



Evaluation of the accuracy of volume calculation obtained by UAV

Avaliação da acurácia de cálculo de volume obtido por VANT

Fernanda Helena Oliveira da Silva¹, Éder Ramon Feitosa Ledo², Caike Silva Candido Damasceno³, José Adriano da Silva¹, Iderlan Alves Medeiros de Brito⁴

Abstract: The emergence of increasingly accurate, fast, and inexpensive tools in the acquisition of data for the management base suitable for each type of environment is fundamental in the development of sustainable engineering. Based on this, the evaluation of the accuracy of the volume calculation performed using Digital Terrain Models (DTM's), generated by images of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) was carried out. The study was conducted in the area of the new landfill in the municipality of Fortaleza, state of Ceará, in a waste stabilization pond. Two DTM's were generated and evaluated. The first was generated by collecting points from a Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver, using 445 points, whereas the second was generated by aerial images obtained through a multicopter UAV, with 17 checkpoints and 10 Ground Control Points (GCP's). With the two DTM's of the GNSS Receiver and the UAV, the volume of the stabilization pond was calculated using the TopoEVN and Pix4D software, respectively. The estimated pond volume obtained through the Global Positioning System (GPS) data was 48548,33 m³, while by the UAV DTM, it was 48504,9 m³. The accuracy of the volume data obtained by DTM generated by UAV, even with considerable flight height (120 m), presented a result with variation less than 1% compared to those arising from conventional topography, thus indicating high reliability and data accuracy.

Key words: Remotely piloted aircraft (RPA). Digital Elevation Model (DEM). GNSS Receiver.

Resumo: Para o desenvolvimento de uma engenharia sustentável, a evolução de ferramentas mais precisas, rápidas e baratas para a aquisição de dados é a base para a gestão ambiental. Com base nisso, objetivou-se com este trabalho avaliar a acurácia do cálculo de volume realizado por meio de Modelos Digitais de Terreno (MDT's), gerados por imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). A área de estudo foi o novo Aterro Sanitário do município de Fortaleza, estado do Ceará, em uma lagoa de estabilização de chorume. Dois MDT's foram gerados e avaliados. O primeiro foi gerado por meio da coleta de pontos a partir de um receptor GNSS, utilizando 445 pontos. O segundo foi gerado a partir das imagens aéreas obtidas por meio de um VANT multirrotor, com 17 checkpoints e 10 GCP's. Com os dois MDT's do Receptor GNSS e do VANT foi realizado o cálculo de volume da lagoa de estabilização, pelo software TopoEVN e Pix4D, respectivamente. O volume da lagoa estimado para os dados de GPS foi de 48548,33 m³ e com o MDT de VANT foi de 48504,9 m³. A acurácia de precisão dos dados de volume obtidos por meio do MDT gerado por VANT mesmo com considerável altura de voo (120 m), apresentou resultado com variação menor que 1% comparada àquela obtida por meio de topografia convencional. Indicando alta confiabilidade e precisão dos dados.

Palavras-chave: ARP. Modelo Digital de Elevação (MDT). Receptor GNSS.

*Corresponding author

Submitted for publication on 20/04/2020, approved on 15/10/2020 and published on 31/10/2020

¹Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. 60326-010, Rua Fernando Weyne, 115, Fortaleza-CE. E-mails: fernandahelena@alu.ufc.br; adriano@grupotransitar.com.br

²Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. E-mail: ledoeledo@gmail.com

³Especialista em Geoprocessamento, Universidade Estadual do Ceará. E-mail: caike.silva@grupotransitar.com.br

⁴Diretor do Grupo Transitar e Especialista em georreferenciamento de imóveis rurais, Universidade Estadual do Ceará. E-mail: iderlan@grupotransitar.com.br

INTRODUCTION

As environmental functions outweigh the financial interest, the need for carrying out exploration activities with a sustainable nature increases (ESTEBAN *et al.*, 2019). The awareness process is a consequence of observations on how the infrequent use of natural resources, such as soil and water, cause their scarcity and may lead to severe and sometimes almost irreversible effects on the environment (PALÁCIO *et al.*, 2012), making it needful to improve the quality of the management of these resources.

The identification of a land surface pattern is fundamental in the base of the management and conscious handling of natural resources. Digital Elevation Model (DEM) is one of the many tools that might be used to perform this identification.

DEM is a matrix representation that associates altitudes of the topographic surface to geographical coordinates; it is considered a critical component in the physical descriptions of the Earth's surface (MANCINI *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2020). The DEM can be from the terrain (MDT) or the surface (MDS). For the MDT, only the altitude concerning the ground is represented.

The construction of a Digital Terrain Model allows the identification of the geomorphological characteristics of an environment (DANTAS, 2016). Thus, it can be creating contour lines, delimit watersheds, indicate areas prone to erosion, besides promoting the dimensioning of the water flow (SANAGIOTTO *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.*, 2019; PEDREIRA *et al.*, 2020).

The types of equipment most used in topography for this purpose are the total station and the GNSS receiver (Global Navigation Satellite System) (SILVA *et al.*, 2016); although, the acquisition of spatial information with high quality and precision has been possible due to different technologies that emerged in recent decades (RODRIGUES *et al.*, 2017; RAHMAN *et al.*, 2017; HE *et al.*, 2019). Among these technologies, it is highlighted the Unmanned Aerial Vehicle (UAV), which uses high spatial resolution aerial images to generate Digital Terrain Models (DTM's).

INTRODUÇÃO

À medida que as funções ambientais sobrelevam o interesse financeiro, amplia-se a necessidade de realizar atividades de exploração com cunho sustentável (ESTEBAN *et al.*, 2019). Sendo o processo de conscientização consequência das observações sobre como o uso infrene de recursos naturais, como solo e água, ocasiona sua escassez e acarretam consequências quase irreversíveis ao meio ambiente (PALÁCIO *et al.*, 2012), tornando-se importante a melhoria da qualidade da gestão desses recursos.

A identificação do padrão da superfície de um terreno é fundamental no embasamento da gestão e manejo consciente dos recursos naturais, e para isso tem-se ferramentas como o Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE é uma representação matricial que associa altitudes da superfície topográfica às coordenadas geográficas sendo um componente crítico nas descrições físicas da superfície da terra (MANCINI *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2020). O MDE pode ser do Terreno (MDT) ou da Superfície (MDS). Para o MDT apenas a altitude em relação ao solo é representada.

Por meio da construção de um Modelo Digital do Terreno é possível identificar as características geomorfológicas de um ambiente (DANTAS, 2016). Isso permite criar curvas de nível, delimitar bacias hidrográficas, indicar áreas propensas para erosão, além de fomentar o dimensionamento do escoamento hídrico (SANAGIOTTO *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.*, 2019; PEDREIRA *et al.*, 2020).

Os equipamentos mais utilizados na topografia para essa finalidade são a estação total e o receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (SILVA *et al.*, 2016), contudo, nas últimas décadas, surgiram diferentes tecnologias que possibilitaram a aquisição de informações espaciais com maior qualidade e precisão (RODRIGUES *et al.*, 2017; RAHMAN *et al.*, 2017; HE *et al.*, 2019). Entre essas, destaca-se o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), que utiliza imagens aéreas de alta resolução espacial para gerar os Modelos Digitais do Terreno (MDT's).

GNSS is the most used technologies aimed at obtaining DTM, considered in the last twenty years, an inherent part of the World Geodetic System (COELHO; SILVA; COSTA; 2017). However, when you have larger areas or with a more complex unevenness, a vast number of points must be collected to delimit the surface and define volumes, consequently, requiring more time and higher costs (TUCCI *et al.*, 2019).

Photogrammetry, using UAV platforms, have become increasingly popular within engineering, as it perfectly meets the needs for geodetic engineering and, in particular, volume measurement (LONG *et al.*, 2019). In this technique, the aircraft performs a flight over the area of interest to obtain a set of images that allow, through processing, to generate products such as orthomosaics, point clouds, and digital elevation models (SON *et al.*, 2020).

Moreover, each of these technologies enables gathering information with different field and processing methodologies, which could be a parameter for choosing one technique over the other. Nevertheless, the determination of the final accuracy in the DEM results is fundamental to direct the capacity of each methodological system. Grounded in this premise, the accuracy of the volume calculation, carried out using Digital Terrain Models (DTM's), generated by UAV images, was assessed.

MATERIAL AND METHODS

Study area

The study was conducted in the area of the new Fortaleza Sanitary Landfill, located around a leachate stabilization pond, in Caucaia - CE (Figure 1). The centroid coordinates of the location are 3°47'24,20" S and 38°40'30.68" O. The stabilization pond has an area of 1.15 ha and the area used for the collection of points and orthomosaic generation has approximately 22 ha.

O GNSS é a mais utilizada das tecnologias voltadas para obtenção de MDT, nos últimos vinte anos, foi parte inerente ao mundo geodésico (COELHO; SILVA; COSTA; 2017). Entretanto, quando se tem áreas maiores ou com desnível mais complexo, uma grande quantidade de pontos deve ser coletada para delimitar a superfície, e definir volumes, exigindo mais tempo e custos mais altos (TUCCI *et al.*, 2019).

A fotogrametria, utilizando plataformas do tipo VANT, vem ganhando popularidade dentro da engenharia, pois atende perfeitamente às necessidades para engenharia geodésica e, em particular, à medição de volume (LONG *et al.*, 2019). Nessa técnica, a aeronave realiza um voo sobre a área de interesse com a finalidade de obter um conjunto de imagens que permitam, por meio de processamentos, a geração de produtos como ortomosaicos, nuvem de pontos e modelos digitais de elevação (SON *et al.*, 2020).

Cada uma dessas tecnologias possibilita obter informações com metodologias de campo e de processamento diferentes, o que pode ser parâmetro para a escolha de uma técnica em detrimento da outra. Contudo, a definição da acurácia final nos resultados do MDE é fundamental para direcionar a capacidade de cada sistema metodológico. A partir dessa premissa, avaliamos a acurácia do cálculo de volume, realizado por meio de Modelos Digitais do Terreno (MDT's), gerado por imagens de VANT.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo foi o novo Aterro Sanitário de Fortaleza, localizado no entorno de uma lagoa de estabilização de chorume, no município de Caucaia-CE, próximo a BR-020, km 8 (Figura 1). As coordenadas do centroide da localização são 3°47'24,20"S e 38°40'30.68"O. A área de coleta de pontos e de geração do ortomosaico foi de aproximadamente 22 ha, mas a lagoa de estabilização tem área de 1,15 ha.

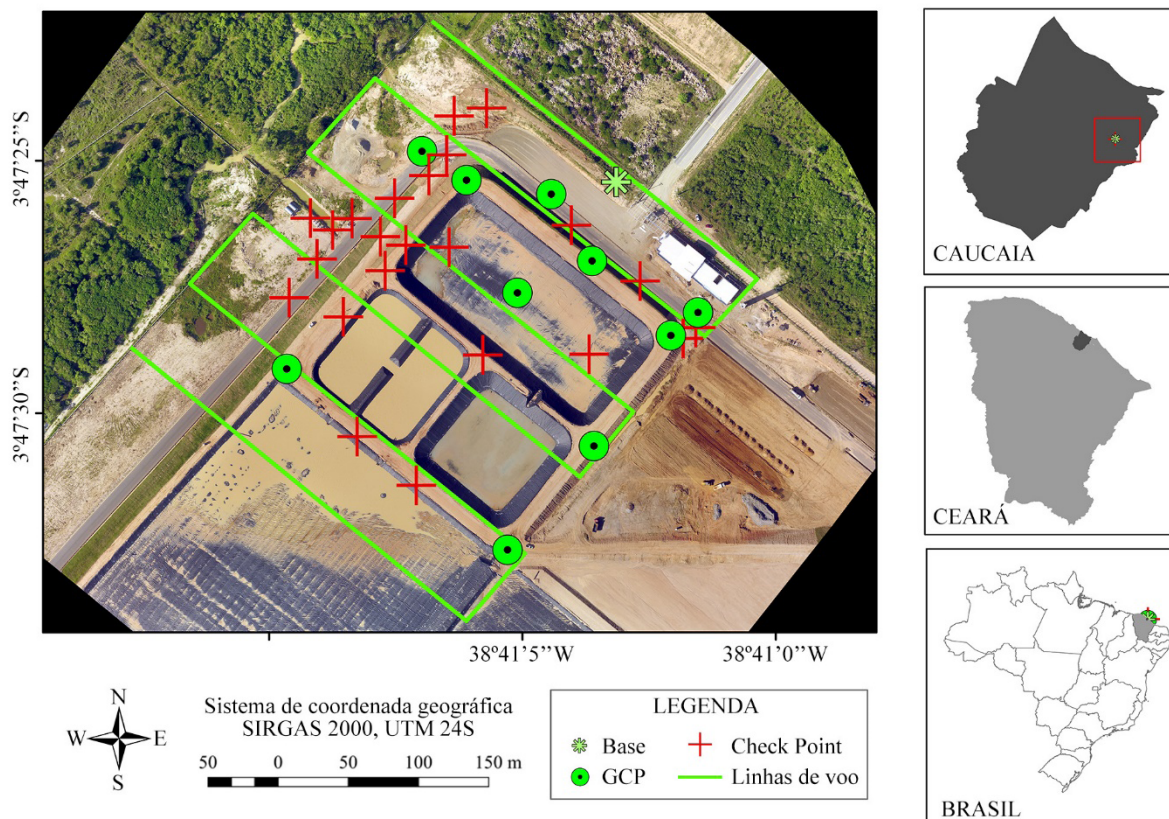


Figure 1 - Location map of the study area.

*GCP: Ground Control Points.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

*GCP: Ground Control Points.

GNSS data

For determination of the volume of the area through GNSS technology, a portable GNSS receiver with a frequency of 450 Hz, Trimble model R4 (L1/L2, and L2C) was used. The central coordinate of the points was obtained by this receiver. Additionally, the GNSS Receiver performs kinematic surveys in real-time, it has an accuracy of 3 mm + 0.1 ppm horizontally and 3.5 mm + 0.4 ppm vertically. The base used in the survey was the geodetic landmark located at the coordinates: 3°47'25,35'' S and 38°41'3,3'' O (Figure 1).

The positioning technique used was RTK (Real-Time Kinematic); this technique allows for obtaining altitude and position data in real-time with centimeter accuracy. The base processing method used was the IBGE-PPP (positioning by precise point), by it, getting the position of a station using a basepoint of already known coordinates, collector, and Rover type GNSS receptor was possible.

Dados GNSS

Para levantamento do volume da área por meio da tecnologia GNSS foi utilizado um receptor GNSS portátil com frequência de 450 Hz da marca Trimble modelo R4 (L1/L2 e L2C), que coletou a coordenada central dos pontos. Esse Receptor GNSS realiza levantamentos cinemáticos em tempo real, e possui precisão de 3 mm + 0.1 ppm na horizontal e 3,5 mm + 0.4 ppm na vertical. A base utilizada no levantamento foi o marco geodésico localizado nas coordenadas: 3° 47' 25,35''S e 38°41'3,3''O (Figura 1).

A técnica de posicionamento utilizada foi a RTK (Real Time Kinematic), que permite obter dados de altitude e posição em tempo real com precisão centimétrica. O método de processamento da base utilizado foi o IBGE-PPP (posicionamento por ponto preciso) que se refere à obtenção da posição de uma estação utilizando um ponto Base de coordenadas já conhecidas, coletora e rover receptor GNSS.

In order to calculate the volume, the triangulation between the intersection of the mesh points generated by the points collected with the GNSS receiver (TopoEVN software version 6.3) was performed. After this procedure, a report with data on cut and fill volume, and total volume may be generated by the software.

Photogrammetry

For the aerial survey, the UAV Inspire 1 was used, equipped with the ZENMUSE X4 camera, with a resolution of 20 MB (Figure 2). The acquisition of images with remote sensing using drones is acquired on autonomous flights with predefined waypoints using the planning software (LI *et al.*, 2019; HE *et al.*, 2019). Thus, the first step was to carry out the flight planning, using the DroneDeploy programming software, with 5.8 minutes of flight and using battery; the flight lines are shown in Figure 1. The flight covered the entire area, collecting 49 images, with an altitude of 120 m, an average GSD (Ground Sample Distance) of 5.1 cm, and a frontal and lateral overlap of 75%. The flight speed was 12 m s⁻¹.

Data processing was conducted using the Pix4D Mapper software, considered one of the main photogrammetry software for professional drone mapping. For the orthomosaic and DEM generation, the photos were aligned, creating a sparse cloud of points, and posteriorly, the dense cloud of points and the texturing of the model were obtained.

No cálculo do volume, realizou-se a triangulação entre a interseção dos pontos da malha gerada por meio dos pontos coletados com o receptor GNSS, do software TopoEVN versão 6.3. Após esse procedimento, o software permite gerar um relatório com dados de volume de corte, aterro e volume total.

Fotogrametria

Para o aerolevanteamento foi utilizado o VANT *Inspire One*, equipado com a câmera ZENMUSE X4, com resolução de 20 MB (Figura 2). A aquisição de imagens com detecção remota por meio de drones são adquiridas em voos autônomos com *waypoints* predefinidos usando o *software* de planejamento (LI *et al.*, 2019; HE *et al.*, 2019). Dessa forma, o primeiro passo foi realizar o planejamento do voo, utilizando-se o *software* de programação *DroneDeploy*, com 5,8 minutos de voo e usando bateria; na Figura 1, são apresentadas as linhas de voo. O voo cobriu toda a área, coletando 49 imagens, com altitude de 120 m, com GSD (*Ground Sample Distance*) médio de 5,1 cm e sobreposição frontal e lateral de 75%. A velocidade do voo foi 12 m s⁻¹.

O processamento dos dados foi realizado utilizando-se o *software* Pix4D Mapper, um dos principais softwares de fotogrametria para mapeamento profissional de drones. Para a geração do mosaico georreferenciado e MDE, foi realizado o alinhamento das fotos, gerando uma nuvem esparsa de pontos e, posteriormente, foi obtida a nuvem densa de pontos e a texturização do modelo.

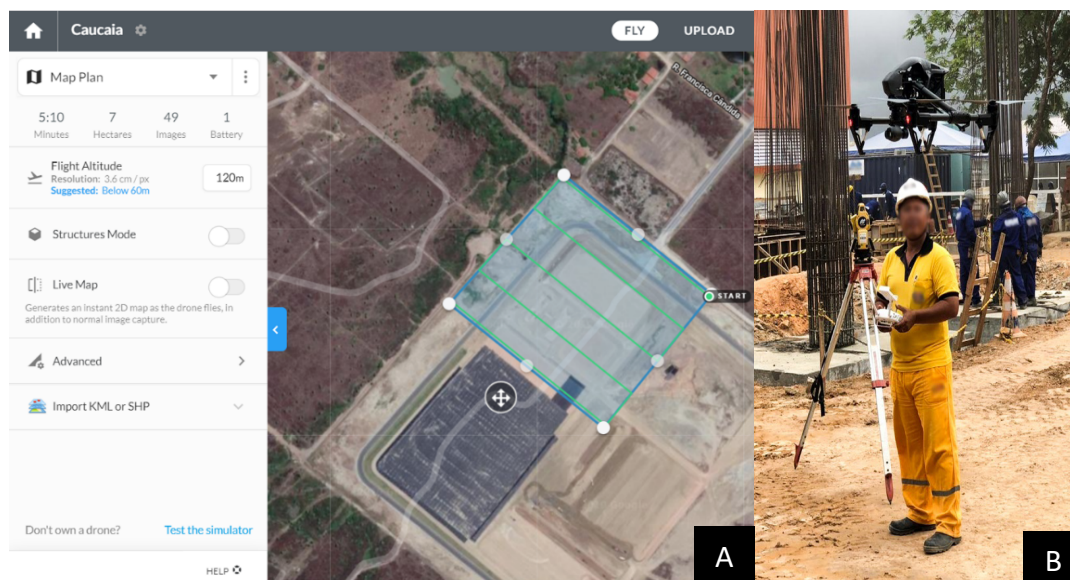


Figure 2 - Screen of the planning software (DroneDeploy) (A) and photography of the survey of the area captured with the drone DJI Inspire 1 (B).

Figura 2 - Tela do software de planejamento (DroneDeploy) (A) e foto do levantamento da área com o drone Inspire One da fabricante DJI (B).

For controlling and linking more accurately to the photogrammetric block, it was necessary to perform the survey control points on the ground, generating orthomosaics and Digital Elevation Models with geodesic quality. It was needed because the drone used was equipped only with a GNSS navigation system with precision ranging from 5 to 10 m.

A relationship between the density of the GCP and the precision of the DSM (Digital Surface Model) is expected. In other words, it may occur an accuracy decrease with the increase in the distance from the nearest GCP GINDRAUX, *et al.* 2017). Thus, the support points (GCP's and Checkpoints) must be allocated in a well-distributed way in the area of interest (RIDOLFI *et al.*, 2017). For the positioning data correction, ten control points and 17 checkpoints were widely distributed (Figure 1).

Using the UAV images, the mosaic was created. Then, applying the RayCloud function on the volume tab, a polygon was drawn around the lagoon. After that, flight altitude information (20.9 m) was added in the Pix4D software version 4.3.31, obtaining, thus, the first volume data of the stabilization pond.

It is noteworthy that Pix4D measures a cut volume, when the terrain is higher than the base surface, and fill volume, when the terrain is below the base. The total volume is determined by the sum of the two volumes mentioned above.

Accuracy analysis

For the comparison between the types of surveys, data related to the number of points surveyed, survey time and total estimated volume were used. This information was tabulated throughout each methodology, considering all the processes of each stage, so that a quantitative analysis of the absolute values was possible.

The quality evaluation of the obtained products was based on the Cartographic Accuracy Standard of Digital Cartographic Products (CAS-DCP), created by the Technical Specification for Geospatial Vector Data Acquisition (Portuguese acronym ET-ADGV) (Table 1). This indicator is calculated by the product of the standard deviation (Sd) of the discrepancies, which is a measure of data dispersion, described in Equation 1, for the X, Y, and Z (σ) coordinates by 1.6449.

A fim de controlar e atrelar mais precisão ao bloco fotogramétrico, é necessário o levantamento de pontos de controle em solo, gerando ortomosaicos e Modelos Digitais de Elevação com qualidade geodésica, pois o drone utilizado é equipado apenas com sistema GNSS de navegação que apresenta precisão que varia de 5 a 10 m.

Espera-se que exista relação entre a densidade do GCP e a precisão do MDS (Modelo Digital de Superfície), ou seja, espera-se que a precisão diminua com o aumento da distância do GCP mais próximo (GINDRAUX, *et al.* 2017). Dessa forma é importante que os pontos de apoio (GCP's e *Check points*) estejam alocados de forma bem distribuída na área de interesse (RIDOLFI *et al.*, 2017). Para a correção do posicionamento dos dados, foram inseridos 10 pontos de controle, ou GCP's (*Ground Control Points*), e 17 pontos de checagem (*Check point*) bem distribuídos (Figura 1).

Com o mosaico gerado por meio das imagens do VANT, utilizou-se a função *RayCloud* na aba volume, gerando um polígono no entorno da lagoa, e adicionando-se a informação de altitude de voo (20,9 m) no *software* Pix4D versão 4.3.31, obtendo-se o primeiro dado de volume da lagoa de estabilização. Destaca-se que o Pix4D mede um volume de corte (*Cut*), quando o terreno é mais alto que a superfície de base, e volume de aterro (*Fill*), quando o terreno está abaixo da base. O volume total é determinado pela soma entre os dois volumes supracitados.

Análise da acurácia

Para o comparativo entre os tipos de levantamentos foram utilizados dados relativos a quantidade de pontos levantados, tempo de levantamento e volume total estimado. Essas informações foram tabeladas ao longo de cada metodologia, considerando todos os processos de cada etapa, para que fosse possível uma análise quantitativa dos valores absolutos.

A avaliação da qualidade dos produtos obtidos foi baseada no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD, criado pela Norma ET-ADGV (Especificações Técnicas para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais) (Tabela 1). Esse indicador é calculado pelo produto do desvio padrão das discrepâncias, que é uma medida de dispersão dos dados, descrito na Equação 1, para as coordenadas X, Y e Z (σ) por 1,6449.

Table 1 - Cartographic Accuracy Standard of Digital Cartographic Products (CAS-DCP)

Tabela 2 - Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD)

CAS - DCP	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)	CAS (m)	SE (m)
A	0.27	0.17	0.27	0.17	0.54	0.34	1.35	0.84	2.70	1.67	5.50	3.33	13.70	8.33	27.00	16.67
B	0.50	0.33	0.50	0.33	1.00	0.66	2.50	1.67	5.00	3.33	10.00	6.66	25.00	16.66	50.00	33.33
C	0.60	0.40	0.60	0.40	1.20	0.80	3.00	2.00	6.00	4.00	12.00	8.00	30.00	20.00	60.00	40.00
D	0.75	0.50	0.75	0.50	1.50	1.00	3.75	2.50	7.50	5.00	15.00	10.00	37.50	25.00	75.00	50.00

Source: ALVES *et al.* (2016).

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - M_A)^2}{n}} \quad (1)$$

In which, \sum : summation symbol, x_i : value of X, Y or Z data at position i in the data set, M_A : arithmetic mean of the data and n : amount of data.

The values of the mean square error of the check points used in the processing of the aero photogrammetry images were also considered. Checkpoints consisted in known coordinates added to the project in order to define the accuracy of the products obtained. These values were obtained from the technical report of data processing quality in the Pix4D software.

RESULTS AND DISCUSSION

The orthomosaic of the study area and its digital elevation model are presented in the Figures 3A and 3B. The average altitude of the area between the data of the GPS points was 18.89 m, with values of maximum and minimum of 21.11 and 14.59 m, respectively. The survey performed by traditional topography, originated the digital terrain model (DTM), based on the altimetry data of the collected points (Figures 3C and 3D).

The irregular distribution of the point cloud reflects on the digital model's ability to adequately represent a given surface (SILVA *et al.*, 2016). It is possible to notice that the point cloud and the digital model generated by the UAV point cloud, with 3.23 points m^{-2} , represented in detail the geometry of the stabilization pond area. The proportion of MDT generated from the GNSS data showed simplification in the result, which may be justified due to the lack of information throughout the study area.

Onde, \sum : símbolo de somatório, x_i : valor dos dados de X, Y ou Z na posição i no conjunto de dados, M_A : média aritmética dos dados e n : quantidade de dados.

Considerou-se ainda os valores do erro médio quadrático dos *check points* utilizados no processamento das imagens da aerofotogrametria. Os *checkpoints* ou pontos de verificação são coordenadas conhecidas adicionadas ao projeto com intuito de definir a acurácia dos produtos obtidos. Esses valores foram obtidos junto ao relatório técnico de qualidade do processamento de dados no software Pix4D.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ortomosaico da área de estudo e seu modelo digital de elevação são apresentados nas Figuras 3A e 3B, respectivamente. A altitude média da área entre os dados dos pontos de GPS foi de 18,89 m, com máxima de 21,11 m e mínima de 14,59 m. O levantamento realizado por topografia tradicional, originou o modelo digital de terreno (MDT), tendo como base os dados de altimetria dos pontos coletados (Figuras 3C e 3D).

A distribuição irregular da nuvem de pontos reflete sobre a capacidade do modelo digital de representar de forma ajustada determinada superfície (SILVA *et al.*, 2016). É possível observar que a nuvem de pontos e o modelo digital gerados pela nuvem de pontos do VANT, com 3,23 pontos m^{-2} , conseguiram representar de forma mais detalhada a geometria da área da lagoa de estabilização. A proporção que o MDT gerado a partir dos dados do GNSS devido à ausência de informação ao longo da área de estudo mostrou simplificação no resultado.

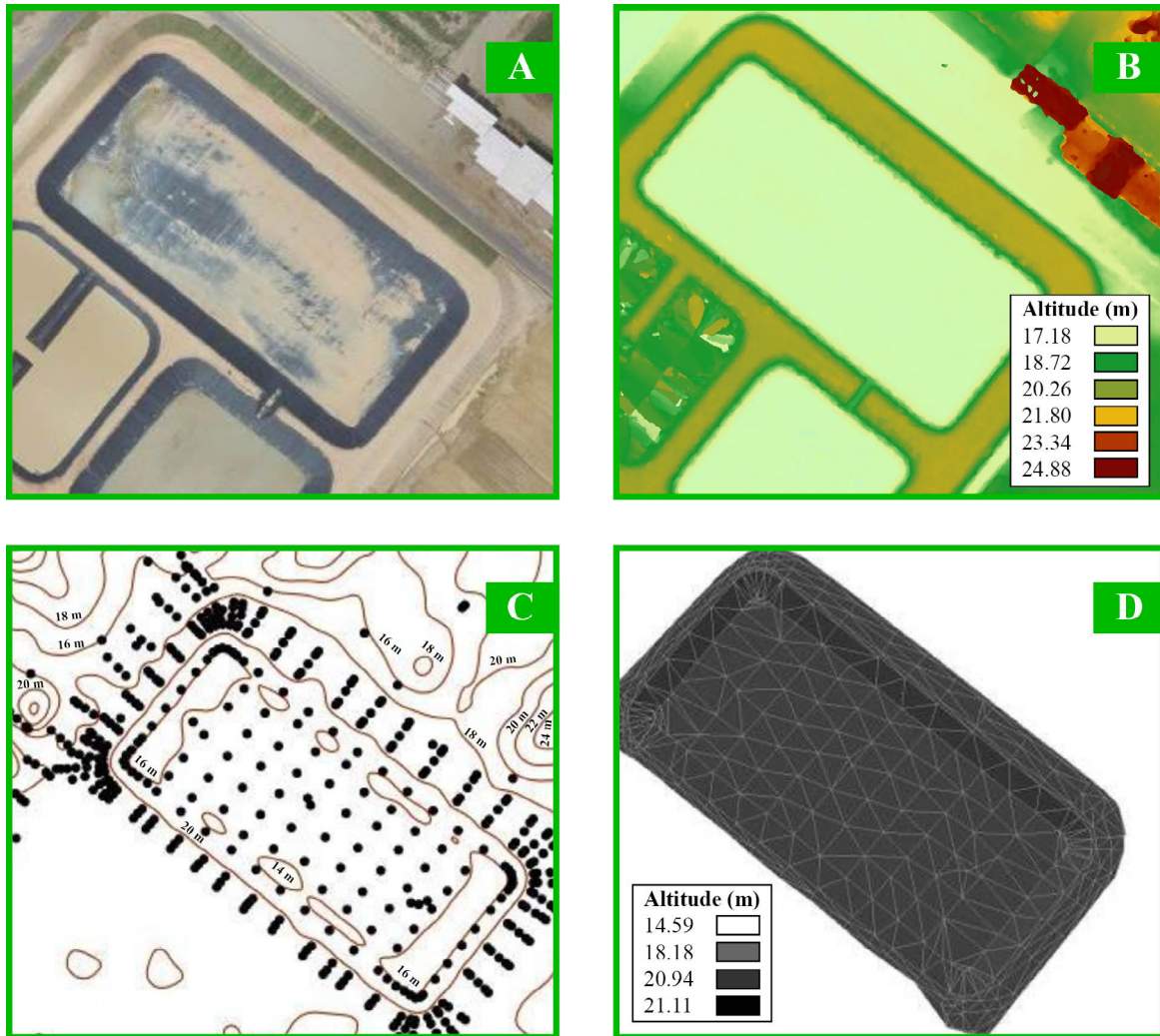


Figure 3 - Orthomosaic (A); digital terrain model generated by UAV data (B) and contour lines (5 m) with collection points (C) and digital terrain model by GPS data (D).

Figura 3 - Ortomosaico (A); modelo digital do terreno gerado pelos dados de VANT (B) e de curvas de nível (5 m) com pontos de coleta (C) e modelo digital do terreno pelos dados GPS (D).

Regarding the processes of data collection, processing, number of points collected, and volume value, there is a significant discrepancy between the needs of each methodology, with emphasis on the time required in the survey with the GNSS receiver, which was seven times greater than the time for the methodology using UAV (Table 2). However, when considering the data processing time, this discrepancy becomes irrelevant since the processing for UAV data was five minutes faster than with the GNSS receiver.

Sobre os processos de coleta de dados, processamento, número de pontos coletados e valor do volume, observa-se discrepância significativa entre as necessidades de cada metodologia, com destaque para o tempo requerido no levantamento com receptor GNSS, que foi 7 vezes maior que o tempo para a metodologia utilizando VANT (Tabela 2). Contudo, ao se considerar o tempo de processamento dos dados, essa discrepância torna-se irrelevante, já que o processamento para os dados de VANT é de 5 minutos, mais rápido do que com receptor GNSS.

Table 2 - Comparison between survey types

Tabela 2 - Comparativo entre os tipos de levantamento

Data	GNSS receiver	UAV
Points raised	445	37,173
Field collection time	3 h 30 min	45 min
Processing time	1 h 20 min	1h e 30 min
Calculated volume	48548.33 m ³	48504.9 m ³

For photogrammetry, the laboratory and field process for data acquisition is performed quickly, compared to traditional processing, especially when comparing the number of points that were collected and the time used in the field. According to Holler *et al.* (2018), the use of drones improves productivity, with reduced labor and high security, since it is a non-intrusive data collection technique.

As regards the volume, it showed a variation of 44.57 m³, representing a change of 0.09% more to the value found with the DTM obtained in a conventional method. This data emphasizes the reliability of volume estimation through imaging with UAVs.

In a study conducted by Cryderman; Mah; and Shufletoski (2014), they quantified the precision obtained by volume measurements in a quarry, performed by survey with UAV and GNSS RTK. The results of the UAV stock volume corroborated those obtained in the GNSS, with a difference of only 3,755 m³ (0.7%), in a stack of 530 255 m³. These authors also observed that the accuracy of the photogrammetric survey was sufficient to obtain a mapping on a 1:200 scale and level curves of 0.145 m. They concluded that the photogrammetric approach is at least equivalent in precision to the GNSS RTK surveys.

Although there are already studies that analyze the generation of DEM using UAV technology, the main objective of this proposed methodology is to assess the accuracy of products that are not free of errors and uncertainties (PEREIRA *et al.*, 2019), besides differentiating the UAV's productive capacity, as explained in Table 2. Additionally, establishing photogrammetric products as a reference for obtaining 3D data.

Para a fotogrametria, o processo de laboratório e campo para aquisição de dados é realizado de maneira rápida, comparada ao processamento tradicional, principalmente quando se compara à quantidade de pontos que foram coletados e ao tempo de coleta em campo. Segundo Holler *et al.* (2018), o uso de drones melhora a produtividade, com pouca mão de obra, elevada segurança, já que é uma técnica de obtenção de dados não intrusiva.

O volume apresentou variação de 44,57 m³, representando alteração de 0,09% a mais para o valor encontrado com o MDT obtido de forma convencional. Esse dado ressalva a confiabilidade da estimação de volumes por meio de imageamento com VANT's.

Cryderman; Mah; Shufletoski (2014) quantificaram as precisões alcançadas por medidas de volume em pedra, obtidas por levantamento com VANT e com GNSS RTK. Os resultados do volume do estoque do VANT concordaram com os do GNSS, com diferença de apenas 3.755 m³ (0,7%), em uma pilha de 530 255 m³. Eles observaram ainda que a precisão do levantamento fotogramétrico foi suficiente para obter um mapeamento em escala 1:200 e curvas de nível de 0,145 m, concluindo a abordagem fotogramétrica é, no mínimo, equivalente em precisão aos levantamentos GNSS RTK.

Apesar de já existirem estudos que analisam a geração de Modelos Digitais de Elevação por meio da tecnologia VANT, o principal objetivo dessa metodologia proposta para avaliar a acurácia dos produtos, que não estão isentos de erros e incertezas (PEREIRA *et al.*, 2019), é também diferenciar a capacidade produtiva do VANT, como explicitado na Tabela 2. Além de firmar os produtos fotogramétricos como referência na obtenção de dados 3D.

The methodology applied in the generation of DTM with UAV used ten GCP's and 17 checkpoints, which required a longer time for data processing, 1 hour 30 minutes (Table 2). These control points (GCP or *checkpoint*) and the process of aerotriangulation of the images are the tools used by the software to define the elevation of each pixel pair of a photogrammetric product. There is still the possibility of developing the results obtained through photogrammetry, having more images captured, and a greater number of GCPs may improve the results of the volume estimate (RAHMAN *et al.*, 2017).

Moreover, it is worthy of note that although the positional quality of the products depends on obtaining control points utilizing GNSS receivers, the production speed and the diversity of products allow the technique of data production with UAV to be advantageous.

Flight height and camera quality are factors that have also to be considered as they are related to equipment limitations, such as GSD value, dynamics of in-flight operations, and battery autonomy. Thus, in order to achieve good geometric accuracy in UAV photogrammetry, it is essential to consider the choice of aircraft and the sensor built-in it (PEDREIRA *et al.*, 2020). As for flight height, the standard established in legislation in Brazil to perform photogrammetry is a minimum of 120 m (ANAC, 2017).

It should also be inferred that when compared to the conventional topographic survey or by laser profiling, the generation of the DTM using a DSM with photogrammetry presents similar quality, although they may cost slightly lower (OLIVEIRA *et al.*, 2017; SON *et al.*, 2020). In the same way as Tucci *et al.* (2019), analyzing the volume calculation in the waste area, concluded that three-dimensional modeling using UAV photogrammetry achieves an adequate precision for practical precision requirements.

In a study to quantify the quality of the data collected in academic papers related to the comparative analysis of the precision generated by low-cost GNSS and UAV equipment, Costa and Andrade (2018) confirmed the expectation regarding the precision of the data obtained with UAVs in studies and research related to environmental management, geolocation, and mapping of areas that need some type of intervention, recovery or remote access.

Aiming at a better understanding of the arrangement of the data, vertical profiles of the study area was generated, demonstrating the DSM obtained through the survey with GNSS receiver and processing of the UAV images (Figure 4). From this, the details of the model obtained through the UAV are observed. For Rodrigues *et al.* (2018), the digital surface model generated by images of remotely piloted aircraft is capable of reproducing with the highest possible fidelity the real features of the field.

A metodologia aplicada na geração do MDT com VANT utilizou 10 GCP's e 17 *checkpoints*, o que requereu um tempo maior de processamento dos dados, de 1 h e 30 minutos (Tabela 2). Esses pontos de controle (GCP ou *checkpoint*) e o processo de aerotriangulação das imagens são as ferramentas utilizadas pelos *softwares* para definir a elevação de cada par de pixel de um produto fotogramétrico, ou seja, existe ainda a possibilidade de aperfeiçoar os resultados obtidos por meio da fotogrametria, ter mais imagens capturadas e um maior número de GCPs melhora os resultados da estimativa de volume (RAHMAN *et al.*, 2017).

Ademais destaca-se que apesar da qualidade posicional dos produtos dependerem da obtenção de pontos de controle por meio de receptores GNSS, a velocidade produtiva e a diversidade de produtos permitem que a técnica de produção de dados com VANT seja ainda vantajosa.

Alguns pontos que devem ser também considerados são altura de voo e qualidade da câmera, que são fatores relacionados às limitações dos equipamentos, como valor do GSD, dinâmica das operações em voo e autonomia da bateria. Dessa maneira, para alcançar boa acurácia geométrica na fotogrametria com VANT é imprescindível considerar a escolha da aeronave e do sensor embarcado na mesma (PEDREIRA *et al.*, 2020). Já para a altura de voo, o padrão estabelecido em legislação no Brasil, com intuito de realizar fotogrametria, é o mínimo de 120 m (ANAC, 2017).

Pode-se ainda inferir que quando comparado ao levantamento topográfico convencional ou por perfilhamento a laser, a geração do MDT por meio de um MDS com fotogrametria é capaz de apresentar menor custo, mas manter a qualidade final análoga (OLIVEIRA *et al.*, 2017; SON *et al.*, 2020). Da mesma forma que Tucci *et al.* (2019), analisando o cálculo de volume em área de resíduos, concluíram que a modelagem tridimensional por meio da fotogrametria com VANT alcança precisão perfeitamente adequada para os requisitos práticos de precisão.

Em estudo para quantificar a qualidade dos dados coletados em trabalhos acadêmicos relacionados à análise comparativa da precisão gerada por equipamentos GNSS e VANT de baixo custo, Costa e Andrade (2018) confirmaram a expectativa em relação à precisão dos dados obtidos com VANTs em estudos e pesquisas relacionadas à gestão ambiental, à geolocalização e ao mapeamento de áreas que necessitam de algum tipo de intervenção, recuperação ou acesso remoto.

Para uma melhor compreensão do arranjo dos dados, foram gerados perfis verticais da área de estudo, demonstrando o MDS obtido através do levantamento com receptor GNSS e processamento das imagens do VANT (Figura 4). A partir disso, observa-se os detalhes do modelo obtido por meio do VANT. Para Rodrigues *et al.* (2018), o modelo digital de superfície gerado por imagens de aeronaves remotamente pilotadas é capaz de reproduzir com maior fidelidade as feições reais de campo.

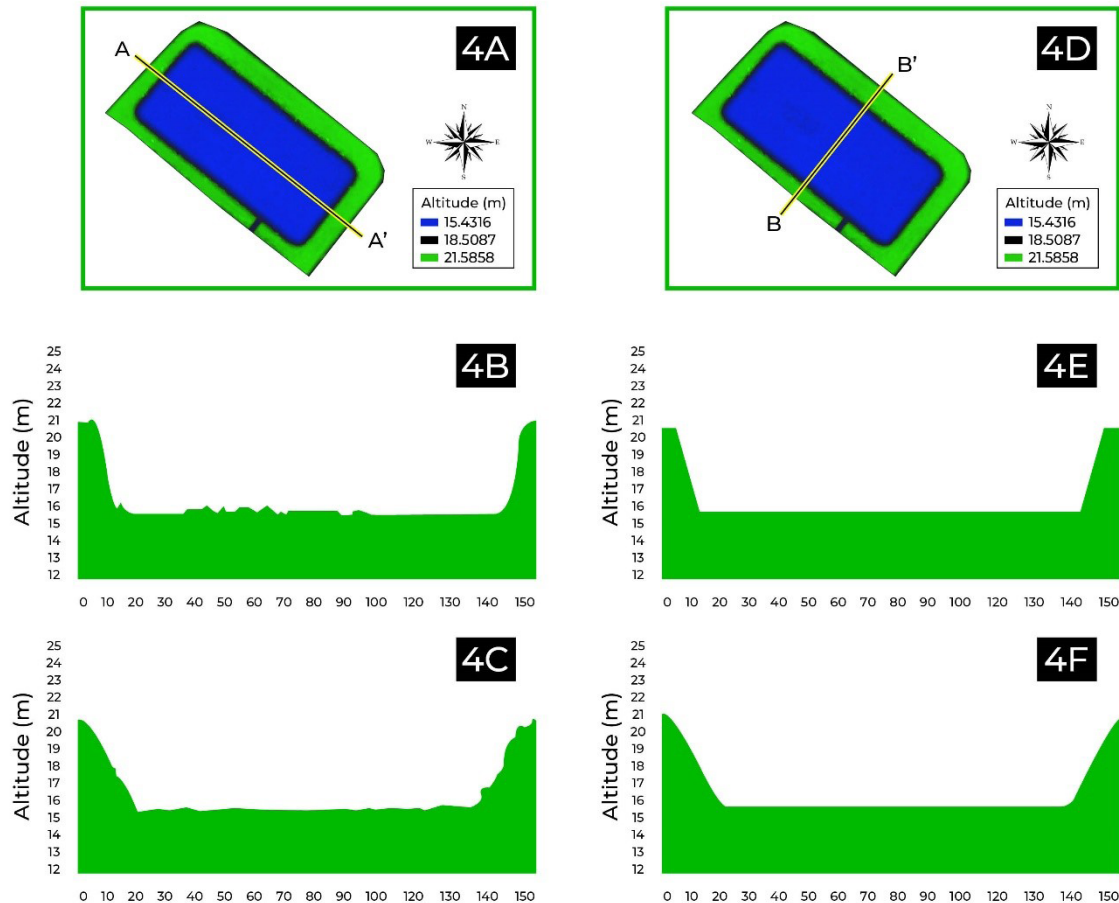


Figure 4 - Tracing of the vertical line A-A' (A); vertical profile of section A-A' of DSM obtained by UAV (B); vertical profile of section B-B' of DSM obtained by UAV (C); tracing of the vertical line B-B' (D); vertical profile of section A-A' of DSM obtained by GPS (E), and vertical profile of the DSM B-B' section obtained by GPS (F).

Figura 4 - Traçado da linha vertical A-A' (A); perfil vertical da seção A-A' de MDS obtido por VANT (B); perfil vertical da seção B-B' de MDS obtido por VANT (C); traçado da linha vertical B-B' (D); perfil vertical da seção A-A' de MDS obtido por GPS (E) e perfil vertical da seção B-B' de MDS obtido por GPS (F).

In the analysis of the accuracy data of the surveyed points, it was found that the difference between the coordinate values of the verification points within the DTM obtained by photogrammetry, was on average less than 6 cm (Table 3). When compared with the accuracy required by CAS-DCP, the quality of the survey under study is classified in Class A (scale 1:1000). Through these criteria, it is possible to identify that the DTM generated by the UAV survey has high positional accuracy. This result is in line with those found by Bruch *et al.* (2019), Silva *et al.* (2016), and Holler *et al.* (2018), who evaluated the cartographic accuracy standard of DTM obtained by UAV photogrammetry.

Na análise dos dados de acurácia dos pontos levantados, verificou-se que a diferença entre os valores de coordenadas dos pontos de verificação dentro do MDT obtido com fotogrametria foi em média menor que 6 cm (Tabela 3). Quando se compara com a acurácia exigida pelo PEC-PCD, tem-se que a qualidade do levantamento em estudo se enquadra na Classe A (escala 1:1000). Por meio desses critérios é possível identificar que o MDT gerado pelo levantamento com VANT apresenta alta acurácia posicional. Corroborando com o resultado encontrado por Bruch *et al.* (2019), Silva *et al.* (2016) e Holler *et al.* (2018) que avaliaram padrão de exatidão cartográfica de MDT obtidos por fotogrametria com VANT.

Table 3 - Analysis of accuracy data

Tabela 3 - Análise dos dados de acurácia

Checkpoints	X (m)	Y (m)	Z (m)
2	-0.0954	0.0442	0.0240
3	-0.1358	0.1565	-0.0010
5	0.0343	0.0662	0.1430
6	-0.0379	-0.0023	0.1129
9	0.1397	0.0393	0.0978
10	0.0812	0.0235	0.0328
12	0.1016	-0.0094	0.0636
14	0.0164	-0.1171	0.1154
15	-0.0278	-0.0544	0.0795
18	-0.0094	0.0030	-0.0676
20	0.0178	0.0158	0.0637
21	0.0251	-0.0035	0.1491
22	0.0260	0.0332	0.0610
28	-0.1028	-0.0522	0.0355
29	-0.0304	-0.0410	-0.0178
30	-0.0726	-0.0510	0.0829
32	-0.0336	-0.0697	0.0396
Average (m)	-0.0061	-0.0011	0.0597
Sigma (m)	0.0714	0.0608	0.0554
CAS-DCP	Class A	Class A	Class A
Mean Square Error (m ²)	0.0716	0.0608	0.0814

Long *et al.* (2019) evaluated the potential application of UAV for the production of Digital Surface Model and topographic planning in mining areas. The authors studied four quarries, and the result indicated that the data collected by UAVs are highly accurate, even with a flight height of 331 meters. The Mean Square Error (MSE) values of the coordinates (X, Y, and Z) were observed in the calibration data set, of 2.6 cm and 3.5 cm for vertical and horizontal, respectively, while in the verification data set (Checkpoints), the results were 4.6 cm and 2.1 cm for vertical and horizontal. The authors concluded that photogrammetric processing was successful in generating accurate data.

Finally, it should be mentioned that every technology has advantages and limitations, for this reason, it becomes important to obtain adequate information on the traditional survey methodologies and the most recent ones, consider the characteristics, purposes and budget of the project, choosing, then, the methodology that is the most appropriate. The development of more accurate, fast and economical tools for data acquisition is fundamental in the development of sustainable engineering.

Long *et al.* (2019) avaliaram a aplicação potencial do VANT para a produção de Modelo Digital de Superfície e planos topográficos em áreas de mineração. Os autores estudaram quatro pedreiras, e o resultado mostrou que os dados levantados por VANT possuem alta acurácia, mesmo com altura de voo de 331 metros. Foram observados valores de Erro Quadrático médio (RMSE) das coordenadas (XYZ) no conjunto de dados de calibração, de 2,6 cm e 3,5 cm para vertical e horizontal, respectivamente, enquanto no conjunto de dados de verificação (*Check points*), os resultados foram de 4,6 cm e 2,1 cm para vertical e horizontal. Os autores concluíram que processamento fotogramétrico obteve sucesso na geração de dados precisos.

Por fim, salienta-se que toda tecnologia tem vantagens e limitações, então torna-se importante conhecer bem as características das metodologias de levantamentos tradicionais e das mais recentes, considerar as finalidades e o orçamento do projeto, escolhendo, então, aquela que seja a mais adequada. O desenvolvimento de ferramentas mais precisas, rápidas e econômica na aquisição de dados é fundamental no desenvolvimento de uma engenharia sustentável.

CONCLUSIONS

The accuracy and precision of the volume data obtained through the DTM generated by Unmanned Aerial Vehicle, even with considerable flight height (120 meters), exhibited a result with a range of less than 1% compared to that obtained by conventional topography, thus, indicating high reliability and data accuracy;

Furthermore, it was identified that the products generated from a topographic survey with UAVs proved to be adequate for the analysis of the qualitative characteristics of the results, as concerning the geometric aspects and presentation of the features, they demonstrate greater capacity.

CONCLUSÕES

A acurácia e a precisão dos dados de volume obtidos por meio do MDT gerado por Veículo Aéreo Não Tripulado, mesmo com considerável altura de voo (120 metros), apresentou resultado com variação menor que 1% comparada àquela obtida por meio de topografia convencional. Indicando alta confiabilidade e precisão dos dados;

É identificado ainda que os produtos gerados a partir de levantamento topográfico com VANT's se mostraram adequados quando se trata das características qualitativas dos resultados, já que em aspecto geométrico e quanto à apresentação das feições, demonstram maior capacidade.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

BRUCH, A. F.; CIROLINI, A.; THUM, A. B.; CARNEIRO, M. Avaliação da acurácia das cubagens de volumes de mineração através de levantamentos convencionais e fotogramétricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 1, p. 283-298, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p283-298>

COELHO, R. C.; SILVA, R. L.; COSTA, R. S. S. Mapeamento Topográfico, com utilização de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) e Topografia Convencional. **Revista Engenharia Civil e Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2017.

COSTA, R. S. A.; ANDRADE, J. R. C. Análise comparativa da precisão de coordenadas geográficas obtidas a partir de equipamentos GPS portáteis e de um módulo integrado a um drone. **Revista de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 3, n. 5, p. 1-11, 2018.

CRYDERMAN, C.; MAH, S.; SHUFLETOSKI, A. Evaluation of UAV Photogrammetric Accuracy for Mapping and Earthworks Computations. **Geomatica**, v. 68, n. 4, p. 309-317, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5623/cig2014-405>

DANTAS, G. K. DE M. Estudo Geomorfológico a partir do uso de Sistema de Informações Geográficas (Landsat 8 e SRTM/NASA): um estudo de caso na sub-bacia do Riacho Santana-RN. Natal, Rio Grande do Norte, 2016. 257f. **Dissertação (Mestrado em Geografia)** – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ESTEBAN, J.; MCROBERTS, R. E.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; TOMÉ, J. L.; NÆSSET, E. Estimating Forest Volume and Biomass and Their Changes Using Random Forests and Remotely Sensed Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, p. 1-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11161944>

HE, H.; CHEN, T.; ZENG, H.; HUANG, S. Ground control point-free unmanned aerial vehicle-based photogrammetry for volume estimation of stockpiles carried on barges. **Sensors**, v. 19, n. 16, p. 3534, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s19163534>

HOLLER, W. A.; SERRATO, R. J.; GRAÇA, N. L. S. S.; WANDER DA CRUZ, W.; PEREIRA DE CRISTO, D. Avaliação de acurácia e precisão de modelos digitais de superfície a partir de diferentes Aeronaves Remotamente Pilotadas. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, v. 1, n. 13, p. 1-20, 2018.

LI, H.; CHEN, L.; WANG, Z.; YU, Z. Mapping of river terraces with low-cost UAS based structure-from-motion photogrammetry in a complex terrain setting. **Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 464, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11040464>

LONG, N. Q.; BUI, X. N.; CAO, C.; CANH, L. V. An approach of mapping quarries in Vietnam using low-cost Unmanned Aerial Vehicles. **International Journal of Sustainable Development**, v. 11, n. 2, p. 199-210, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2019-11-2-199-210>

- MANCINI, F.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M.; STECCHI, F.; FABBRI, S.; GABBIANELLI, G. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments. **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, p. 6880-6898, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs5126880>
- OLIVEIRA, D. R.; CICERELLI, R. E.; ALMEIDA, T.; MAROTTA, G. S. Geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1143-1151, 2017.
- PALÁCIO, H. A. Q.; FILHO, J. A. S.; ANDRADE, E. M.; DOS SANTOS, J. C. N.; BRASIL, P. P. Uso da terra e resposta hidrossedimentológica de microbacia no semiárido. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 6, n. 3, p. 187-194, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v6i3.953>
- PEDREIRA, W. J. P.; OLIVEIRA, J. A.; SANTOS, P. S. Avaliação da acurácia altimétrica usando a tecnologia VANT. **Revista Caminhos de Geografia Uberlândia**, v. 21, p. 209-222, 2020.
- PEREIRA, H. L.; CATALUNHA, M. J.; BORGES JUNIOR, M. J.; SOUSA, P. T. G. Qualidade de modelos digitais de elevação utilizando dados do SIGEF: Estudo de caso para as sub-bacias do Ribeirão dos Mangues e Rio Soninho no estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, p. 187-200, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p187-200>
- RAHMAN, A. A. A. B.; ABDUL MULUD, K. N.; MOHD, F. A.; JAAFAR, O.; TAHAR, K.N. Volumetric calculation using low cost unmanned aerial vehicle (UAV) approach. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 270, n. 1, p. 1-6, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/270/1/012032>
- RIDOLFI, E.; BUFFI, G.; VENTURI, S.; MANCIOLA, P. Accuracy analysis of a dam model from drone surveys. **Sensors**, v. 17, n. 8, p. 1777, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081777>
- RODRIGUES, M. T.; RODRIGUES, B. T.; OTANI, T. M.; TAGLIARINI, F. DE S. N.; CAMPOS, S. Levantamento topográfico por meio de veículo aéreo não tripulado (VANT). **Revista Energia na Agricultura**, v. 33, n. 4, p. 367-372, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2018v33n4p367-372>
- SANAGIOTTO, D. G.; PINHEIRO, A. N.; ENDRES, L. A. M.; MARQUES, M. G. Estudo experimental das características do escoamento em escadas para peixes do tipo ranhura vertical-padrões gerais do escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 135-148, 2012.
- SILVA, C. A.; DUARTE, R. C.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S.; 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. **BCG - Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 1, p. 73-94, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005>
- SON, S. W.; KIM, D. W.; SUNG, W. G.; YU, J. J. Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area. **Remote Sensing**, v. 12, n. 10, p. 1615, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12101615>
- TUCCI, G.; GEBBIA, A.; CONTI, A.; FIORINI, L.; LUBELLO, C. Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of UAV photogrammetric surveying. **Remote Sensing**, v. 11, n. 12, p. 1-27, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11121471>
- YANG, W.; LI, X.; YANG, B.; FU, Y. A novel stereo matching algorithm for digital surface model (DSM) generation in water areas. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 870, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050870>