exploração mineral**" e as notas obtidas pelos discentes foram, respectivamente 8,5 (oito virgula cinco) e 8,5 (oito virgula cinco).

Encerra-se a sessão às 14 horas e 30 minutos. Eu, Profa. Marina Alberti Macedo, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca Examinadora.

Prof. Marina Alberti Macedo (Assinado eletronicamente)

Prof. João Batista Ramos Côrtes (Assinado eletronicamente)

Prof. Avilmar Antonio Rodrigues (Assinado eletronicamente)

Prof. Halan Faria Lima (Assinado eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- Marina Alberti Macedo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 14:37:21.
- Avilmar Antonio Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 14:36:41.
- Halan Faria Lima, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 14:28:53.
- Joao Batista Ramos Cortes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 14:26:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/03/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 137226
Código de Autenticação: 0897106946



Dedicamos esse trabalho aos nossos familiares que tanto nos apoiaram no decorrer de nossas vidas, o que resultou em mais uma etapa vencida com louvor.

Dedicamos também a todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram de nossa formação moral, ética e intelectual.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus que sempre iluminou os nossos caminhos, mostrando o valor da caridade, humildade e amor ao próximo.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

QUEIROZ JUNIOR, A. C. V.; MAGALHÃES, A. R.; **O uso de fotografias aéreas tomadas com o auxílio de RPAS para a determinação volumétrica de uma pilha de minério.** Monografia (Graduação) – Departamento de Geomática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG, Goiânia, 2021.

RESUMO

Segundo o DNPM o Brasil possui cerca de 8870 mineradoras, e o conhecimento do volume dos minérios extraídos é de extrema importância para as mineradoras, pois auxilia no transporte, na venda, na estocagem e é utilizado em todos os processos da mineração. E a determinação desse volume é feita com o levantamento topográfico, podendo ser substituído por técnicas mais rápidas como o aerolevanteamento utilizando um RPAS. Portanto o objetivo da pesquisa é avaliar a viabilidade de se determinar o volume utilizando fotografias de um aerolevanteamento. A área de estudo é a pedreira Araguaia, onde foi determinado o volume de uma pilha de minério formada pelo material denominado filler. Foi realizado um levantamento topográfico, um voo circular e um voo cruzado. Foram distribuídos nove alvos pré-sinalizados, sendo cinco como apoio e quatro para verificação. No levantamento topográfico foi feita uma poligonal fechada que obteve um erro angular de 08" e um erro linear de 8,4 mm, e para modelar a pilha foram coletados 272 pontos. No aerolevanteamento, o voo cruzado foi tomado 16 fotografias, com recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 60%, com GSD de 2 centímetros, no voo circular foram tomadas 52 fotografias com recobrimento longitudinal de 80% e raio de 25 m e GSD de 2 centímetros. Foram realizados um total de 6 processamentos para a determinação volumétrica. Com a utilização de pontos de apoio, foi realizado um processamento para o voo cruzado mais circular, um para o voo cruzado e um para o voo circular, totalizando 3 processamentos com pontos de apoio. Sem a utilização de pontos de apoio, foi realizado um processamento para o voo cruzado mais circular, um para o voo cruzado e um para o voo circular, totalizando 3 processamentos sem pontos de apoio. Para validação do levantamento aerofotogramétrico, foi feito teste de precisão e acurácia e um teste de normalidade, onde todos os processamentos foram dados como normal. Na precisão e na acurácia, o processamento dos voos cruzados e circular com apoio, obtiveram um melhor resultado, tendo como referência o valor determinado pelo levantamento topográfico, obtendo uma diferença de apenas 0,6%, e o que obteve o resultado menos preciso e acurado foi o voo cruzado sem apoio, tendo uma diferença na determinação do volume de 11,36%. Portanto o levantamento aerofotogramétrico pode ser utilizado nas mineradoras para determinação do volume, pois os resultados comparados com o levantamento topográfico a discrepância é muito pequena, e utilizando a fotogrametria o tempo de coleta de dados é bem menor que a topografia e os números de pessoas envolvidas é bem menor, tendo menor risco possível ou até risco nenhum, por não ter a necessidade de ter alguém na área levantada.

Palavras Chave: Aerofotogrametria, Topografias, RPAS, Mineração, Volume, Voo cruzado, Voo circular.

ABSTRACT

According to the DNPM, Brazil has about 8870 mining companies, and the knowledge of the volume of ore extracted is extremely important for mining companies, because it helps in the transport, sale, storage and used in all mining processes. The determination of this volume is made with the topographical survey, and can be replaced by faster techniques such as aerial surveying using an RPAS. Therefore the objective of the research is to evaluate the feasibility of determining the volume using aerial survey photographs. The study area is the Araguaia quarry, where the volume of an ore pile formed by the material called Filler was determined. A topographic survey, a circular flight and a cross flight were performed. Nine pre-sigaled targets were distributed, five as support and four for verification. In the topographic survey a closed polygon was made that obtained an angular error of 08" and a linear error of 8.4 mm, and to model the pile 272 points were collected. In the aerial survey, the cross flight was taken 16 photographs, with longitudinal coverage of 80% and lateral of 60%, with GSD of 2 centimeters, in the circular flight 52 photographs were taken with longitudinal coverage of 80% and radius of 25 m and GSD of 2 centimeters. Six processing runs were performed for volume determination, two runs of the circular flight and the cross flight, without and with support points, two only with the cross flight, without and with support points and two only with the circular flight, also with and without support points. For validation of the aerophotogrammetric survey, accuracy and precision tests and a normality test were performed, where all processing was given as normal. In the accuracy and precision, the processing of the crossed and circular flights with support, obtained a better result, taking as reference the value determined by the topographic survey, obtaining a difference of only 0.6%, and the one that obtained the least accurate and precise result was the crossed flight without support, having a difference in determining the volume of 11.36%. Therefore the aerophotogrammetric survey can be used in mining companies to determine the volume, because the results compared with the topographic survey and the discrepancy is very small, and using photogrammetry data collection time and much less than the topography and the number of people involved and much smaller, with less risk possible or even no risk, by not having the need to have someone in the area surveyed.

Keywords: Aerophotogrammetry, Topographies, RPAS, Mining, Volume, Cross-flight, Circular Flight.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das mineradoras no Brasil.	10
Figura 2 - Modelos de alvos pré-sinalizados mais utilizados	19
Figura 3 - Representação de um alvo pré-sinalizado em um sensor ocupando 3x3 ou 5x5 pixel	20
Figura 4 - RPAS Phantom 4 Pro	22
Figura 5 - Localização da área de estudo na Pedreira Araguaia	27
Figura 6 - Fluxograma de trabalho dessa pesquisa	29
Figura 7 - Estação total FOIF Modelo RTS 105	31
Figura 8 - Formato e dimensões dos Alvos Pré-sinalizados	32
Figura 9 - Distribuição dos Alvos Pré-sinalizados usados como apoio e controle	32
Figura 10 - Posição das fotografias no voo cruzado	33
Figura 11 - Posição das fotografias no voo circular.....	34
Figura 12 - Discrepâncias dos voos sem pontos de apoio	39
Figura 13 - Discrepâncias dos voos com pontos de apoio	40

LISTA DE TABELAS e QUADROS

Tabela 1 - Parâmetros definidos no PEC-PCD planimétrico e altimétrico para as classes.	14
Tabela 2 - Teste de hipótese para verificar a tendenciosidade do ortomosaico e MDS	15
Tabela 3 - Teste de hipótese para verificar a acurácia do ortomosaico e MDS.....	17
Tabela 4 - Avaliação dos métodos de coleta de dados e acurácia do produto final.....	24
Tabela 5 - Parâmetros determinados após o processamento de cada voo.	35
Tabela 6 - Resultado da aplicação do teste Shapiro-Wilk (W) nas amostras planimétricas e altimétrica.....	37
Tabela 7 - Média, desvio padrão, máxima e mínima discrepância planimétrica de cada tipo de voo	38
Tabela 8 - Resultados do teste t-student aplicado nas discrepâncias de cada voo processado.....	38
Tabela 9 - Qui-quadrado tabelado e calculado para cada voo, maior escala e a escala comercial....	40
Tabela 10 - Média, desvio padrão, máxima e mínima discrepância altimétrica de cada tipo de voo	41
Tabela 11 - Resultado da aplicação do teste t-student no MDT dos voos processados.....	42
Tabela 12 - Menor equidistância entre as curvas de nível e os valores do calculado e tabelado. ...	42
Tabela 13 - Volume determinado pela topografia, Fotogrametria, sua discrepância, diferença e percentual da diferença.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD - *Charge Coupled Device*

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

GNSS - *Global Navigation Satellite System* ou Sistema Global de Navegação por Satélite

GSD - *Ground Sample Distance*

LiDAR - *Light Detection And Ranging*

RPAS - *Remotely Piloted Aircraft System* ou Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada

RTK - *Real Time Kinematic* ou Posicionamento em Tempo Real

UAS - *Unnamed Aerial vehicle*

UnB - Universidade de Brasília

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

MDT - Modelo Digital do Terreno

PEC-PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

SUMÁRIO

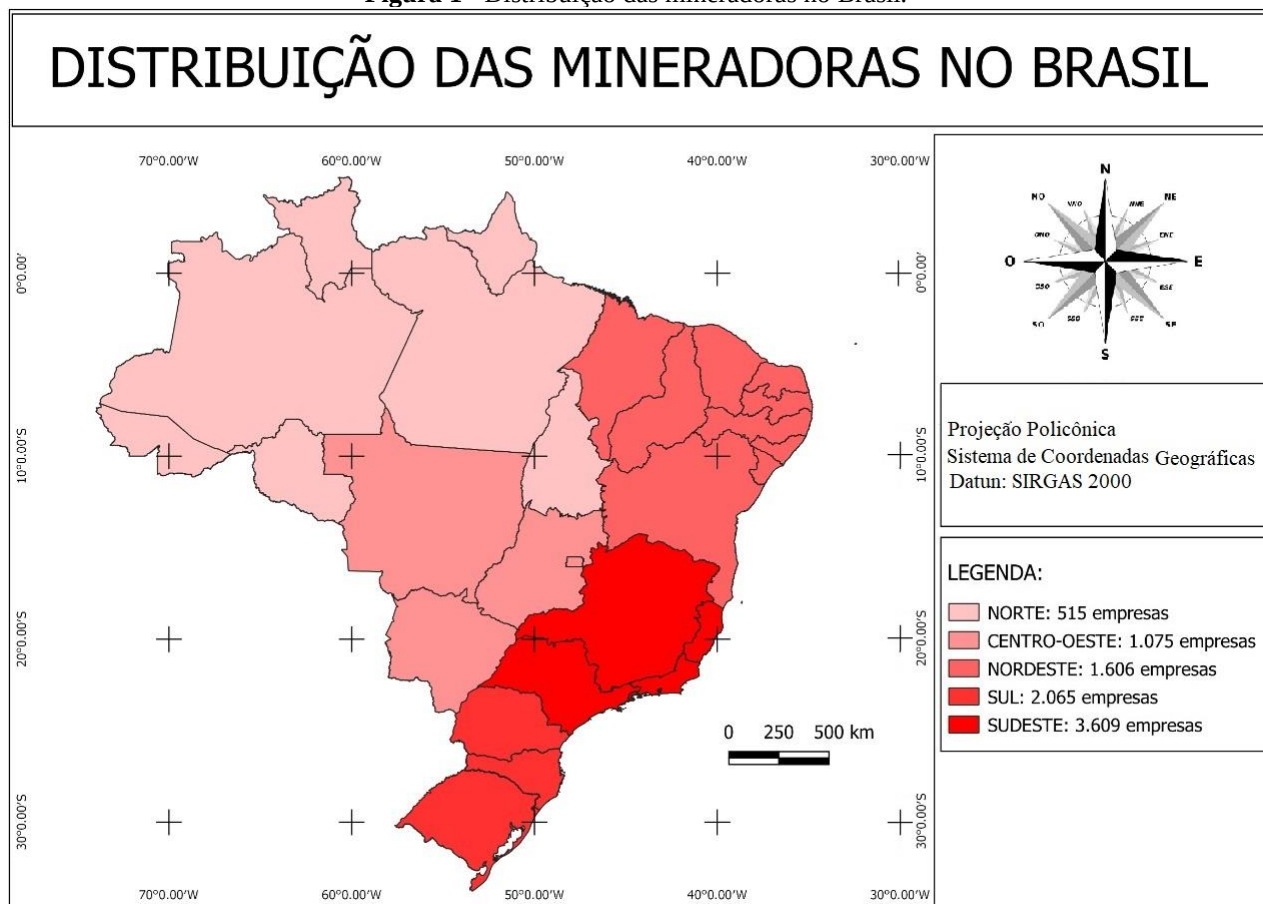
1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVOS	11
1.1.1.	Objetivo Geral	12
1.1.2.	Objetivo Específico	12
1.2.	JUSTIFICATIVA	12
2.	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1.	AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA	14
2.2.	NORMALIDADE DE UMA AMOSTRA	18
2.3.	ALVOS PRÉ-SINALIZADOS	19
2.4.	PRECISÃO ALTIMÉTRICA ESPERADA	21
2.5.	CÂMERA DE BAIXO CUSTO OU NÃO MÉTRICA	21
2.6.	RPAS PHANTON 4 PRO	22
2.7.	ESTADO DA ARTE	23
2.8.	FILLER	25
3.	METODOLOGIA	27
3.1.	ÁREA DE ESTUDO	27
3.2.	MÉTODOS	28
4.	RESULTADOS	30
4.1.	LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO	30
4.2.	DISTRIBUIÇÃO E IMPLANTAÇÃO DOS ALVOS PRÉ-SINALIZADOS	31
4.3.	AEROLEVANTAMENTO	33
4.3.1.	Voo cruzado	33
4.3.2.	Voo Circular	34
4.4.	PROCESSAMENTO DOS AEROLEVANTAMENTOS	34
4.5.	DA AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA	36
4.5.1.	Precisão e acurácia planimétrica	37
4.5.2.	Precisão e acurácia altimétrica	41
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
	Apêndice I - Matriz variância covariância dos parâmetros de orientação interior	49

1. INTRODUÇÃO

Segundo Coelho, Martins e Gallis (2019), o aumento da população mundial e o desenvolvimento tecnológico gera uma crescente necessidade da produção mineral. Ribeiro Júnior (2011), afirma que a determinação de volume na mineração é primordial em todas as fases da lavra de um mineral. Iniciando na pesquisa para dimensionar o tamanho da jazida, passando pelo desmonte, transporte e disposição do material a ser britado e finalizando com medição do volume do produto gerado.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015), o Brasil possui uma extensa área territorial e um grande acervo mineral, tendo em 2015, 8.870 mineradoras, distribuídas no Brasil, por regiões, conforme o mapa da Figura 1.

Figura 1 - Distribuição das mineradoras no Brasil.



Fonte: DNPM, 2015, adaptado pelos autores (2021).

O conhecimento do volume na área de mineração é de grande relevância, pois esses dados são utilizados na exploração, transporte, britagem e estocagem em pilhas dos diferentes minérios.

Normalmente a determinação do volume é realizada usando técnicas clássicas de topografia com estação total ou receptores de sinais do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) pelo método Posicionamento em Tempo Real (RTK) ou cinemático (RIBEIRO JÚNIOR, 2011).

Nas últimas duas décadas, os métodos de levantamentos topográficos apresentaram um desenvolvimento exponencial, principalmente devido à introdução da informática e programas nos equipamentos de mensuração. A visão computacional, inicialmente aplicada nos jogos eletrônicos, alterou significativamente o modo de geração dos produtos cartográficos oriundos da Fotogrametria, pois permitiu a automação de quase todos os processos fotogramétricos. Simultaneamente a esses eventos, ocorreu a integração do aeromodelo, da câmera digital, do sistema inercial e do sistema de posicionamento por satélite, surgindo uma aeronave autônoma capaz de tomar fotografias em uma rota pré-estabelecida. Essa aeronave foi inicialmente denominada de drone, UAS, VANT e finalmente seu nome foi consolidado por *Remotely Piloted Aircraft System* ou em português de Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS).

Desse modo a utilização da Fotogrametria a partir das fotografias tomadas usando um RPAS tem se mostrado como uma alternativa promissora para a obtenção dos dados para o cálculo do volume de uma pilha de minérios. Pois, além de ter um custo inferior se comparado com às atuais técnicas de topografia ou Fotogrametria, é um sistema remoto, capaz de obter dados em um curto espaço de tempo, permite alta repetibilidade sendo que o operador não precisa necessariamente estar na região a ser mensurada, e portanto, longe do maquinário e o seu auxiliar não precisa escalar a pilha.

Assim, surgem os seguintes questionamentos: O volume determinado pela Fotogrametria atende às exigências da mineradora? O voo cruzado melhora a eficiência da determinação do volume? Realmente é necessário utilizar pontos de controle?

1.1. OBJETIVOS

Nessa pesquisa os objetivos foram divididos em geral e específico.

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa, é avaliar a viabilidade de se determinar o volume de pilhas de minério, usando as fotografias tomadas por uma câmera de baixo custo acoplada em um RPAS.

1.1.2. Objetivo Específico

Essa pesquisa tem por objetivo específico:

- 1- Determinar o volume de uma pilha de minério usando dados altimétrico obtidos com Fotogrametria e comparar com o volume determinado por topografia;
- 2- Avaliar a precisão e a acurácia do Modelo Digital do Terreno (MDT) de acordo com os parâmetros definidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).
- 3- Avaliar o ganho na precisão e acurácia do MDT com voo cruzado e circular e somente com o voo circular;
- 4- Avaliar se a diferença entre o volume determinado pelo MDT obtido com ou sem pontos de apoio é suficiente para atender à necessidade da mineradora; e
- 5- Avaliar se a o levantamento topográfico pode ser substituído pela Fotogrametria.

1.2. JUSTIFICATIVA

No mundo globalizado e informatizado, cada vez mais, os pesquisadores vêm buscando técnicas e métodos para aumentar a eficiência na obtenção dos dados, redução do custo e tempo para a obtenção da informação.

O estoque do material explorado de uma jazida por uma mineradora é armazenado em pilha. Normalmente, devido ao funcionamento ativo, a pilha possui uma intensa alteração de volume, quer pelo acréscimo da produção ou retirada pela venda. Assim surge a necessidade de uma técnica capaz de obter o volume em curto espaço de tempo e com resultado próximo do real, minimizando a

diferença entre o volume acrescido ou retirado. Ressalta-se que rochas vulgarmente conhecidas como brita, são comercializadas por volume e não por sua massa (peso).

Assim, o RPAS aparece como uma alternativa de baixo custo capaz de sanar esse problema, pois é possível realizar o levantamento de uma pilha em poucos minutos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi restrita somente para os itens pertinentes à essa pesquisa, presumindo que o leitor tenha o conhecimento básico dos conceitos clássicos de topografia, Fotogrametria e Geodésia.

2.1. AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA

Os parâmetros do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) brasileira estão definidos no Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Porém, esse decreto, ainda em vigor, não previu os produtos digitais, assim a Diretoria do Serviço Geográfico do exército sugeriu o acréscimo de uma classe às definidas no Decreto Lei 89.817/1984, sendo está denominada Classe A+. Assim, foi acrescida a sigla PEC o termo Padrão Cartográfico Digital (PCD), ficando PEC-PCD. Na Tabela 1 estão os parâmetros planimétricos e altimétricos definidos na PEC-PCD.

Tabela 1 - Parâmetros definidos no PEC-PCD planimétrico e altimétrico para as classes.

Classe	Planimetria		Altimetria*	
	PEC	EP	PEC	EP
A+	0,28 mm	0,17 mm	0,27	0,17
A	0,5 mm	0,3 mm	0,50	0,33
B	0,8 mm	0,5 mm	0,60	0,40
C	1,0 mm	0,8 mm	0,75	0,50

Fonte: DSG (2014).

* As medidas devem ser realizadas em função da equidistância entre as curvas de nível

A precisão e a acurácia de qualquer produto cartográfico, pode ser avaliada de acordo com a metodologia proposta por Merchant (1982) que utiliza os testes estatísticos t-student e Qui-quadrado (χ^2) para esses 2 (dois) parâmetros. Ressalta-se que essa metodologia foi utilizada pelos pesquisados Galo e Camargo (1994); Nazareno, Ferreira e Macedo, (2009); Alves Junior *et al* (2015) e Rodrigues (2016).

A precisão de um produto é mensurada avaliando a sua tendenciosidade. Um produto é considerado sem tendência ou preciso se a média das discrepâncias obtidas entre as coordenadas reais

e as medidas no produto forem estatisticamente consideradas igual a zero. Assim elabora-se 2 (duas) hipóteses, a H_0 que considera que a média das discrepâncias é igual a zero e a hipótese H_1 considera que a média das discrepâncias é diferente de zero. As hipóteses H_0 e H_1 são apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Teste de hipótese para verificar a tendenciosidade do ortomosaico e MDS

H_0	Versus	H_1
$\overline{\Delta E} = 0$		$\overline{\Delta E} \neq 0$
$\overline{\Delta N} = 0$		$\overline{\Delta N} \neq 0$
$\overline{\Delta h} = 0$		$\overline{\Delta h} \neq 0$

A média das discrepâncias $\overline{\Delta E}$, $\overline{\Delta N}$ e $\overline{\Delta h}$ pode ser calculada aplicando-se as Equações 1 a 3.

$$\overline{\Delta E} = \sum_{i=1}^n \frac{(E_{\text{Terreno}} - E_{\text{Ortomosaico}})}{n} \quad (1)$$

$$\overline{\Delta N} = \sum_{i=1}^n \frac{(N_{\text{Terreno}} - N_{\text{Ortomosaico}})}{n} \quad (2)$$

$$\overline{\Delta h} = \sum_{i=1}^n \frac{(h_{\text{Terreno}} - h_{\text{Ortomosaico}})}{n} \quad (3)$$

Onde:

$\overline{\Delta E}$, $\overline{\Delta N}$ e $\overline{\Delta h}$ - Média das discrepâncias;

E_{Terreno} , N_{Terreno} e h_{Terreno} - Coordenadas obtidas com o receptor GNSS; e

n - Número de pontos da amostra.

O teste t-student é usado para verificar se a média das discrepâncias é estatisticamente igual a zero. O t-student amostral nos eixos E, N e h são determinados pelas Equações 4 a 6.

$$\hat{t}_{\Delta E} = \frac{\overline{\Delta E}}{\hat{\delta\Delta E}} \sqrt{n} \quad (4)$$

$$\hat{t}_{\Delta N} = \frac{\overline{\Delta N}}{\hat{\delta\Delta N}} \sqrt{n} \quad (5)$$

$$\hat{t}_{\Delta h} = \frac{\overline{\Delta h}}{\hat{\delta\Delta h}} \sqrt{n} \quad (6)$$

Onde:

$\hat{t}_{\Delta E}$, $\hat{t}_{\Delta N}$ e $\hat{t}_{\Delta h}$ - t-student amostral;
 $\overline{\Delta E}$, $\overline{\Delta N}$ e $\overline{\Delta h}$ - Média das discrepâncias; e
 $\hat{\sigma}_{\Delta E}$, $\hat{\sigma}_{\Delta N}$ e $\hat{\sigma}_{\Delta h}$ - Desvio Padrão da amostra.

O valor tabelado da distribuição t-student está em função do número de elementos da amostra e do nível de confiança usado no teste, assim, o valor tabelado pode ser obtido pela aplicação da Equação 7.

$$t_{\text{tab}} = t_{\alpha}^{v=n-1} \quad (7)$$

Onde:

t_{tab} - Valor tabelado para a distribuição do t-student;
 v - Número de grau de liberdade;
 n - Número de elementos da amostra; e
 α - Grau de confiança; e

Caso o valor calculado do t-student amostral, seja inferior ou igual ao valor tabelado, aceita-se a hipótese H_0 , ou seja, o produto cartográfico não apresenta tendência na direção avaliada.

A acurácia nos eixos E, N e h é verificada comparando o desvio padrão esperado com o desvio padrão calculado. O desvio padrão da amostra pode ser determinado aplicando-se as Equações 8 a 10

$$\hat{\sigma}_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \overline{\Delta E})^2}{(n-1)}} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \overline{\Delta N})^2}{(n-1)}} \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2}{(n-1)}} \quad (10)$$

O desvio padrão planimétrico esperado pelo PEC-PCD pode ser determinado considerando que o erro nas abscissas e ordenadas são iguais, então, o desvio padrão da classe é calculado pela Equação 11.

$$\sigma_{E=N} = \frac{EP}{\sqrt[2]{2}} \quad (11)$$

Onde:

σ - Desvio padrão esperado; e

EP - Erro permitido.

O desvio padrão esperado para a altimetria é o próprio Erro Padrão da classe e expresso pela Equação 12.

$$\sigma_h = EP \quad (12)$$

O teste estatístico utilizado para comprar se o desvio padrão esperado é estatisticamente igual ao desvio padrão calculado é o qui-quadrado (χ^2). Assim, formula-se duas hipóteses, a H_0 e a H_1 . A hipótese H_0 considera que o desvio padrão esperado é igual ao calculado, a hipótese H_1 considera que o desvio padrão esperado é diferente do calculado. As hipóteses H_0 e H_1 são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Teste de hipótese para verificar a acurácia do ortomosaico e MDS

H_0		H_1
$\hat{\sigma}_{\Delta E}^2 = \sigma_{E=N}^2$	Versus	$\hat{\sigma}_{\Delta E}^2 \neq \sigma_{E=N}^2$
$\hat{\sigma}_{\Delta N}^2 = \sigma_{E=N}^2$		$\hat{\sigma}_{\Delta N}^2 \neq \sigma_{E=N}^2$
$\hat{\sigma}_{\Delta h}^2 = \sigma_h^2$		$\hat{\sigma}_{\Delta h}^2 \neq \sigma_h^2$

O qui-quadrado (χ^2) da amostra pode ser calculado aplicando as Equações de 13 a 15:

$$\chi_{\Delta E}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{\Delta E}^2}{\sigma^2} (n-1) \quad (13)$$

$$\chi_{\Delta N}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{\Delta N}^2}{\sigma^2} (n-1) \quad (14)$$

$$\chi_{\Delta h}^2 = \frac{\hat{\sigma}_{\Delta h}^2}{\sigma^2} (n-1) \quad (15)$$

Onde:

$\chi_{\Delta E}^2$, $\chi_{\Delta N}^2$ e $\chi_{\Delta h}^2$ - Qui-quadrado amostral;

$\hat{\sigma}_{\Delta E}^2$, $\hat{\sigma}_{\Delta N}^2$ e $\hat{\sigma}_{\Delta h}^2$ - Variância da amostra; e

σ^2 - Variância esperada.

O qui-quadrado (χ^2) tabelado é obtido de uma distribuição de probabilidade com determinado grau de liberdade (variável de acordo com o tamanho da amostra - $v = n-1$) e determinado nível de confiança (α), como indicado na Equação 16.

$$\chi_{\text{Tab } \alpha}^2 \quad v=n-1 \quad (16)$$

Caso o valor calculado do Qui-quadrado (χ^2) amostral seja menor ou igual ao valor tabelado implica que o produto cartográfico é preciso para a escala e classe verificada.

Os testes t-student e Qui-quadrado (χ^2) somente são validos se e somente se a amostra for considerada normal. Portanto, independentemente do tamanho da amostra a mesma deve ser testada para assegurar que a mesma possua uma distribuição normal.

2.2. NORMALIDADE DE UMA AMOSTRA

Existem vários testes para verificar a normalidade da amostra, porém um dos mais utilizados pelos pesquisadores para amostra inferior à 30 elementos é o teste de Shapiro-Wilk (W) que pode calculado aplicando-se as Equações de 17 a 19.

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (17)$$

se n for par, $n = 2k$, se n for ímpar $n = 2k + 1$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (y_{n-i+1} - y_i) \quad (18)$$

$$W = \frac{b^2}{S^2} \quad (19)$$

Onde:

a_i Coeficientes de Shapiro-Wilk

n Tamanho da amostra

S^2 Soma de quadrado dos desvios

Caso o valor calculado para a amostra seja inferior ao valor tabelado, rejeita-se a hipótese de normalidade ao nível α de significância.

2.3. ALVOS PRÉ-SINALIZADOS

Os modelos de alvos pré-sinalizados mais utilizados de acordo com o Ministério do Exército (1984) e Wolf (2004), são os apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Modelos de alvos pré-sinalizados mais utilizados

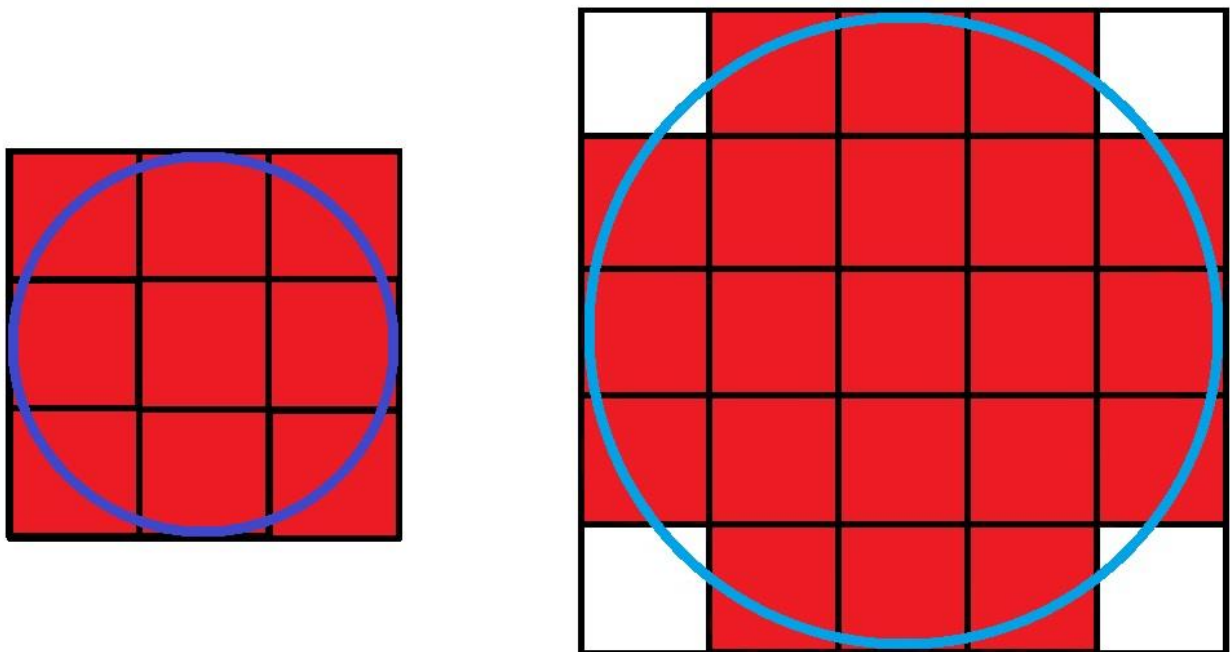


Fonte: Adaptado de WOLF (2004) e Ministério do Exército (1984).

Segundo Alves Junior *et al.* (2015) e Rodrigues (2016) na Fotogrametria digital o alvo pré-sinalizado deve ser representado na fotografia como uma matriz de 3x3 ou 5x5, pois a identificação de seu centro fica inequívoca. Na

Figura 3, está a representação do centro de um alvo pré-sinalizado, identificado pela cor círculo azul, no elemento sensor em pixel.

Figura 3 - Representação de um alvo pré-sinalizado em um sensor ocupando 3x3 ou 5x5 pixel



Fonte: Alves Junior (2015)

2.4. PRECISÃO ALTIMÉTRICA ESPERADA

O desvio padrão das coordenadas altimétricas esperada (σ_z) está em função da altura de voo (H), da base fotogramétrica (B), da distância focal (f) e da precisão da leitura das fotocoordenadas (σ_{px}), conforme Equação 20. (ALBERTZ & KREILING, (1989); KRAUS (1993); SCHI-EWE (1995).

$$\sigma_z = \pm \frac{H^2}{B.f} \sigma_{px} \quad (20)$$

Onde:

- σ_z - Desvio padrão vertical esperado;
- B - Base fotogramétrica;
- f - Distância focal; e
- σ_{px} - Desvio padrão na determinação da paralaxe.

2.5. CÂMERA DE BAIXO CUSTO OU NÃO MÉTRICA

As câmeras digitais de baixo custo ou câmeras não-métricas não foram desenvolvidas para a Fotogrametria, pois os fabricantes não se preocupam com a sua estabilidade geométrica e muito menos as distorções causadas pelo seu sistema de lentes. Como os programas que utilizam as fotografias sempre realizaram a autocalibração da câmera em conjunto com a aerotriangulação, vários pesquisadores já fizeram uso desses sensores para o mapeamento, comprovando a sua eficácia, dentre eles destacamos: Cortes (1998); Cortes (2010); Tommaselli *et al* (2010), Wackrow *et al.* (2007), Mitishita *et al.* (2009), Côrtes (2010), Mitishita *et al.* (2010), Mitishita *et al.* (2011), Alves Junior *et al.* (2015), Marotta *et al.* (2015), Coelho, Martins e Gallis (2019).

2.6. RPAS PHANTON 4 PRO

O Phantom 4 Pro é um RPAS de asa rotativa produzido pela DJI, equipado com a câmara fotográfica modelo FC330, sensor CCD (3000x 4000), *pixel pitch* 1,56 μm , distância focal de 4 mm, acoplada em uma plataforma giro estabilizadora denominada *Gimbal*. Esse RPAS possui autonomia de voo de 30 minutos e velocidade de cruzeiro de 58 km/h e capaz de resistir a ventos de até 36 km/h. O RPAS Phantom 4 Pro está representado na **Figura 4**.

Figura 4 - RPAS Phantom 4 Pro



Fonte: DJI

2.7. ESTADO DA ARTE

Coelho, Martins e Gallis (2019) realizaram a comparação entre o volume de uma pilha de minério obtida pela topografia convencional e por fotografia terrestres tomadas com um celular. Os dados topográficos foram obtidos por um levantamento planialtimétrico usando uma estação total Leica MS50, realizando uma poligonal fechada envolvendo a área da pilha. Os dados fotogramétricos foram obtidos por uma câmera de um celular J5, com fotografias tomadas de três em três metros com uma sobreposição longitudinal de 60%. Os autores não informaram a quantidade de pontos de controle pré-sinalizado utilizados, porém especificaram que eles foram distribuídos por toda a pilha.

O processamento dos dados topográficos e o cálculo do volume foi realizado no programa AutoCad Civil 3D. As 59 fotografias foram processadas no programa Pixel 4D, onde foi gerado o modelo digital de terreno e o calculado o volume (COELHO, MARTINS E GALLIS, 2019).

O volume determinado pela topografia foi considerado livre de erros e comparado com o obtido pela Fotogrametria, sendo a diferença entre eles inferior à três metros cúbicos. Não foi informado o volume total da pilha, nem o valor percentual dessa diferença, porém os autores concluíram, que apesar da utilização de uma câmera de baixo custo e o tempo superior de processamento em relação à topografia, devido à diferença de volume encontrada, a Fotogrametria apresentou a melhor relação custo benefício e indicam essa técnica de levantamento para a medição de volume em pilhas de minério (COELHO, MARTINS E GALLIS, 2019).

Silva *et al* (2016) avaliaram a acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando RPAS, GNSS e LiDAR. O levantamento realizado com dados da constelação GNSS foi realizado usando um par de receptores modelo GTR-G², pelo método de posicionamento cinemático, com taxa de rastreamento de 1s. Inicialmente foi definido o perímetro no sopé e cume da pilha. Após foi gerado uma nuvem de pontos em seções horizontais distanciadas de 10 metros. Os dados foram processados no programa GNSS *Solutions* versão 3.10.07, obtendo precisão horizontal de 0,05 m e 0,06 m vertical, com nível de confiança de 95%. O volume foi determinado com base no MDT gerados com os dados obtidos pelo levantamento.

O RPAS utilizado foi o μ VANT/DNPM, asa fixa, desenvolvido pela parceria da Universidade Federal de Brasília (UnB) com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), com envergadura de 1,90 m, capacidade de carga (*payload*) de 700 g, com o peso total de 2,5 kg e autonomia de 45 minutos de voo. Esse RPAS foi equipado com uma câmera digital não métrica de pequeno formato da marca Sony modelo Cyber-Shot DSC-RX100, com sensor CMOS de 5472 x 3648 pixel ou 13,2 x 8,8 mm, *pixel pitch* de 2,4 μ m, distância focal de 10,4 mm. A altura de voo foi 100m,

com velocidade média de cruzeiro de 60 km/h ou 16,7 m/s, sendo a câmara foi configurada com velocidade do obturador de 1/2.000, abertura de f/1,8 e intervalo de disparo de 2 s. Assim o GSD foi de 2cm, o recobrimento lateral foi de 60% e o longitudinal de 80%, perfazendo um total de 177 fotografias, tomadas em 5 linhas de voo, recobrindo uma área de 29,7 ha. Antes do voo foram implantados 20 pontos pré-sinalizados, sendo 10 usados com apoio e 10 como verificação. Os alvos pré-sinalizados foram materializados no formato de um quadrado com dimensões de 50x50 cm. O voo foi processado no programa Agisoft Photoscan versão 1.1.6, onde foi gerado o modelo digital de terreno. (SILVA *et al*, 2016)

A varredura LiDAR foi realizada com o equipamento da marca Optech modelo ILRIS-3D, sendo necessária 6 varreduras para cobrir toda a área. Os autores não identificaram qual foi a resolução utilizada pelo LiDAR. A nuvem de pontos foi processada no programa PolyWorks versão 12. (SILVA *et al*, 2016)

A nuvem de pontos gerados pelos 3 métodos de levantamentos (GNSS, RPAS e LiDAR), foi filtrada no programa Arc GIS 10.1, sendo eliminados os pontos considerados como erros grosseiros. A precisão foi mensurada usando as especificações da PEC-PCD para a classe A. A precisão planimétrica e altimétrica foi avaliada por t-student e a acurácia pelo qui-quadrado (χ^2). (SILVA *et al*, 2016).

Silva *et al*, (2015) concluíram que a melhor acurácia na determinação do volume foi obtida com o RPAS, seguida do GNSS e LiDAR. Apesar do tempo de processamento dos dados do RPAS e LiDAR terem sido superior ao GNSS, os autores concluíram que o RPAS apresentou a melhor relação custo benefício. Na **Tabela 4**, está a avaliação de cada método de levantamento, demonstrando o tempo de coleta de dados e processamento, o número de pessoas envolvida no campo, o custo do equipamento, a segurança do operador e a acurácia obtida no produto final.

Tabela 4 - Avaliação dos métodos de coleta de dados e acurácia do produto final.

Etapa de cada método	RPAS	GNSS	LiDAR
Tempo de levantamento	10 min. 	8 horas 	12 horas 
Tempo de pós-processamento	8 horas 	1 hora 	48 horas 
Nº de pessoas envolvidas	2 pessoas 	1 pessoa 	3 pessoas 
Custo do equipamento	R\$ 55 mil 	R\$ 75 mil 	R\$ 800 mil 
Segurança	Alta 	Baixa 	Moderada 
Acurácia	0,3 m 	1,0 m 	1,3 m 

Fonte: Silva et al., (2015).

Braz *et al* (2015), geram 13 mosaicos com a finalidade de obter parâmetros confiáveis para correlacionar a quantidade de pontos de controle com a diferença de área calculada para a determinação de cadastro florestal. Na região de estudo foram implantados 21 alvos pré-sinalizados, sendo gerado um mosaico sem ponto de apoio, outro com 21 pontos de apoio e 11 mosaicos iniciando um 1 ponto e apoio, incrementado de uma unidade até o total de 11. A área e o perímetro mensurada nos mosaicos foram comparadas as obtidas pelo levantando usando um receptor de sinal GNSS pelo método de posicionamento RTK.

As fotografias foram tomadas com a câmara Canon Elph RGB acoplada ao RPAS eBee da Sensefly. A altura de voo foi de 488m, sendo tomadas 108 fotografias com GSD de 15 cm, cobrindo uma área de 186 ha (BRAZ *et al*, 2015).

Como resultado obtido, foi verificado que os mosaicos com menos de 2 pontos de controle apresentaram uma diferença de área máxima de 0,16% comparada a área determinada por GNSS. Com a utilização de 2 ou mais pontos de controle a diferença máxima obtida foi de 0,07%, mostrando que o levantamento por RPAS têm um grande potencial para determinar áreas de cadastro florestal e mesmo sem a utilização de pontos de controle (BRAZ *et al*, 2015).

2.8. FILLER

Filler ou resíduos de beneficiamento de rocha é o material extremamente fino, oriundo da moagem fina da rocha. No filler, no mínimo, 75% das partículas possuem diâmetro inferior à 75 mm ou 0,075 mm (DESTEFANI, 2000).

No Brasil, até o final dos anos de 1990, o filler era considerado um subproduto da moagem das rochas e gerava um passivo ambiental, pelo seu descarte. Devido a sua granulometria fina, isento de impurezas e metais pesados, o filler, passou a ser comercializado em mercados específicos, como o da construção civil, agricultura e indústria de isolamento acústico e térmico. (SBRIGHI, 2020; OLIVEIRA, 2016).

No Brasil, o filler, é obtido pela moagem de rocha como: granito gnaisses, calcários, basaltos e diabásios. Por esse motivo, a composição mineralógica e formato do grão está em função da rocha de sua origem. (SBRIGHI, 2020).

Filler de basalto ou diábase estão sendo utilizados para a produção de lã ou fibra de basalto, conhecidos pela sua alta resistência química, absorção acústica e baixa condutividade térmica. (SBRIGHI, 2020; SEQUEIRA, 2020).

Na agricultura, a incorporação do filler ao solo é conhecido como rochagem. A rochagem auxilia na correção do pH, liberando lentamente os nutrientes, reduzindo a sua lixiviação, além de ser uma fonte de micronutrientes. (JUNIOR, 2016; SBRIGHI, 2020).

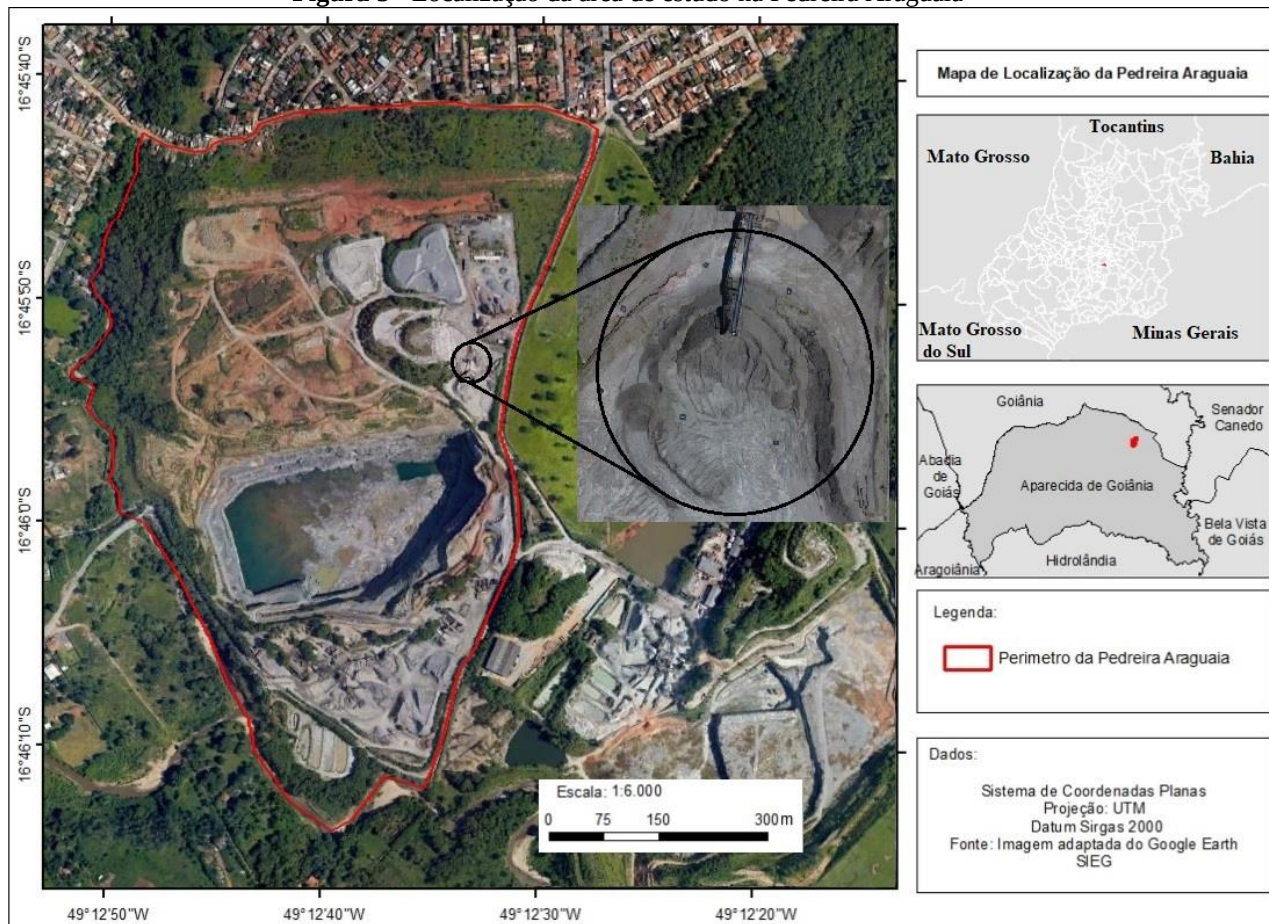
3. METODOLOGIA

A metodologia é apresentada em área de estudo e métodos.

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é uma pilha de rejeito formada pelo material denominado filler, localizada na pedreira Araguaia, no município de Aparecida de Goiânia. Essa pilha ocupa uma área de 260 m² e altura de 6 metros. A localização da área de estudo está na Figura 5.

Figura 5 - Localização da área de estudo na Pedreira Araguaia



Fonte: Os autores, adaptado do Google Earth e SIEG

3.2. MÉTODOS

Nessa pesquisa foi comparado o volume de uma pilha de rejeito de filler obtido por um levantamento topográfico planialtimétrico com o volume determinado pelo aerolevanteamento realizado com voo cruzado, voo circular e voo cruzado mais circular com sem apoio de apoio.

Assim na região de estudo foram distribuídos 9 (nove) alvos pré-sinalizados, sendo 8 (oito) próximos ao sopé da pilha e um em seu cume. Desses alvos, 5 (cinco) foram usados como controle e 4 como verificação. Os pontos de controle foram distribuídos 1 (um) em cada vértice do bloco e próximo ao centro do bloco no cume da pilha.

Os alvos pré-sinalizados foram construídos em um quadrado de papelão pintado de preto com um círculo branco em seu centro. O diâmetro do círculo branco foi de 5 (cinco) vezes o GSD e o quadrado 25 vezes o GSD, apesar da literatura indicar 15.

O levantamento planimétrico foi realizado em uma poligonal fechada, sendo o bastão de ré e vante apoiado em um tripé para manter a sua verticalidade e estabilidade. As coordenadas tridimensionais iniciais do primeiro vértice da poligonal foram determinadas pelo uso de um receptor GNSS marca Trimble modelo R4 no método de posicionamento estático rápido, sendo o azimute da ré calculado pelas coordenadas determinadas no último ponto da poligonal.

O levantamento topográfico foi calculado em coordenadas no sistema de projeção UTM, porém, o mesmo foi considerado como plano devido à área de estudo ser inferior à 300 m².

Os ângulos e distâncias entre os pontos da poligonal foram determinados pela média aritmética de uma série de 6 (seis) leituras angulares e lineares. Caso a discrepância entre as leituras angulares ou lineares fossem superiores à precisão da estação total, a série deveria ser abandonada.

Para descrever adequadamente o relevo da pilha os detalhes morfológicos foram irradiados assim como os alvos pré-sinalizados.

O voo cruzado foi planejado no programa Pix4D e o circular no programa DroneX Pro, ambos os voos foram realizados com um Phantom 4 Pro.

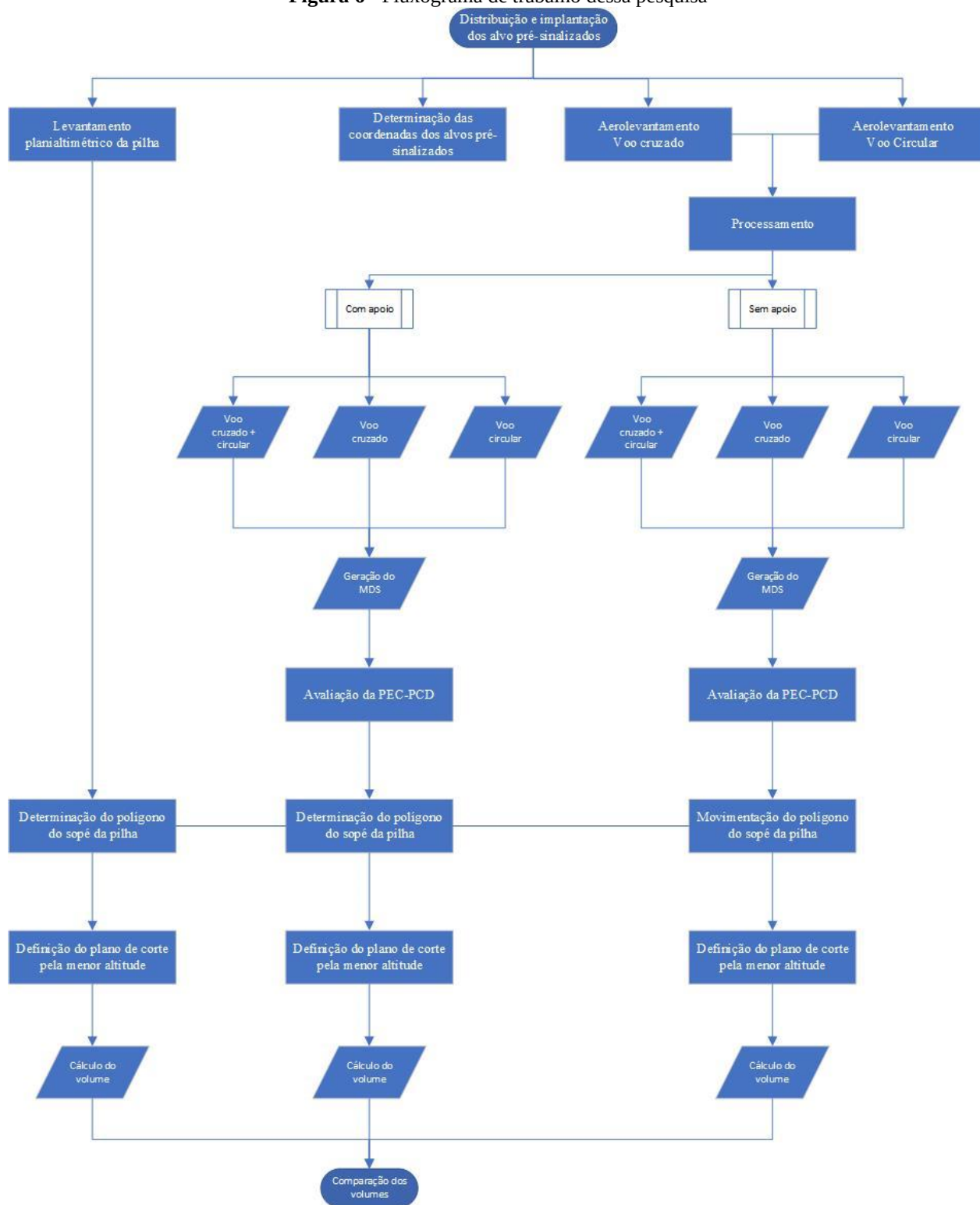
Os ortomosaicos, MDS e volumes usando as fotografias aéreas foram determinados no programa Agisoft Metashape versão 1.7.1.11797 no modo demo.

O polígono que definiu o sopé da pilha de rejeito foi gerado pelo levantamento topográfico e importado para o Agisoft onde foi calculado o seu volume. No ortomosaico e MDS determinados sem pontos de apoio, o polígono que delimitou o sopé da pilha de rejeito deve ser movido caso haja deslocamento desses produtos devido à sua tendenciosidade.

O plano que definiu a base para o cálculo do volume foi sempre a menor altitude determinada no MDS.

Na Figura 6 está a representação do fluxograma dessa pesquisa.

Figura 6 - Fluxograma de trabalho dessa pesquisa



Fonte: Os autores (2021)

4. RESULTADOS

Para a melhor facilidade de leitura os resultados e discussões foi realizado por tópicos.

4.1. LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO

O levantamento planialtimétrico foi realizado com uma estação total da marca FOIF modelo RTS 105, conforme Figura 7, com precisão angular de 5" e precisão linear com prisma de $2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ e de $3\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ para medidas sem prisma.

A poligonal foi composta por 3 (três) vértices, sendo o erro angular de $0^\circ 00' 08''$ e o linear de 8,4 mm, assim a precisão angular do levantamento foi de $0^\circ 00' 04,6''$ e precisão linear de $\frac{1}{16.873,81}$.

Para modelar a pilha foram coletados 272 pontos, além dos 9 (nove) alvos pré-sinalizados. O levantamento planialtimétrico foi realizado em 2,5 horas e o processamento dos dados (cálculo das coordenadas e volume) 2 horas, perfazendo um total de 4,5 horas.

Para que o referencial topográfico fosse o mesmo do aerolevanteamento, as coordenadas iniciais do primeiro ponto da poligonal assim como o seu azimuth, foram determinadas no sistema de projeção UTM no Datum SIRGAS 2000. Essas coordenadas foram obtidas pelo posicionamento de um receptor de sinais GNSS da marca Trimble modelo R4 com tempo de ocupação de 18 minutos, com taxa de gravação de 1" e máscara de elevação de 10° . A base teve tempo de ocupação de 3 horas, sendo suas coordenadas determinadas no site do IBGE por posicionamento de ponto preciso (PPP).

Figura 7 - Estação total FOIF Modelo RTS 105

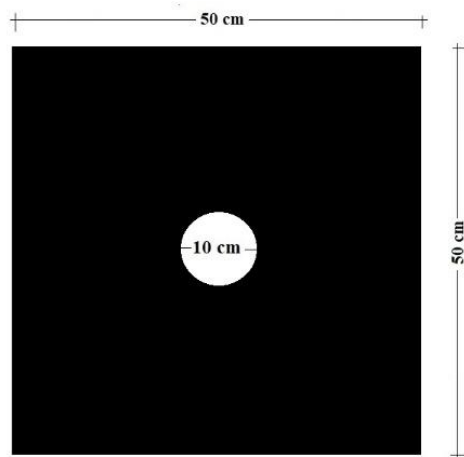


Fonte: Os autores (2021)

4.2. DISTRIBUIÇÃO E IMPLANTAÇÃO DOS ALVOS PRÉ-SINALIZADOS

Na área de estudo foram distribuídos 9 (nove) alvos pré-sinalizados, conforme modelo sugerido por Wolf (2004). O quadrado possui 50 cm de lado ou 25 vezes o GSD, o círculo central possui 10 cm ou 5 vezes o GSD, conforme Figura 8.

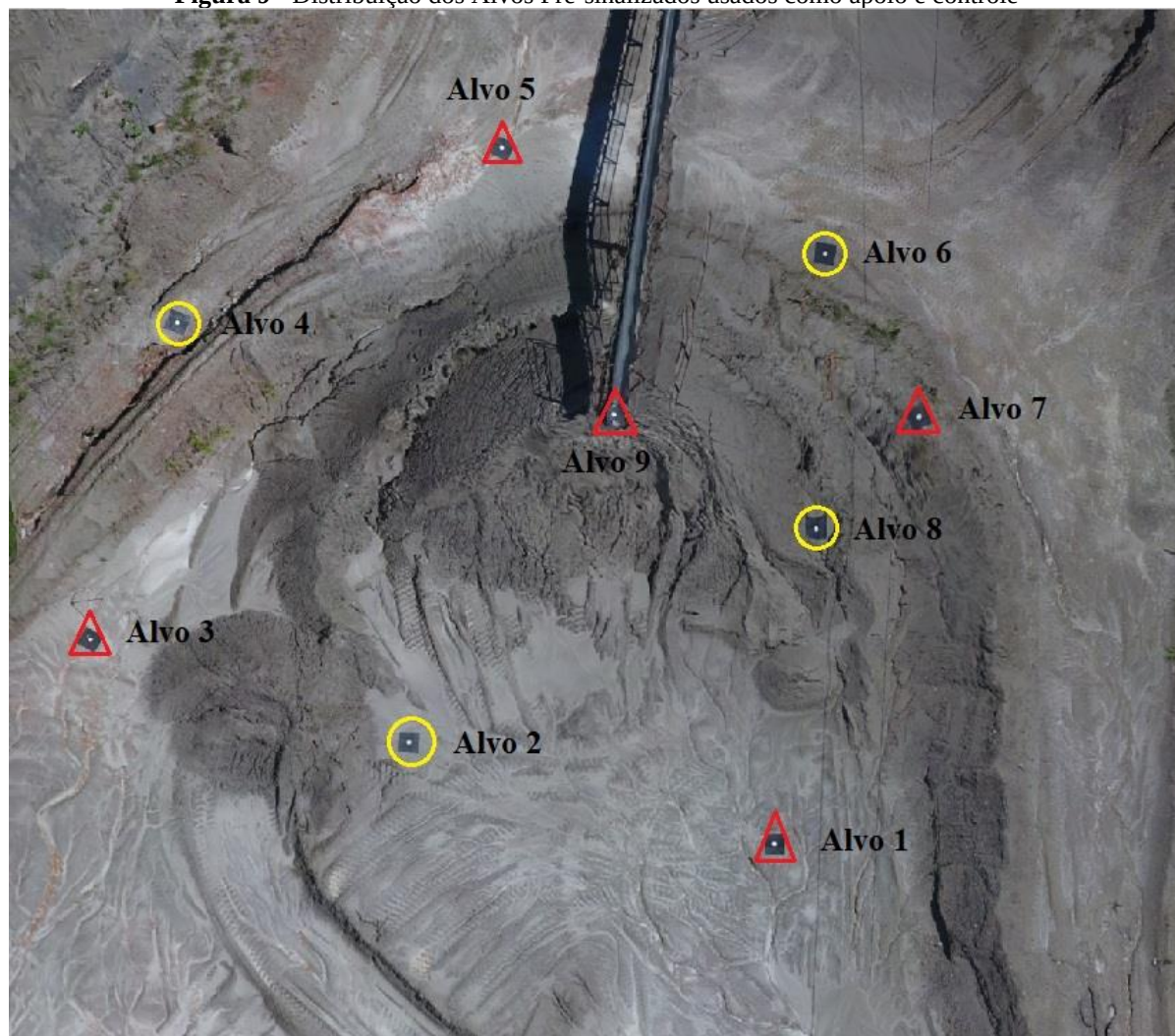
Figura 8 - Formato e dimensões dos Alvos Pré-sinalizados



Fonte: Os autores (2021)

Os alvos pré-sinalizados 1,3,5,7 e 9 foram usados como pontos de apoio e os 2, 4, 6 e 8 como pontos de verificação, conforme Figura 9.

Figura 9 - Distribuição dos Alvos Pré-sinalizados usados como apoio e controle



Fonte: Os autores (2021)

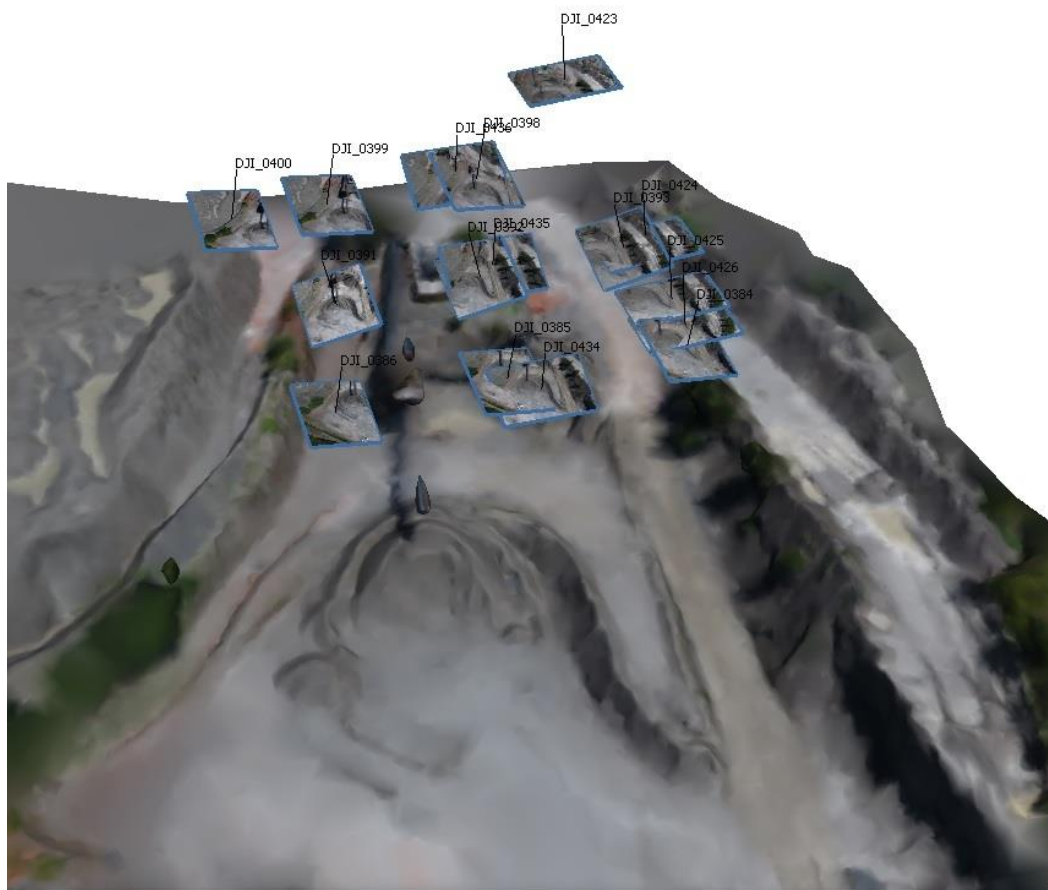
4.3. AEROLEVANTAMENTO

Nessa pesquisa foram realizados 2 (dois) voos, sendo um voo cruzado e o outro circular à pilha, ambos realizado com o RPAS Phantom 4 PRO.

4.3.1. Voo cruzado

O voo cruzado foi planejado no programa Pix4D, para ter GSD de 2 (dois) centímetros, altura de voo de 51 metros, recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 60%. Esse voo foi composto por contendo 4 (quatro) faixas, sendo 2 (duas) perpendiculares à pilha e 2 (duas) ortogonais a essa, conforme Figura 10. O bloco ficou com 16 fotografias.

Figura 10 - Posição das fotografias no voo cruzado



Fonte: Os autores (2021)

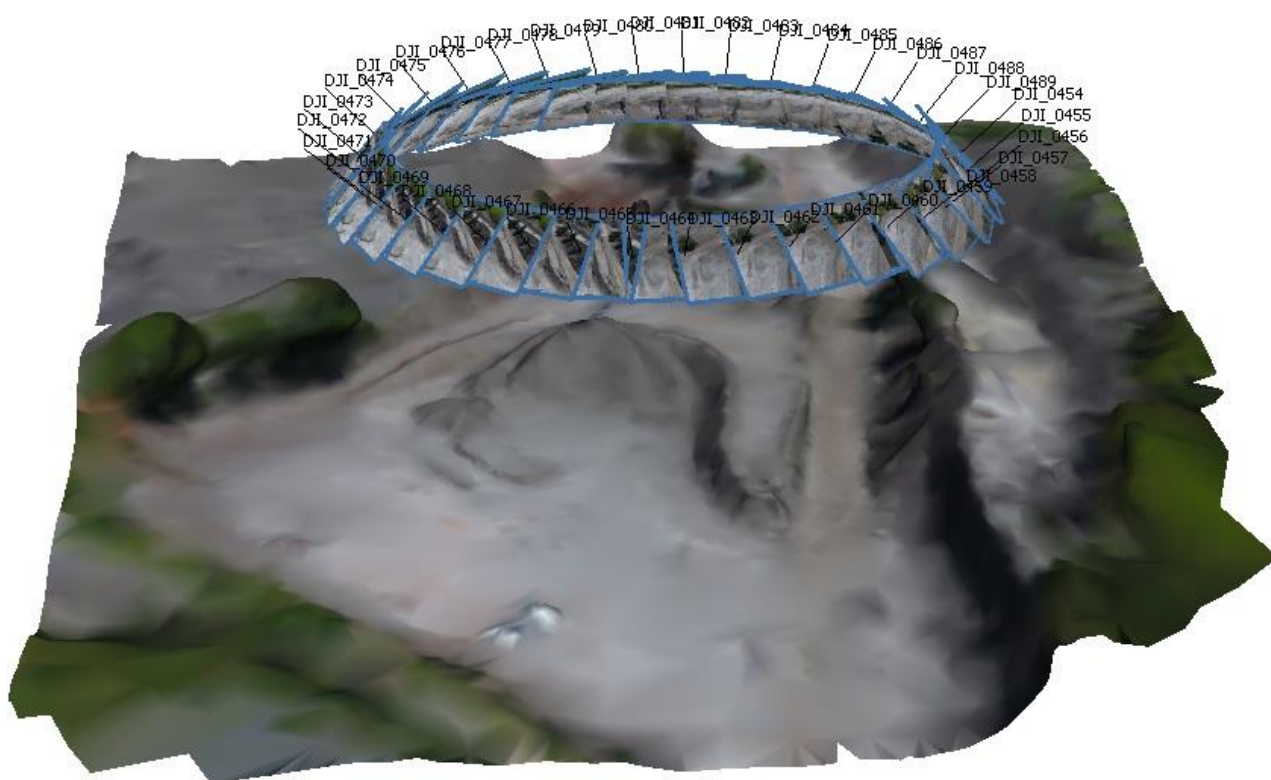
4.3.2. Voo Circular

O voo circular foi planejado no programa DroneX Pro, para ter GSD de 2 (dois) centímetros, altura de voo de 45 metros, recobrimento longitudinal de 80% e raio de 25 m.

No voo circular, o RPAS sempre mantém a câmara voltada para o centro do círculo, para não aparecer a linha do horizonte, a câmara foi inclinada em 30°.

O bloco foi composto por 52 fotografias. Na Figura 11 estão as posições das fotografias.

Figura 11 - Posição das fotografias no voo circular



Fonte: Os autores (2021)

4.4. PROCESSAMENTO DOS AEROLEVANTAMENTOS

Todos os aerolevantamentos foram processados no programa Agisoft Metashape, da seguinte forma, voo cruzado mais voo circular com e sem apoio; voo cruzado com e sem apoio e voo circular com e sem apoio.

Para a geração do ortomosaico foi usado a seguinte sequência de processamento:

- 1- Alinhamento das fotografias;
- 2- Se processamento com pontos de apoio, identificação dos pontos de apoio em todas as fotografias;
- 3- Identificação dos pontos de controle em todas as fotografias;
- 4- Aplicação das correções das distorções do sistema de lentes (otimização da câmara);
- 5- Densificação dos pontos;
- 6- Classificação dos pontos por filtragem em pontos de terrenos, edificações; estradas, carros, entre outras classes previamente definidas;
- 7- Geração do modelo digital de superfície;
- 8- Filtragem manual dos pontos que definem a esteira que transporta o material para a pilha;
- 9- Geração do modelo digital de terreno;
- 10- Geração do ortomosaico; e
- 11- Impressão do relatório de processamento.

Na **Tabela 5** estão os parâmetros determinados após o processamento de cada voo, sendo eles: o tipo de voo, o número de fotografias do bloco, a altura de voo, o GSD, o número de pontos de passagem, o número de pontos identificados no bloco (número de projeção) e a média de pontos identificados por fotografia.

Tabela 5 - Parâmetros determinados após o processamento de cada voo.

Voo	Nº Fotografias	Altura de voo	f calibrada (mm)	GSD (cm)	Pontos passagem	Pontos homólogos	Pontos homólogos fotografia
Cruzado Circular com Apoio	52	46,0	3,67	1,95	52879	219448	4,15
Cruzado com Apoio	16	51,1	3,99	2,00	15087	40095	2,66
Circular com Apoio	36	45,8	3,64	1,96	38733	134624	3,48
Cruzado Circular sem Apoio	52	46,9	3,70	1,98	50143	178979	3,57
Cruzado sem Apoio	16	50,7	4,02	1,97	14722	41884	2,84
Circular sem Apoio	36	46,2	3,65	1,98	34057	132482	3,89

Fonte: Os autores (2021)

Analisando a Tabela 5, nota-se que a altura de voo, no voo cruzado com e sem apoio ficou próxima de 51m, o mesmo ocorreu com a altura de voo do voo circular com e sem apoio que ficou em 46 metros. Porém ao processar simultaneamente o voo cruzado com o circular, com e sem apoio, a altura de voo ficou próxima do voo circular, provavelmente por ter 3,25 vezes mais fotografias que o voo cruzado

Ainda na Tabela 5, percebe-se que o GSD em todos os voos processados ficou próximo de 2 centímetros, nota-se ainda que a distância focal calibrada em todos os processamentos com voo cruzado, a distância focal calibrada ficou próxima de 3,7 mm sendo que o fabricante informa que esse valor é de 3,61 mm. A distância focal calibrada no voo cruzado com e sem apoio ficou próxima de 4,0 mm, portanto, maior que a indicada pelo fabricante.

Percebe-se que nos voos cruzado mais circular ou circular, com ou sem apoio, os pontos homólogos foram identificados em média em 3,8 fotografias, ao passo que os voos cruzados com ou sem apoio ficaram em 2,8 fotografias. Portanto, a inclusão do voo circular gerou um ganho de aproximadamente 37% na identificação dos pontos homólogos, aumentando a rigidez do bloco e influenciando na precisão planimétrica e altimétrica.

Ainda na Tabela 5, nota-se que o número de pontos homólogos identificados no voo circular sem apoio foi maior que no voo cruzado e circular sem apoio, ao contrário do verificado com esses mesmos voos com apoio.

Analisando a matriz de variância e covariância dos parâmetros de orientação interior, Apêndice I, expressa no relatório do processamento, percebe-se que a existiu correlação entre a distância focal e o parâmetro de distorção radial simétrica k_1 no processamento do voo cruzado com e sem apoio. Essa correlação pode explicar o aumento da distância focal.

Ainda na matriz de variância e covariância dos parâmetros de orientação interior, percebe-se que existiu correlação entre a distância focal com o afastamento do ponto principal no eixo y (c_y) em todos os processamentos realizados.

4.5. DA AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA

Apesar do objetivo dessa pesquisa ser a avaliação altimétrica, também foi avaliado a precisão planimétrica de acordo com o padrão de exatidão cartográfica para produtos digitais (PEC-PCD) por entenderem que a ausência de acurácia planimétrica pode afetar a avaliação do volume, pois o mesmo é influenciado diretamente pela área de projeção da pilha.

Antes de realizar qualquer teste de verificação da precisão ou acurácia, foi verificado se a amostra a ser analisada pode ou não ser considerada normal. Esse fator é de primordial importância, pois os testes estatísticos t-student e qui-quadrado (χ^2) usados para avaliar a precisão e acurácia podem ser aplicados se e somente se a amostra for normal.

O teste de normalidade empregado foi o Shapiro-Wilk, pois todas as amostras tem o seu tamanho inferior a 30 elementos.

Na **Tabela 6** está o resultado da aplicação do teste Shapiro-Wilk, nas discrepâncias de coordenadas planimétricas e altimétricas.

Para uma amostra planimétrica ser considerada normal a mesma tem que ser normal nos eixos E e N. Caso a amostra não seja normal em qualquer um dos eixos, a amostra planimétrica não pode ser considerada normal e, portanto, não se pode garantir a eficácia dos testes de precisão e acurácia.

A amostra é considerada normal se o valor calculado for superior ao tabelado. Assim, analisando os dados da **Tabela 6**, percebe-se que em todos os voos processados tanto na planimetria como na altimetria, as amostras para a verificação da acurácia e precisão, foram estatisticamente consideradas normais.

Tabela 6 - Resultado da aplicação do teste Shapiro-Wilk (W) nas amostras planimétricas e altimétrica.

Parâmetros		Cruzado Circular com apoio	Cruzado com apoio	Circular com apoio	Cruzado Circular sem apoio	Cruzado sem apoio	Circular sem apoio
Planimetria	$W_{\text{calculado_eixo_E}}$	0,959	0,859	0,845	0,819	0,856	0,896
	W_{tabelado}	0,770	0,258	0,210	0,141	0,245	0,411
	Normalidade eixo E	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	$W_{\text{calculado_eixo_N}}$	0,956	0,831	0,957	0,972	0,997	0,782
	W_{tabelado}	0,219	0,171	0,759	0,854	0,989	0,074
	Normalidade eixo N	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Normal E e N	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Altimetria	$W_{\text{calculado_eixo_h}}$	0,983	0,888	0,954	0,975	0,901	0,949
	W_{tabelado}	0,918	0,374	0,743	0,871	0,434	0,707
	Normalidade eixo h	Sim	Sim	Sim	Sim	sim	Sim

Fonte: Os autores (2021)

4.5.1. Precisão e acurácia planimétrica

Na **Tabela 7** está a estatística básica, média e desvio padrão, usada para a aplicação do teste t-student e qui-quadrado (χ^2), obtida pelas discrepâncias entre as coordenadas planimétricas reais e as obtidas no ortomosaico.

Para maior clareza dos dados, também foram apresentados a máxima e mínima discrepância de cada conjunto de dados.

Tabela 7 - Média, desvio padrão, máxima e mínima discrepância planimétrica de cada tipo de voo

Parâmetros	Cruzado Circular com apoio (m)	Cruzado com apoio (m)	Circular com apoio (m)	Cruzado Circular sem apoio (m)	Cruzado sem apoio (m)	Circular sem apoio (m)
Média E	0,002	0,001	-0,002	0,571	-0,880	-0,321
Desv Pad E	0,006	0,014	0,011	0,161	0,291	0,035
Média N	-0,002	0,023	0,014	-0,164	0,771	-0,065
Desv Pad N	0,009	0,017	0,015	0,067	0,267	0,054
Máxima E	0,011	0,010	0,013	0,762	-0,536	-0,297
Mínima E	-0,003	-0,047	-0,013	0,398	-1,237	-0,372
Máxima N	0,008	0,015	0,036	-0,085	1,156	0,014
Mínima N	-0,011	-0,016	0,001	0,215	0,536	-0,114

Fonte: Os autores (2021)

Analisando a **Tabela 7**, percebe-se que todos os voos processados com pontos de apoio apresentaram valores estatísticos inferiores aos dos processados sem apoio, conforme esperado.

Assim, classificando os resultados estatísticos da melhor para a pior discrepâncias, tem-se: 1- Voo Cruzado e Circular com apoio; 2- Voo Circular com apoio; 3- Voo Cruzado com apoio; 4- Voo Cruzado e Circular sem apoio; 5- Voo Circular sem apoio e 6- Voo Cruzado sem apoio.

Um produto cartográfico é considerado preciso, ou sem tendência, se a média das discrepâncias entre o valor real e o obtido na carta for considerado estatisticamente igual a zero.

Para verificar se o produto cartográfico foi deslocado, ou seja, se possui ou não tendenciosidade, foi aplicado o teste t-student em todos os processamentos dos voos, cujos resultados estão na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Resultados do teste t-student aplicado nas discrepâncias de cada voo processado

Parâmetros	Cruzado Circular com apoio	Cruzado com apoio	Circular com apoio	Cruzado Circular sem apoio	Cruzado sem apoio	Circular sem apoio
t_{tab}	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
$t_{calculado_eixo_E}$	0,36	0,51	0,38	7,08	6,05	18,46
$t_{calculado_eixo_N}$	1,89	0,18	1,91	5,9	5,77	2,39
Tendencia	Não	Não	Não	Sim E e N	Sim E e N	Sim E e N

Fonte: Os autores (2021)

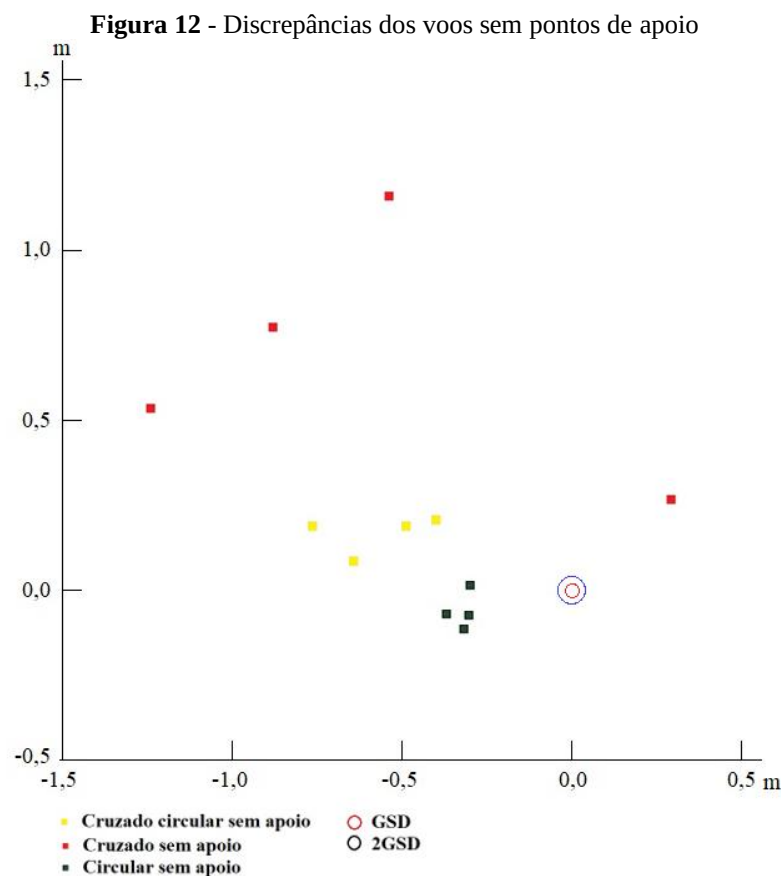
Analisando a **Tabela 8**, nota-se que em todos os voos com apoio não existiu tendenciosidade pois o valor da distribuição t-student tabelado sempre foi maior que a calculada. Indicando assim, a precisão dos voos com apoio, ou seja, a média do deslocamento entre o valor real e o obtido no ortomosaico pode ser estatisticamente considerado igual a zero.

Como esperado, todos voos sem apoio apresentaram tendenciosidade nos eixos E e N, pois foi usado um receptor de sinais GPS somente com código C/A para realizar o georreferenciamento da posição da câmara.

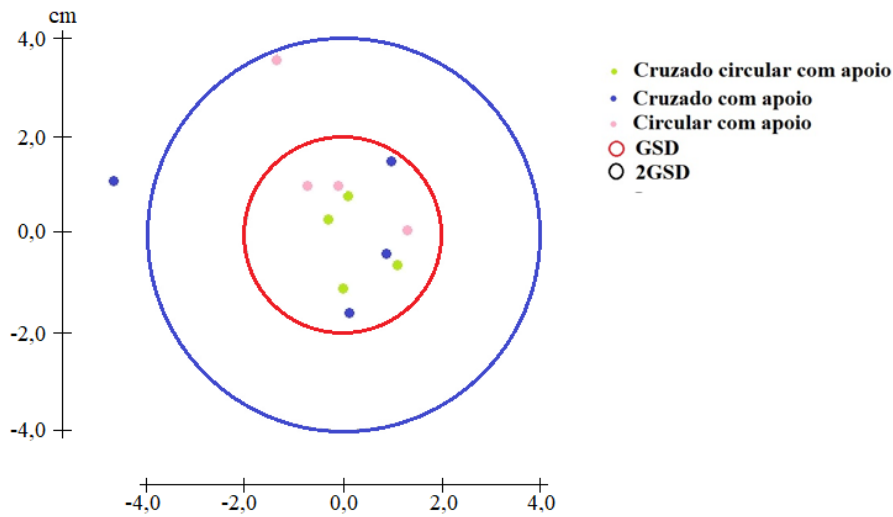
Com o intuito de visualizar a distribuição das discrepâncias e verificar a presença de tendencia nos eixos E e N, foram elaboradas a **Figura 12** para os voos com pontos de apoio, e a **Figura 13** para os voos sem pontos de apoio. Note que no voo cruzado circular com apoio todas as discrepâncias foram inferiores ao GSD. No voo circular com apoio as discrepâncias foram inferiores a 2xGSD e no voo cruzado com apoio as discrepâncias foram inferiores a 3xGSD.

As discrepâncias do voo circular sem apoio ficaram concentradas, indicando a sua precisão e tendenciosidade menor que no voo cruzado circular sem apoio, que apresentou maior tendenciosidade pela dispersão e afastamentos dos pontos entre si.

Porém os pontos mais dispersos foram os com o voo cruzado e sem apoio.



Fonte: Os autores (2021)

Figura 13 - Discrepâncias dos voos com pontos de apoio

Fonte: Os autores (2021)

A acurácia de cada voo processado foi determinada sempre no PEC-PCD Classe A+ considerando a maior escala de impressão e após aproximando esse valor para a escala comercial.

Na **Tabela 9** estão os valores obtidos para a maior escala de impressão, a escala comercial, o qui-quadrado (χ^2) calculado e tabelado para cada eixo E e N. O produto é considerado acurado, se e somente se o valor do qui-quadrado (χ^2) tabelado for maior que o calculado.

Tabela 9 - Qui-quadrado tabelado e calculado para cada voo, maior escala e a escala comercial.

Parâmetros	Cruzado Circular com apoio	Cruzado com apoio	Circular com apoio	Cruzado Circular sem apoio	Cruzado sem apoio	Circular sem apoio
Maior Escala	58	158	86	930	1680	314
Escala Comercial	75	200	100	1000	2000	500
χ^2_{Tabelado}	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
$\chi^2_{\text{calculado_eixo_E}}$	2,23	5,93	3,32	6,24	6,25	2,54
$\chi^2_{\text{calculado_eixo_N}}$	4,62	1,65	6,20	0,78	5,26	6,23

Fonte: Os autores (2021)

Como esperado o voo cruzado e circular foi o que apresentou maior escala de impressão, $\left(\frac{1}{58}\right)$, seguido do voo circular com apoio $\left(\frac{1}{86}\right)$, do voo cruzado com apoio $\left(\frac{1}{158}\right)$, seguido do voo

circular com apoio $\left(\frac{1}{314}\right)$, voo cruzado e circular sem apoio, $\left(\frac{1}{930}\right)$ e do voo cruzado com apoio $\left(\frac{1}{1680}\right)$.

A melhor precisão planimétrica do voo circular sem apoio com relação ao voo cruzado e circular sem apoio, pode ser justificada pela maior identificação de pontos homólogos conforme apresentado na Tabela 5.

4.5.2. Precisão e acurácia altimétrica

Com a Equação 20 é possível determinar a precisão altimétrica esperada, porém essa formulação foi desenvolvida para ser aplicada com fotografias consideradas verticais, ou seja, com inclinação em seu eixo vertical de $\pm 5^\circ$. Por esse motivo, a precisão altimétrica esperada foi determinada somente para o voo cruzado com e sem apoio, sendo esse valor de 0,09m ou 9 cm.

Na **Tabela 10** são apresentados os valores da estatística básica, como média e desvio padrão, usados para a aplicação do teste t-student e qui-quadrado (χ^2) para verificar a precisão e acurácia do modelo digital de terreno processado. Além desses valores, nessa tabela também foi incluído a maior e menor discrepância obtidas nos pontos de verificação.

Tabela 10 - Média, desvio padrão, máxima e mínima discrepância altimétrica de cada tipo de voo

Parâmetros	Cruzado Circular com apoio (m)	Cruzado com apoio (m)	Circular com apoio (m)	Cruzado Circular sem apoio (m)	Cruzado sem apoio (m)	Circular sem apoio (m)
Média	0,006	-0,021	0,001	-1,377	3,053	1,576
Desvio Pad	0,021	-0,039	0,019	0,063	0,340	0,123
Máximo	0,033	0,027	0,023	-1,313	3,360	-1,457
Mínimo	-0,018	-0,066	-0,019	-1,458	2,572	-1,734

Fonte: Os autores (2021)

Analisando a **Tabela 10**, conforme o esperado, o MDT determinado usando pontos de apoio apresentaram média e desvio padrão inferiores aos dos processados sem apoio. Classificando os MDT pelos valores da estatística tem-se: Voo Circular com apoio, Voo Cruzado e Circular com apoio, Voo

Cruzado com apoio, Voo Cruzado e Circular sem apoio, Voo Circular sem apoio e Voo Cruzado sem apoio.

Para verificar a precisão do modelo digital de terreno, ou seja, se o mesmo possui ou não tendenciosidade, foi aplicado o teste t-student em todos os processamentos dos voos, cujos resultados estão na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado da aplicação do teste t-student no MDT dos voos processados

Parâmetros	Cruzado Circular com apoio	Cruzado com apoio	Circular com apoio	Cruzado Circular sem apoio	Cruzado sem apoio	Circular sem apoio
t_{tab}	2,350	2,350	2,350	2,350	2,572	2,350
$t_{calculado_eixo_h}$	0,550	1,250	0,140	44,020	17,969	25,540
Tendencia	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim

Fonte: Os autores (2021)

Analisando a Tabela 11, nota-se que em todos os voos com apoio não existiu tendenciosidade no MDT avaliado, pois o valor da distribuição t-student tabelado sempre foi maior que a calculada. Assim, pode-se afirmar que nos MDT obtidos com apoio, a média das discrepâncias de nível entre as altitudes no terreno com as obtidas no MDT podem ser estatisticamente consideradas igual zero. Como esperado, todos voos sem apoio apresentaram tendenciosidade na altitude.

A acurácia de cada voo processado foi determinada sempre considerando o mesmo como Classe A+ no PEC-PCD determinado a menor equidistância entre as curvas de nível e depois aproximado para o múltiplo de 5 imediatamente superior.

Na **Tabela 12**, estão os valores obtidos para a menor equidistância entre as curvas de nível, e o qui-quadrado (χ^2) calculado e tabelado para cada eixo E e N. O produto é considerado acurado, se e somente se o valor do qui-quadrado (χ^2) tabelado for maior que o calculado.

Tabela 12 - Menor equidistância entre as curvas de nível e os valores do calculado e tabelado.

Parâmetros	Cruzado Circular com apoio (m)	Cruzado com apoio (m)	Circular com apoio (m)	Cruzado Circular sem apoio (m)	Cruzado sem apoio (m)	Circular sem apoio (m)
Equidistância Mínima	0,09	0,17	0,10	0,27	1,42	0,52
Equidistância	0,10	0,20	0,10	0,30	1,50	0,60
$\chi^2_{tabelado}$	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
$\chi^2_{calculado_h}$	6,00	5,73	6,17	5,80	6,19	6,08

Fonte: Os autores (2021)

Analisando a **Tabela 12**, percebe-se que a equidistância entre as curvas de nível do voo cruzado e circular com apoio foi igual ao do voo circular com apoio (10 cm). Seguindo pelo voo cruzado com apoio (20 cm), depois pelo cruzado e circular sem apoio (30 cm), circular sem apoio (60 cm) e finalmente o cruzado sem apoio (1,50 m ou 150 cm), sendo esses resultados esperados.

4.6. Cálculo do Volume

O volume determinado pela topografia foi considerado isento de erro, portanto, o valor de referência para a comparação com o volume obtido pela Fotogrametria.

Usando os dados topográficos, definiu-se o sopé da pila, sendo esse polígono importado no programa Agisoft Metashape. Nos voos sem apoio, devido à tendenciosidade do produto gerado, o polígono que definiu o sopé da pilha foi translado para o melhor encaixe, porém sua forma e dimensões não foram alteradas.

O cálculo do volume pela Fotografia usou como referência o plano que passa pelo sopé da pilha. Na Tabela 13, estão os volumes determinados pela topografia, Fotogrametria, sua discrepância, diferença e percentual da diferença.

Tabela 13 - Volume determinado pela topografia, Fotogrametria, sua discrepância, diferença e percentual da diferença.

Método de levantamento	Volume (m ³)	Diferença Volume (m ³)	Diferença volume %
Topografia	613,61	-	-
Cruzado circular com apoio	609,75	3,86	0,63
Cruzado com apoio	632,18	18,58	3,03
Circular com apoio	605,01	8,59	1,40
Cruzado circular sem apoio	635,59	21,99	3,58
Cruzado sem apoio	683,28	69,68	11,36
Circular sem apoio	637,14	23,53	3,84

Fonte: Os autores (2021)

Analisando a Tabela 13, percebe-se que somente o volume determinado com o voo cruzado circular com apoio e circular com apoio foi inferior ao determinado pela topografia.

A menor diferença de volume foi a verificada entre a topografia e o MDT determinado no voo cruzado circular com apoio de 3,86 m³, ou 0,63%, seguido pelo circular com apoio 8,59 m³, ou 1,40%, seguido pelo cruzado com apoio 18,58 m³, ou 3,03%, cruzado circular sem apoio de 21,99 m³, ou 3,58%, seguido pelo circular sem apoio 23,53 m³, ou 3,84%, seguido pelo cruzado sem apoio 69,68 m³, ou 11,36%.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Sem sombra de dúvidas a Fotogrametria é capaz de fornecer um volume próximo da topografia, nessa pesquisa, a menor discrepância foi de $3,86 \text{ m}^3$, ou 0,63%. Além disso, o tempo de tomada das fotografias foi de 13 minutos, sendo 7 (sete) minutos para o voo cruzado e 6 (seis) minutos para o voo circular. O tempo distribuição, implantação e obtenção das coordenadas tridimensionais dos alvos foi aproximadamente 1 (uma) hora.

O tempo de processamento das fotografias foi de 8h e 12 minutos, mais 3 horas para identificar 409 pontos homólogos dos alvos pré-sinalizados em todas as fotografias. Portanto o tempo total gasto no levantamento com alvos pré-sinalizados foi de 12 horas e 25 minutos, ou passo que nos voos sem apoio foi de 8h e 25 minutos. A topografia realizou o mesmo trabalho em 4,5 horas.

Se o levantamento aerofotogramétrico for realizado sem pontos de apoio, o trabalho de campo se restringirá em 13 minutos e usar voo cruzado e circular. Se somente voo circular apenas 6 minutos. Portanto, caso a pilha esteja em operação com retirada e acréscimo de material pela esteira, a diferença de volume será somente do material retirado ou acrescido em 13 ou 6 minutos, conforme o tipo de voo realizado. Ressalta-se que os alvos pré-sinalizados não precisam de ter as suas coordenadas mensuradas antes da realização do voo, podendo as mesmas serem obtidas posteriormente.

Em caso de voo sem apoio o operador do RPAS não precisa sequer aproximar da pilha, podendo inclusive ficar fora da área da pedreira. Caso use, alvos pré-sinalizados, um auxiliar deverá implantar, distribuir os alvos próximos ao pé da pilha, devendo tomar cuidado, com os objetos projetados pela esteira e o tráfego de veículos, caso a pilha esteja em operação.

Levando em consideração, o custo do equipamento, a segurança do operador e o resultado obtido, é indicado o uso de fotografias aéreas tomadas em voo circular sem apoio, sempre a diferença de volume de 4% não influencie no resultado. Caso essa diferença não possa ser desconsiderada, indica-se tomar as fotografias em voo circular e com apoio.

O voo circular apresentou resultados mais confiáveis que o voo cruzado, porém a sua combinação ofereceu um pequeno ganho na determinação do volume.

Apesar da Fotogrametria usar mais tempo de processamento, os resultados obtidos nos voos circular, com ou sem apoio, são capazes de atender a outras atividades de necessitam da determinação de volume de forma rápida e de forma remota.

Conforme parâmetros estabelecidos para a Classe A + do PEC-PCD, o MDT gerado com voo cruzado circular ou com voo circular e com apoio, apresentou equidistância de 10 cm, ou seja, 90% dos pontos bem definidos no MDT tem erro inferior a 2,7 cm com desvio padrão de 1,7 cm.

Conforme parâmetros estabelecidos para a Classe A + do PEC-PCD, o MDT gerado com voo cruzado com apoio, apresentou equidistância de 20 cm, ou seja, 90% dos pontos bem definidos no MDT tem erro inferior a 5,4 cm com desvio padrão de 3,3 cm. Assim, pode-se afirmar que o voo circular com apoio gerou um ganho de 100% na equidistância se comparado com o voo cruzado com apoio.

Foi concluído que o volume determinado com pontos de apoio em voo circular ou cruzado e circular ficaram próximos do determinado pela topografia com discrepância inferior à 1,5%, calculando o volume sem pontos de apoio, essa diferença foi inferior a 5%. Desse modo, o volume determinado sem pontos de apoio pela Fotogrametria em voo circular ou cruzado e circular será capaz de atender a maioria das aplicações que necessitam de determinar o volume de forma rápida e remota.

É recomendado que sempre que possível usar voo circular na determinação do volume ou a sua combinação com o voo cruzado.

Recomenda-se ainda comprar o volume obtido com voo cruzado e circular ou somente o circular com o obtido em pilha de granulometria grossa como em pilha de matacão.

Repetir essa metodologia comparando o volume obtido pela Fotogrametria o obtido por laser scanner.

Determinar o volume com fotografias terrestres tomadas circulando a pilha, eliminando assim, a necessidade do RPAS.

Que essa pesquisa seja repetida em pilhas mais altas e em maior número de vezes para validar ou não a metodologia aqui proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**, Ed. Wichmann, Karlsruhe, 1989.

ALVES JÚNIOR, L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; SILVA, J. R.; FERREIRA, M. E. **Validação de ortomosaicos e modelos digitais de terreno utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT** Revista Brasileira de Cartografia, nº 67 vol 7, Rio de Janeiro, 2015.

BRAZ, E. M., BORGES, J. P. S., BERNARDES, D. C. S., TEREZAN, L. H. **Análise da aplicação de VANT na atualização de cadastro florestal com uso de pontos de controle**. In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE

COELHO, M. O; MARTINS G. D; GALLIS, R. A. B; **Quantificação do Volume de Minério em Pilhas a Partir da Integração e Comparação Topografia/Fotogrametria**, Anuário do Instituto de Geociência - UFRJ; Vol. 12 nº 1, p.301-307, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: http://www.anuario.igeo.ufrj.br/2019_01/2019_1_301_307.pdf Acessado em: 01/10/2019.

CÔRTEZ, J.B.R. **O uso de fotografias aéreas de pequeno formato digitalizadas em mapeamento topográfico planimétrico**. Dissertação de mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

CORTES, J. B. R. **Análise da estabilidade de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração**. Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: < https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/24923/final_quin_ficha.pdf?sequence=1&isAlloved=y >. Acesso em: 08 ago. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sumário Mineral** – Brasília, 2015. ISSN 0101 – 2053. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015> >. Acesso em: 28 agost. 2018.

DESTEFANI, A. Z; HOLANDA. J. N. F. **Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade**. Grupo de Materiais Cerâmicos.Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.Campos dos Goytacazes-RJ.2000

DJI <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro/info>

GALO, M.; CAMARGO, P. O. **O uso do GPS no controle de qualidade de cartas**. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, Florianópolis – SC. Anais, p. 41 - 48, 1994.

JUNIOR. M. J. Z; **Doses de calcário filler e efeitos na fertilidade do solo, desenvolvimento e produção de soja**; Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT. Sinop – MT. 2016.

KRAUS, K. **Photogrammetry - Fundamentals and Standard Process**. Dummmler/Bonn, v.1, p.397, 1993.

MAROTTA, G. S.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, L. H.; ALMEIDA, T. **Avaliação geométrica de câmara de pequeno formato Transportada por veículo aéreo não tripulado para uso em aerolevantamentos**, Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, n. 67/3, p. 591 - 601, 2015.

MERCHANT, D. C. **Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps**. In: Technical Congress on Surveying and Mapping. Proceedings. v. 1, p. 222 - 231, 1982.

MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; CENTENO, J. A. S. **Indirect georeferencing of digital SLR imagery using signalised lidar control points**. The Photogrammetric Record, v. 26, p. 58 - 72, 2011.

MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; CENTENO, J.; MACHADO, A, M. **Small- Format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation**. In: MMT09 2009 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology. Proceedings. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 7 p, 2009. CD-ROM.

MITISHITA, E. A.; CÔRTEZ, J. B. R.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M. L.; MARTINS, M. **Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration**. In: Canadian Geomatics Conference, Calgary, Alberta. Anais, 7 p, 2010.

NAZARENO, N. R. X.; FERREIRA, N. C.; MACEDO, F. C. **Avaliação da Exatidão Cartográfica da Ortoimagem Quickbird e da Ortofoto Digital do Município de Goiânia**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal-RN. Anais, p. 1771 - 1778, 2009.

OLIVEIRA. T. C.F; POSSAN. E; **Aplicação da fração fina de resíduos de concreto como filler ao cimento**; Universidade Federal da Integração Latino-Americano-PR. 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, S. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RODRIGUES, A. A. **Uso de veículos aéreos não tripulados para mapeamento e avaliação de erosão urbana**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SBRIGHI, C: **Um produto versátil para alavancar a indústria de agregados**. Edição 13 / Dez/2020.

SCHIEWE, J. **Cartographical Potential of MOMS-02/D2 Image Data**, Photogrammetric Week ‘95’. Wichmann Verlag, Heidelberg, p.95- 106,1995. Disponível em:< <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo95/schiewe.pdf> > Acesso em 25 ago. 2020.

SEQUEIRA. E. M; GHISLENI. G; **A influência da adição de filler calcário em substituição parcial ao cimento em argamassa estabilizada de revestimento de paredes e tetos**; Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental; Florianópolis.2020

SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S. SABADIA, J. A. B. **Utilização de VANT para geração de ortomosaicos e aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), João Pessoa. 2015. Anais... João Pessoa: INPE, 2015.

SILVA, C. A. DA; DUARTE, C. R.; SOUTO, SABADIA, M. V.; SANTOS, A. L. S. DOS; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. **Avaliação da Acurácia do Cálculo de Volume de Pilhas de Rejeito Utilizando VANT, GNSS e LiDAR** - *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, nº 1, p.73 - 94, jan-mar, Curitiba, 2016.

TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; RUY, R. da S. **Sensoriamento remoto aerotransportado: uma abordagem usando câmeras digitais**. In: Fernando Luiz de Paula Santil; Hélio Silveira; Maria Luzia de Souza; e Fernando Ricardo dos Santos. (Org.). Recursos tecnológicos aplicados à Cartografia. Maringá: Sthampa Gráfica e Editora, 2010, v. 1, p. 81-116.

WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. **Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement**. The Photogrammetric Record, v. 22, n. 118, p. 121 - 134, 2 WACKROW 2007.

WOLF, D. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. Third edition - The McGraw-Hill Companies, 2004.

APÊNDICE I - MATRIZ VARIÂNCIA COVARIÂNCIA DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR

Voo cruzado circular com apoio, coeficientes de calibração e matriz de correlação

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2354.28	0.65	1.00	0.08	-0.81	0.02	0.07	-0.05	0.08	-0.05
Cx	-8.57324	0.53		1.00	-0.06	-0.02	-0.01	0.03	0.92	0.01
Cy	44.3142	0.83			1.00	-0.24	0.16	-0.15	-0.07	0.82
K1	0.00870434	0.00056				1.00	-0.94	0.86	-0.02	-0.23
K2	-0.0254595	0.0012					1.00	-0.97	-0.05	0.12
K3	0.0142743	0.00088						1.00	0.06	-0.13
P1	-0.000217303	8e-05							1.00	0.02
P2	0.000582376	8.3e-05								1.00

Voo cruzado com apoio, coeficientes de calibração e matriz de correlação

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2344.62	0.98	1.00	-0.18	-0.92	0.63	-0.09	0.06	-0.15	-0.81
Cx	-12.678	0.14		1.00	0.14	-0.10	0.01	-0.01	0.69	0.14
Cy	38.3054	0.36			1.00	-0.67	0.15	-0.11	0.11	0.87
K1	-0.0141658	0.00032				1.00	-0.75	0.68	-0.16	-0.74
K2	-0.0131014	0.00043					1.00	-0.98	0.04	0.17
K3	0.00584402	0.00027						1.00	-0.04	-0.13
P1	- 0.000143799	1.7e-05							1.00	0.18
P2	0.00361927	4.1e-05								1.00

Voo circular com apoio, coeficientes de calibração e matriz de correlação

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2335.97	0.63	1.00	-0.13	-0.98	-0.06	-0.00	0.01	-0.06	-0.12
Cx	-5.46616	0.13		1.00	0.14	0.01	0.01	-0.01	0.96	0.09
Cy	64.1571	0.65			1.00	-0.04	0.10	-0.09	0.06	0.23
K1	0.00501852	0.00019				1.00	-0.94	0.86	-0.02	-0.11
K2	-0.0142376	0.00035					1.00	-0.98	0.01	0.08
K3	0.00596494	0.00022						1.00	-0.01	-0.04
P1	0.000379352	1.9e-05							1.00	0.05
P2	0.000281475	2.1e-05								1.00

Voo cruzado circular sem apoio, coeficientes de calibração e matriz de correlação

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2370.26	0.16	1.00	-0.01	-0.77	-0.16	0.21	-0.19	0.03	-0.23
Cx	-9.84847	0.099		1.00	-0.03	0.03	-0.02	0.01	0.89	0.02
Cy	27.7917	0.14			1.00	-0.13	0.06	-0.05	-0.07	0.52
K1	0.00652921	0.00016				1.00	-0.94	0.88	0.01	-0.21
K2	-0.0185669	0.00032					1.00	-0.98	-0.02	0.07
K3	0.00836882	0.00021						1.00	0.02	-0.05
P1	-0.000134765	1.4e-05							1.00	0.01
P2	0.000380358	1.3e-05								1.00

Voo cruzado sem apoio, coeficientes de calibração e matriz de correlação

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2574.29	1.4	1.00	-0.20	-0.98	0.69	-0.05	-0.00	-0.12	-0.89
Cx	-15.3462	0.12		1.00	0.18	-0.12	-0.02	0.02	0.79	0.18
Cy	-35.2586	0.53			1.00	-0.72	0.09	-0.03	0.11	0.92
K1	0.00462199	0.00031				1.00	-0.68	0.61	-0.11	-0.77
K2	-0.0145081	0.00049					1.00	-0.98	-0.01	0.11
K3	0.00519318	0.00038						1.00	0.01	-0.06
P1	-0.000120596	1.4e-05							1.00	0.15
P2	0.000737276	4.5e-05								1.00

Voo cruzado circular sem apoio, coeficientes de calibração e matriz de correlação

	Valor	Erro	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	2336.85	0.69	1.00	-0.13	-0.98	-0.09	0.03	-0.02	-0.05	-0.08
Cx	-6.08599	0.13		1.00	0.13	0.04	-0.02	0.02	0.96	0.06
Cy	62.5222	0.72			1.00	-0.02	0.07	-0.07	0.05	0.17
K1	0.00632027	0.00021				1.00	-0.95	0.88	0.01	-0.01
K2	-0.0155132	0.00039					1.00	-0.98	-0.02	0.02
K3	0.00648569	0.00023						1.00	0.02	0.01
P1	0.000315661	1.9e-05							1.00	0.01
P2	0.000353597	2.2e-05								1.00