

COMPARATIVO ENTRE CÁLCULO DE VOLUMES REALIZADOS A PARTIR DE LEVANTAMENTO COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (ARP), EM DIFERENTES ALTURAS DE VOO

COMPARATIVE OF VOLUMETRIC MEASUREMENTS OBTAINED FROM A REMOTELY PILOTED AIRCRAFT (RPA) SURVEY, IN DIFFERENT FLIGHT ALTITUDES

Vinicius Mesquita Esteves <vinicius-me@hotmail.com>
Huízes Eustáquio Fernandes <huizes@gmail.com>
Otacílio José da Silva Neto <otaciliomg@gmail.com>
Rodrigo Pinto da Silva <rodrigopintodasilva80@gmail.com>
Pedro Donizete Parzzanini <parzzanini@hotmail.com>

RESUMO

O uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) tem se tornado cada vez mais frequente para o levantamento de dados topográficos. Este trabalho tem como objetivo geral analisar resultados obtidos em cálculos volumétricos de uma pilha de argila, realizados a partir de levantamento com ARP, em diferentes alturas de voos. Trata-se de uma pesquisa de campo que busca comparar os resultados e avaliar qual a altura ideal para a realização do voo, gerando menor margem de erro nos cálculos volumétricos da pilha. Para tanto, foram realizados voos com alturas de 60, 90 e 120m, e posteriormente o levantamento da mesma área utilizando a tecnologia de LST (Laser Scanner Terrestre) como base de referência para comparação com volumes encontrados. Para georreferenciar o projeto, foram utilizados pontos de controle, coletados por meio de receptores GNSS RTK. A análise da acurácia posicional do produto gerado pelo levantamento do ARP foi realizada por meio do software GeoPEC, com uso de pontos de checagem. A pilha estudada possui uma área de aproximadamente 0,44 ha com volume médio de 2980m³, sendo encontradas diferenças volumétricas menores que 0,5% entre os cadastros topográficos.

Palavras-chave: Fotogrametria. Aerolevanteamento. ARP. Volume.

ABSTRACT

The use of remotely piloted aircraft (RPA) for topographic surveying is getting more common than ever. The present paper aims to validate the results obtained by volumetric calculations of a clay stockpile, carried out through data collected from a RPA in different flight altitudes. It is a field research that seeks to compare the results and assess which is the ideal altitude for the flight, causing the smaller margin of error in a volumetric calculation of a stockpile. For such, flights of the following altitudes were performed: 60, 90 and 120 meters, with an extra survey using a TLS (Terrestrial Laser Scanner) for volume benchmark. For the project's georeferencing, ground control points were collected using GNSS RTK receivers. The accuracy analysis of the product generated from the RPA surveying was done using the software GeoPEC, through checkpoints. The chosen stockpile occupies an area about 0,44 ha with an average volume of 2980m³, with volumetric differences between the topographic surveys less than 0,5%.

Keywords: Photogrammetry. Aerial survey. RPA. Volume.

Correspondência/Contato

FEAMIG

Rua Gastão Braulio dos Santos, 837
CEP 30510-120
Fone (31) 3372-3703
parametrica@feamig.br
http://www.feamig.br/revista

Editores responsáveis

Wilson José Vieira da Costa
wilsoncosta@feamig.br

Raquel Ferreira de Souza
raquel.ferreira@feamig.br

1 INTRODUÇÃO

A ciência para o reconhecimento das feições topográficas e descrição do espaço físico vem sofrendo transformações relevantes com o dinâmico desenvolvimento tecnológico. Os principais exemplos são as denominadas ARPs (Aeronaves Remotamente Pilotadas), onde se destacam para a realização de mapeamentos de grandes áreas, proporcionando uma satisfatória relação entre custo/benefício, uma vez que permitem o mapeamento de grandes áreas por uma equipe pequena e em tempo reduzido.

Atividades em que se exigem monitoramento constante e de forma assertiva vem se beneficiando com a adoção desta tecnologia, que incluem as aplicações na área de mineração, como cubagem de pilhas e estoque, projetos de acesso viário, atualização da frente da mina, dentre outros. Na área urbana vale destacar a utilização dessa tecnologia na produção e atualização de dados cartográficos para subsidiar o Cadastro Técnico Multifinalitário (Silva, 2019, p. 102).

Para este estudo foi determinada uma área dentro da Cerâmica Parapuan, localizada na cidade de Pará de Minas, Minas Gerais.



Figura 1: Localização da área de estudo

Fonte: Adaptado pelos autores do Google Earth (2020)

Foram realizados cálculos volumétricos de uma pilha de argila separadamente para cada altura de voo para se avaliar o quão relevante é variação entre entres. Paralelamente aplicou-se um estudo da acurácia posicional dos dados gerados com o objetivo de validar os dados coletados em campo. Os resultados deste estudo poderão auxiliar no planejamento financeiro e operacional da fábrica em questão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Técnicas de levantamentos topográficos

Para Nogueira (2014), levantamento topográfico refere-se a um conjunto de processos e métodos onde, seja por meio de medições topográficas (ângulos horizontais, verticais, distâncias horizontais ou inclinadas e diferença de nível) ou através do uso de receptores GNSS (Global Navigation Satellite System), realiza-se medições sobre a superfície terrestre com a finalidade de representação gráfica de uma porção do terreno sobre uma superfície plana.

Ainda segundo o autor, atualmente a técnica mais utilizada para uma precisão posicional ao nível de poucos centímetros para os pontos levantados é a topografia convencional, que utiliza as Estações Totais (levantamentos planialtimétricos), níveis (levantamento altimétrico) ou ainda, com menor precisão, de teodolitos (levantamentos planialtimétricos ao nível de decímetros).

Nogueira (2014) também aponta como alternativa produtiva e confiável a utilização de receptores GNSS RTK (Real Time Kinematic), uma vez que durante o levantamento obtém-se as correções em tempo real, permitindo assim acompanhar a solução do vetor e da precisão obtida no instante da coleta dos pontos. O tempo de posicionamento para coleta dos pontos no método RTK é consideravelmente inferior aos outros métodos citados.

Com o crescente avanço tecnológico, a utilização do LST – Laser Scanner Terrestre vem ganhando destaque para estudos que exigem alta precisão de modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais de terreno (MDT) (PIROTTI et al. 2012).

2.2 Fotogrametria

Segundo Andrade (2003), a ciência e a tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e medidas de imagens é a fotogrametria.

A fotogrametria tem seu maior campo de utilização na elaboração de mapas com a ajuda de outras ciências como a Geodésia e a Cartografia. Nesta área, as imagens fotográficas são usadas para o posicionamento de pontos da superfície terrestre e para o mapeamento de temas do objeto fotografado, tais como: rede de drenagem, florestas, culturas, rede viária, feições geológicas e tipo de solo.

Os pontos são posicionados através de métodos da triangulação fotogramétrica ou fototriangulação, que são conhecidos por denominações menos comuns como aerotriangulação, triangulação aérea ou triangulação espacial.

2.3 Aeronave Remotamente Pilotada – ARP

De acordo com o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial - RBAC-E nº 94, da ANAC, o termo Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) se refere a uma aeronave não tripulada, pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota que tenha qualquer outra finalidade que não seja recreativa, tais como comercial, corporativa e experimental. Outro termo popularmente utilizado para descrever qualquer aeronave com alto grau de automatismo é o “*drone*”, assim como a sigla VANT, que significa Veículo Aéreo Não Tripulado. A regulamentação não utiliza estas nomenclaturas “*drone*” e VANT, mas sim aeromodelos e aeronaves remotamente pilotadas (ANAC, 2017).

2.4 Ortofotografia

Ortofotografias ou ortofotos são imagens geradas a partir de imagens aéreas com foco na posição vertical ou semi-vertical em relação à câmera e seu alvo. Na ortofoto são removidos os efeitos de deslocamento de relevo do terreno e inclinações da aeronave. Geradas de maneira adequada, essas imagens digitais possuem uma qualidade posicional que atende os mais diversos fins. (MORGAN; FALKNER, 2001).

Existem dois métodos de retificar imagens aéreas em uma ortofoto. No primeiro método utiliza-se pontos de controle determinados por topografia convencional, através do levantamento realizado por GNSS ou através da obtenção desses pontos em mapas já elaborados. Tendo os pontos de controle posicionados em locais de fácil identificação e suas coordenadas precisas, um algoritmo computacional reposiciona os pixels das imagens de forma a encaixarem suas coordenadas virtuais às aquelas coletas em campo. O segundo método se dá na utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE). As elevações são coletadas de modelos estereoscópicos obtidos dos modelos fotogramétricos para formar o MDE. A relação matemática entre as coordenadas reais e as das imagens aéreas digitais também é gerada a partir de um algoritmo computacional possibilitando assim a ortorretificação. (DEMPSEY, 2003).

2.5 Nuvem de pontos

Nuvens de pontos são blocos de pontos definidos em um sistema de coordenadas qualquer, possuem um sistema tridimensional de coordenadas, definidos pelos eixos X, Y e Z e são geralmente atribuídos à superfície externa de uma região. Essa densidade de pontos georreferenciados é complementada com o uso de linhas tridimensionais que

representam as mudanças significativas de terreno, sejam elas naturais ou artificiais. (Dharmapuri; Tully, 2018).

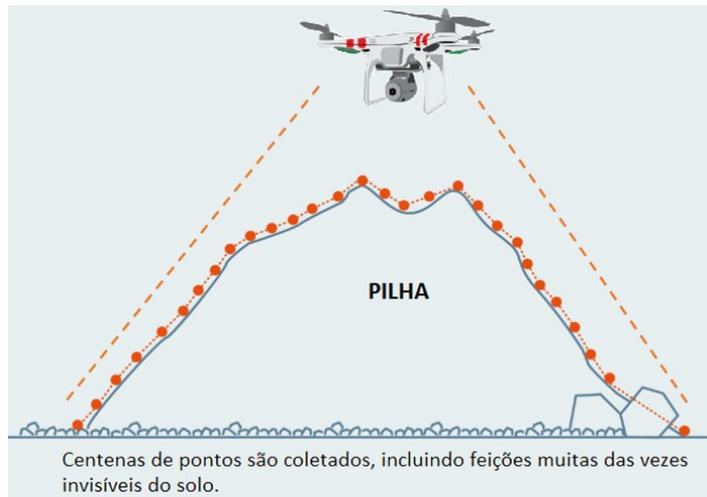


Figura 2: Nuvem de pontos representando a topografia de uma pilha

Fonte: Adaptado de WINGTRA (2019)

A partir da nuvem de pontos é possível efetuar medições de coordenadas, distâncias, elevações de um terreno, gerar modelos digitais de elevações (MDE), imagens ortorretificadas e malhas tridimensionais. (HORUS AERONAVES, 2017).

2.6 Modelo digital de terreno (MDT)

O modelo digital de terreno (MDT) pode ser conceituado com um modelo matemático que representa graficamente a superfície topográfica real de determinada região a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos referenciados à um sistema de coordenadas qualquer, sendo a elevação a representação da variação contínua da superfície topográfica. (Assad; Sano, 1998).

2.7 Acurácia posicional de ortofotos

Por serem tratados dados coletados, medidos e processados, produtos geoespaciais, como qualquer outra medição, estão sujeitos a variados tipos de erros, sejam eles de natureza grosseira, sistemática ou aleatória. Erros grosseiros podem ser encontrados e eliminados com maior facilidade, sendo os erros sistemáticos e aleatórios entendidos como parte de qualquer medida por nunca serem conhecidos. Apesar disso, estes erros podem ser mitigados de alguma forma quando se avalia uma ordem de grandeza com qualidade superior a outra. (Monico et al., 2009).

Acurácia e precisão são termos que caminham juntos quando se trata de ajustamento de observações, sendo a acurácia o grau de proximidade de uma estimativa com seu parâmetro (ou valor verdadeiro) e a precisão é tida como o grau de consistência da grandeza medida com sua média. (Mikhail; Ackermann, 1983).

Pela definição de Gauss, acurácia envolve ambos os erros sistemáticos e aleatórios, enquanto a precisão está ligada somente aos erros aleatórios. Uma medida de acurácia é denominada de erro quadrático médio (EQM), sendo na aerofotogrametria este erro representado pela sigla RMSE (*root mean square error*). (Silva, 2019).

No que diz respeito à qualidade de produtos cartográficos, no Brasil temos sua definição pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), estabelecida pelo Decreto nº. 89.817 de 20 de junho de 1984, estabelecendo uma metodologia de procedimentos de checagem quanto à acurácia posicional dos produtos cartográficos. (BRASIL, 1984).

Com os avanços tecnológicos e a necessidade de maior entendimento em relação à padronização dos critérios de qualidade posicional, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) introduziu a Especificação Técnica de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) com a premissa de orientar e padronizar a forma de aquisição da geometria de dados geoespaciais vetoriais. (DSG, 2011).

Com a ET-ADGV ficou mais claro como deve ser a aplicação do Decreto nº. 89.817 (Brasil, 1984), criando uma classe específica para produtos cartográficos digitais (PEC-PCD). Já em 2016, a Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) apresentou a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (DCT/DSG, 2016) para atender ao Decreto nº. 6.666/2008 (Brasil, 2008), prevendo a implantação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), sendo a principal meta fornecer diretrizes para avaliação da qualidade dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais integrantes do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) do Brasil (Silva, 2019).

2.8 Acurácia posicional no modelo digital de elevação (MDE)

Duas maneiras são reconhecidas como possíveis no estudo da acurácia posicional em uma base cartográfica: analisando o seu processo de produção e pela avaliação técnica do produto gerado. (López; Balboa; Pulido, 2004).

É possível perceber que esta última forma é mais utilizada para a avaliação da qualidade posicional de dados espaciais, através da aplicação de testes estatísticos de amostragem de dados e checagem. Em relação aos componentes posicionais a serem

avaliados, estes podem ser planimétricos (X e Y) ou planialtimétricos (X, Y, Z), sendo a representação do modelo digital de terreno (MDT) um desses dados.

2.9 Quantificação volumétrica

Existem diversas indústrias que exigem para suas atividades a correta determinação de áreas e volumes de ocupação de materiais de estoque e produtos. As metodologias para determinação desses dados têm tido como base levantamentos topográficos cujas técnicas evoluíram ao longo dos tempos, sempre buscando precisão e rapidez. Há duas formas de se determinar o volume de produtos sólidos: determinado a partir de sua massa por intermédio de balanças ou por levantamentos topográficos que caracterizam a conformação espacial desses produtos. Especificamente na aerofotogrametria, a partir do MDT, o volume é obtido com a comparação entre a conformação cadastrada do terreno com sua feição física original, as chamadas “primitivas”, sendo sua diferença o volume de material depositado. (Ribeiro Júnior, 2011).

Uma das formas de avaliação da acurácia volumétrica é sua análise com base no método de testes de hipóteses, que é baseado na análise de tendência e precisão do material a ser calculado, os testes para essa análise são feitos por meio da detecção de tendências, baseada na distribuição t de Student, identificando a existência de erros sistemáticos, e a análise de precisão baseada na distribuição Qui-quadrado, avaliando assim os efeitos dos erros a partir da análise de tendência e precisão, sendo os resultados obtidos classificados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (Silva et al., 2016).

3 METODOLOGIA

Este trabalho está ancorado nos dados coletados em campo e processados em escritório, sendo seus resultados avaliados para esclarecimento do problema de pesquisa.

Foram adotados os seguintes métodos para a coleta de dados:

- Observação de literatura técnica;
- Definição e marcação de pontos de controle e checagem (GNSS RKT);
- Planejamento e realização do plano de voo (ARP);
- Levantamento da área de estudo utilizando o LST;
- Processamento do levantamento realizado pela ARP;

- Processamento do levantamento realizado pelo LST

- Geração dos produtos obtidos a partir dos dados do ARP (ortofoto, nuvem de pontos, modelo digital de superfície e modelo digital de terreno).

Estes recursos possibilitaram a interpretação dos resultados e suas implicações diante dos diversos questionamentos que giram em torno do problema de pesquisa.

3.1 Caracterização e localização da área de estudo

Apesar da região mapeada ser de 1,32 ha, a área de estudo foi de aproximadamente 0,44 ha. Essa área está contida no pátio da Cerâmica Parapuan, localizada no município de Pará de Minas, estado de Minas Gerais, com coordenadas geográficas 19°52'44,98"S e 44°36'07,58"W, no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

No pátio existem quatro pilhas de argila dispostas de forma a facilitar a logística do material até os fornos. Para esta pesquisa de campo foi escolhida uma das pilhas que se encontra na parte oeste da planta da cerâmica.

3.2 Sinalização e rastreamento dos pontos de controle e pontos de checagem

Os pontos de controle e pontos de checagem foram materializados através de marcas criadas com cal, em formato de "X", com tamanho aproximado de 70x70cm.

O número total de pontos de controle marcados foram 11 e os pontos de checagem 4, distribuídos dentro da área definida no planejamento de voo e especialmente na região da pilha de argila estudada.

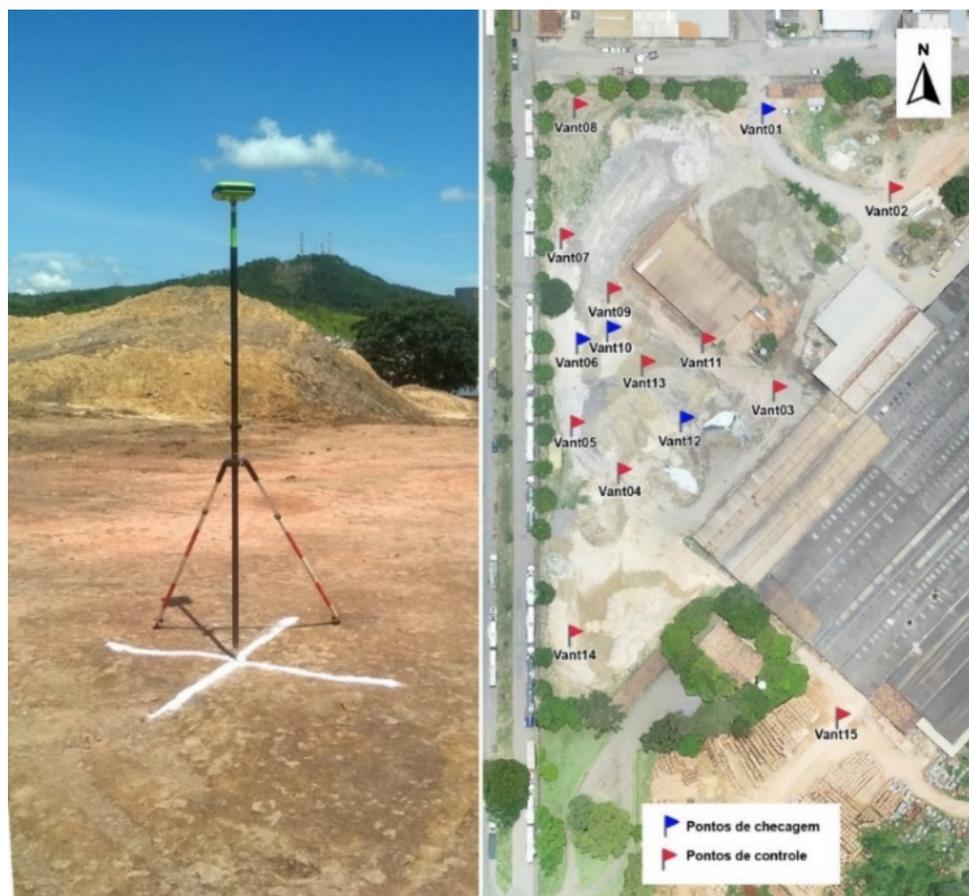


Figura 3: Sinalização e distribuição dos pontos de controle e pontos de checagem

Fonte: Autores (2020)

Para o rastreamento das coordenadas tridimensionais (E, N, Z) foi utilizado um par de receptores GNSS RTK modelo Triumph-1 marca Javad. Este equipamento foi utilizado para o levantamento acurado das posições dos pontos de controle, dos pontos de checagem e das posições do laser scanner.

3.3 Processamento dos pontos de controle e pontos de checagem

As coordenadas do ponto de partida para a amarração de todo o projeto foram determinadas pelo processamento via IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso ou Posicionamento Absoluto Preciso) onde trata-se de um serviço on-line para o pós-processamento de dados GNSS (Global Navigation Satellite System).

Ao final do processamento, obteve-se as coordenadas $E(m)=541455,459$, $N(m)=7801918,881$ e $Alt. \text{ Elipsoidal } (m)=841,030$, com precisão planimétrica de 2 mm e a precisão altimétrica de 6 mm.

3.4 Planejamento e execução dos voos

O planejamento e as respectivas configurações dos parâmetros de voos foram executados com a utilização do aplicativo DJI Pilot, versão Android. As linhas de voo foram planejadas para se obter sobreposição longitudinal e lateral de 80%.

Para a realização dos voos e aquisição das aerofotografias foi utilizada uma ARP, da marca DJI, modelo Phantom 4 Pro, com autonomia de aproximadamente 30 minutos.

3.5 Equipamentos utilizados para varredura com laser scanner

Foi utilizado o equipamento laser scanner terrestre, modelo VZ 400i, marca RIEGL, sendo o processamento dos dados efetuado pelo software denominado RiscanPro em sua versão 2.9.0.

A amarração das varreduras realizadas pelo scanner ao sistema de coordenadas do projeto se dá a partir da determinação das coordenadas de todas as posições de instalação do laser. Essas coordenadas foram determinadas utilizando receptores GNSS, marca JAVAD, modelo Triumph 1.

3.6 Limitações da pesquisa

A proposta desta pesquisa está na avaliação dos diferentes resultados volumétricos de pilhas de matéria prima da indústria de cerâmica obtidos através de cadastros topográficos levantados por ARP em diferentes alturas de voo.

A quantidade de dados levantados foi limitada pelos equipamentos disponíveis e legislação vigente em torno da altura máxima de voo permitida com ARP. Por se tratarem de tecnologias e métodos novos para obtenção de dados geoespaciais, a bibliografia existente, juntamente com as normas técnicas não contemplam muitas das situações enfrentadas no dia a dia para esse tipo de trabalho.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Geração das nuvens de pontos a partir dos dados levantados com ARP, nas alturas de 60m, 90m e 120m

O processamento das imagens obtidas no voo fotogramétrico foi realizado utilizando-se o software Agisoft Metashape, seguindo basicamente 5 etapas: (1) calibração automática da câmera – com base nos dados do EXIF das fotografias; (2) alinhamento das fotos – a partir dos pontos em comum entre as fotografias e pontos de apoio de solo; (3) geração da

nuvem de pontos – com base correlação de imagens, feita por meio de medições de similaridade entre as imagens sobrepostas, são identificadas as coordenadas tridimensionais (x, y, z) da superfície fotografada; (4) geração do modelo digital de elevação e (5) geração das ortofotos com a finalidade de medir a acurácia posicional do levantamento.

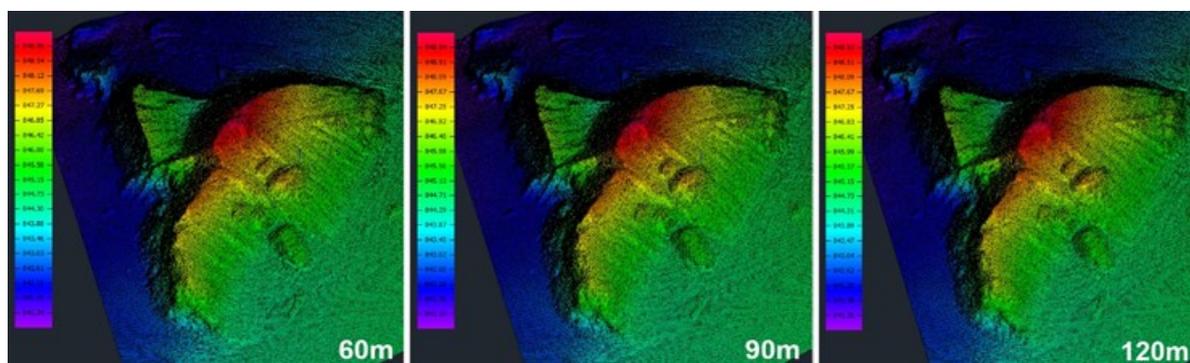


Figura 4: Nuvem de pontos com visualização do mapa de alturas

Fonte: Autores (2020)

A visualização dos mapas de alturas possibilita a leitura das diferentes altitudes da pilha em estudo, obtidas nos levantamentos com ARP.

4.2 Nuvem de pontos do laser scanner

Posteriormente ao registro e ajustamento de todas as posições do laser scanner, foi gerada uma nuvem de pontos com 77.022.455 (setenta e sete milhões, vinte e dois mil, e quatrocentos e cinquenta e cinco).

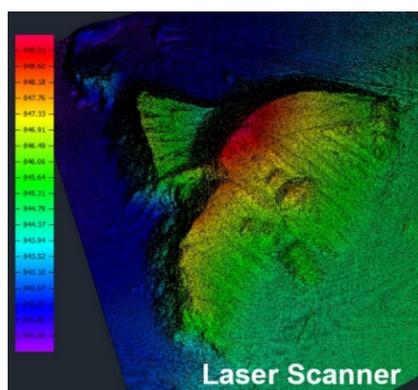


Figura 5: Nuvem de pontos com visualização do mapa de alturas

Fonte: Autores (2020)

Cada varredura com o laser scanner VZ-400i possuiu um tempo médio de leitura de 19" (dezenove segundos) com uma taxa de coleta de 500.000 pts/seg (quinhentos mil pontos por segundo).

Selecionada a área de interesse e aplicação do filtro de pontos, gerou-se uma nuvem com espaçamento entre pontos de 10x10x10cm, acarretando uma nuvem de pontos com 367.597 pontos.

4.3 Acurácia posicional das ortofotos

Após a análise dos dados, observou-se que a ortofoto gerada pelo voo com altura de 60m enquadrou-se na Classe A para escala de 1:187, com desvio padrão absoluto e RMS das discrepâncias com valor de 0,019 e 0,030 metros, respectivamente. Já a ortofoto gerada pelo voo com altura de 90m enquadrou-se na Classe A para escala de 1:250, com desvio padrão absoluto e RMS das discrepâncias com valor de 0,006m e 0,042m, respectivamente. Por fim, a ortofoto gerada pelo voo com altura de 120m enquadrou-se na Classe A para escala de 1:210, com desvio padrão absoluto e RMS das discrepâncias com valor de 0,008m e 0,036m, respectivamente.

Quadro 1 - Tolerâncias utilizadas para avaliação da acurácia posicional planialtimétrica, onde “eq” significa equidistância vertical entre curvas de nível

Classe		Planimétrica		Altimetria	
DECRETO 89.817	ET-CQDG	PEC	EP	PEC	EP
-	A	0,28 mm x escala	0,17 mm x escala	0,27 x eq	1/6 x eq
A	B	0,5 mm x escala	0,3 mm x escala	1/2 x eq	1/3 x eq
B	C	0,8 mm x escala	0,5 mm x escala	3/5 x eq	2/5 x eq
C	D	1,0 mm x escala	0,6 mm x escala	3/4 x eq	1/2 x eq

Fonte: Decreto nº 89.817 (BRASIL, 1984), aliada à ET-CQDG (DCT/DSG, 2016)

É importante ressaltar que os testes de acurácia posicional para todas as ortofotos foram realizados apenas na planimetria.

4.4 Cálculo volumétrico da pilha

Para realização do cálculo volumétrico da pilha em estudo foram utilizadas as nuvens de pontos geradas pelos levantamentos realizados pelo ARP, e pelo laser scanner terrestre. As nuvens de pontos geradas pelo ARP e laser scanner, foram exportadas no formato LAS e importadas no software 3DSurvey, versão 2.10. A partir da criação do modelo digital de superfície MDS e do modelo digital de terreno MDT (representado pela primitiva), obteve-se os seguintes resultados:

Quadro 2 - Cálculo de volume das pilhas realizada por diferentes métodos de levantamento

	Método de Levantamento			
	Laser Scanner	ARP		
		Altura de Voo		
		60 m	90 m	120 m
Volume (m³)	2989,25	2979,50	2980,75	2986,04

Fonte: Autores (2020)

O quadro abaixo mostra a diferença de volume da pilha realizado por diferentes tipos de levantamento.

Quadro 3 - Cálculo de volume das pilhas realizado por diferentes métodos de levantamento

Método Comparativo	Diferença de Volume	
	Unidade (m ³)	Porcentagem (%)
Laser Scanner x Voo 60m	9,750	0,326
Laser Scanner x Voo 90m	8.500	0,284
Laser Scanner x Voo 120m	3,210	0,107
Voo 60m x Voo 90m	1,250	0,042
Voo 60m x Voo 120m	6,540	0,219
Voo 90m x Voo 120m	5,290	0,177

Fonte: Autores (2020)

As diferentes perspectivas observadas pelas análises volumétricas servem para subsidiar a compreensão geral e suas respostas quanto ao comportamento matemático levantado no presente trabalho

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O princípio desse trabalho foi a análise e comparação de volumes medidos e calculados em uma pilha de argila a partir de levantamentos realizados com ARP em diferentes alturas de voo, a saber: 60m, 90m e 120m. Ao fazer a pesquisa de campo foi possível comparar e quantificar a diferença de volume encontrada nas três alturas estudadas, onde obteve-se informações topográficas tridimensionais da superfície da pilha e do terreno, principalmente nos locais onde o acesso era limitado ou até mesmo intransitável.

Utilizou-se como parâmetro de comparação a tecnologia do levantamento com laser scanner terrestre, onde foi encontrado, após o processamento dos dados, o volume de 2989,25m³. Comparando com os cálculos obtidos nos voos de 60m, 90m e 120m a diferença em percentual foi de 0,326%, 0,284% e 0,107% respectivamente. O tempo total de levantamento, juntamente com o tempo de processamento das imagens, evidencia a diferença relevante entre os voos fotogramétricos:

Quadro 4 - Tempo de voo e processamento das imagens

Altura de voo	Fotos Processadas	Tempo voo	Tempo de alinhamento das Fotos	Tempo para geração da nuvem de pontos	Tempo Total
60m	108	00:03:23	00:24:46	02:55:00	03:23:09
90m	50	00:02:19	00:10:09	01:06:00	01:18:28
120m	34	00:01:46	00:04:44	00:35:24	00:41:54

Fonte: Autores (2020)

Entende-se, portanto, a partir da observação dos dados acima, que o tempo e a quantidade de imagens diminuem em razão inversamente proporcional à altura de voo.

A diferença de volume entre as medições foi irrelevante do ponto de vista do levantamento como um todo, com percentual volumétrico entre os diferentes levantamentos não ultrapassando 0,50%.

Sugere-se que para a otimização dos trabalhos, seja em campo ou escritório, e consequentemente para redução dos custos do projeto, a melhor opção é o mapeamento na altura de voo de 120 metros, visto que a diferença entre os volumes calculados é ínfima diante das demais alturas.

REFERÊNCIAS

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Regras da ANAC para uso de Drones. ANAC.** 2017. Disponível em: https://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf/view. Acesso em: 22 Set. 2019.

ANDRADE, José Bittencourt de. **Fotogrametria.** 2. ed. Curitiba: SBEE, f. 256, 2003.

ASSAD, Eduardo Delgado; SANO, Edson Eyji. **Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura.** 2. ed. Brasília: Embrapa - SPI, 1998. 434 p.

BRASIL. Presidente da República. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984. **Diário Oficial da União.** Brasília, 20 de junho de 1984. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm. Acesso em: 13 Out. 2019.

DCT/DSG. **Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG).** 1. ed. Departamento de Ciência e Tecnologia / Diretoria do Serviço Geográfico, 2016.

DEMPSEY, Caitlin. **Orthophotos and GIS. Gis Lounge.** 2003. Disponível em: <https://www.gislounge.com/orthophotos-and-gis/>. Acesso em: 13 Out. 2019.

DHARMAPURI, Dr. Sринi; TULLY, Mike. **Evolution of Point Cloud. LIDAR Magazine.** 2018. Disponível em: <https://lidarmag.com/2018/07/16/evolution-of-point-cloud/>. Acesso em: 13 Out. 2019.

DSG. **Especificação Técnica Para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV).** Diretoria do Serviço Geográfico - DSG, 2011.

HORUS AERONAVES. **Aerofotogrametria com DRONES**: Conceitos Básicos. 1. ed. 2017. 24 p. Disponível em: <https://horusaeronaves.com/ebook/ebook-aerofotogrametria-com-drones-horus.pdf>. Acesso em: 13 Out. 2019.

LÓPEZ, Francisco Javier Ariza; BALBOA, José Luis García; PULIDO, Raúl Amor. **Casos prácticos de calidad en la producción cartográfica**. Universidad de Jaén, v. 19, 2004. 388 p. (Colección Techné).

MIKHAIL, Edward M.; ACKERMANN, Friedrich E. **Observations and Least Squares**. Univ Pr of Amer, 1983. 497 p.

MONICO, João Francisco Galera et al. Acurácia e Precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, p. 15, 2009. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/15513/10363>. Acesso em: 13 Out. 2019.

MORGAN; Falkner, DENNIS; Edgar. **Aerial Mapping: Methods and Applications**. 2. ed. CRC Press, 2001. 192 p.

NOGUEIRA, Antonio Moacir Rodrigues. **Como Utilizar Diferentes Técnicas de Levantamento Topográfico. Faculdade de Engenharia e Agrimensura de Pirassununga**. Pirassununga, 2014. Disponível em: <http://www.feap.com.br/?rt=noticias/show&id=12>. Acesso em: 29 Set. 2019.

PIROTTI, F.; GUARNIERI, A.; VETTORE, A. **State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface** – Published by AIT the Italian Society of Remote Sensing, Itália, 2012.

RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. Viçosa, 2011. 181 p. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 2011. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/827/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 13 Out. 2019.

SILVA, Cristiano Alves da et al. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. **BCG - Boletim de Ciências Geodésicas - On-Line version**, Curitiba, p. 22, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/bcg/v22n1/1982-2170-bcg-22-01-00073.pdf>. Acesso em: 13 Out. 2019.

SILVA, Rodrigo Pinto da. **Análise da qualidade posicional de produtos gerados por LST e ARP em diferentes alturas de voo**. Viçosa, 2019. 121 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 2019. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/25747/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 13 Out. 2019.

WINGTRA. **Using drones in the mining industry**: Mining and aggregates. 2019. Disponível em: <https://wingtra.com/drone-mapping-applications/mining-and-aggregates/>. Acesso em: 13 Out. 2019.