



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 12, nº 2 (2026)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2026v12n2ID42585>



Avaliação da precisão de Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas aplicado à estimativa volumétrica em pedreiras

Accuracy Assessment of Unmanned Aircraft Systems for Volumetric Estimation in Quarries

Luana Aquino da Silva¹; Bruno Andrade Silva²; Rodrigo Vitor de Souza Rosa³; Raquel Naiara Fernandes Silva⁴

¹ Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia-MG, Brasil. Email: luana_akino@hotmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3454-1884>

² Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia-MG, Brasil. Email: brunoandradesilva@ufu.br,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7032-5973>

³ Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia-MG, Brasil. Email: rodrigovitor@ufu.br,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3796-0430>

⁴ Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia-MG, Brasil. Email: raquelfernandes@ufu.br,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8010-8251>

Resumo: Este estudo propõe uma metodologia utilizando levantamentos baseados em UAS para cálculos de volume, aplicada a cenários como empilhamento de rejeitos, aterros, cortes de estrada e outros métodos de disposição de materiais comumente utilizados na engenharia. Também compara essa abordagem com um método tradicional baseado em levantamentos topográficos convencionais. Os UAS têm sido cada vez mais adotados para cálculos de volume, oferecendo benefícios potenciais como eficiência operacional e redução de riscos durante a coleta de dados.

Um estudo de caso foi conduzido na Pedreira de Anápolis, empregando dois métodos distintos de levantamento: topografia convencional e fotogrametria baseada em UAS. Métricas como precisão, taxas de erro e recursos computacionais foram avaliadas, com os Pontos de Controle no Solo (GCPs) desempenhando um papel fundamental para garantir a precisão. As superfícies foram modeladas utilizando os softwares QGIS e Surfer, e os resultados foram comparados para avaliar as metodologias. Este estudo fornece informações sobre a aplicabilidade da tecnologia de UAS para análises volumétricas em contextos de engenharia.

Palavras-chave: Cálculo de volume; Pontos de Controle no Solo (GCP); Modelo digital de elevação (DEM).

Abstract: This study proposes a methodology using UAS-based surveys for volume calculations, applied to scenarios such as tailings stacking, landfills, road cuts, and other material disposal methods commonly used in engineering. It also compares this approach to a traditional method based on conventional topographic surveys. UAS have been increasingly adopted for volume calculations, offering potential benefits such as operational efficiency and reduced risks during data collection.

A case study was conducted at the Anápolis Quarry, employing two distinct survey methods: conventional topography and UAS-based photogrammetry. Metrics such as precision, error rates, and computational resources were evaluated, with Ground Control Points (GCPs) playing a key role in ensuring accuracy. The surfaces were modeled using QGIS and Surfer software, and the results were compared to assess the methodologies. This study provides insights into the applicability of UAS technology for volumetric analyses in engineering contexts.

Keywords: Volume calculation; Ground Control Points (GCP); Digital elevation model (MDE).

Recebido: 06/01/2026; Aceito: 15/05/2026; Publicado: 30/07/2026.

1. Introdução

Este estudo propõe uma metodologia para o cálculo de volumes em diversas aplicações da engenharia, com ênfase no uso de levantamentos realizados com UAS. A proposta pode abranger empilhamentos de rejeitos, aterros, cortes para rodovias e outras demandas gerais da engenharia, práticas essenciais para o planejamento, execução e monitoramento de obras. Tais atividades influenciam diretamente a eficiência, segurança e sustentabilidade dos projetos. A topografia convencional, embora consolidada como método de alta precisão, enfrenta desafios logísticos e de segurança em ambientes dinâmicos e de risco, como frentes de lavra e pilhas de estoque em pedreiras. Nesse cenário, a fotogrametria baseada em Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (UAS/UAV) surgiu como uma alternativa viável, impulsionada pelo desenvolvimento do algoritmo *Structure from Motion* (SfM). O SfM permite a reconstrução tridimensional de alta resolução a partir de imagens com sobreposição, sem a dependência estrita de parâmetros de câmera pré-definidos (DELIRY; AVDAN, 2021).

Adicionalmente, a densidade de informações capturadas por UAS é massivamente superior; enquanto a topografia clássica se baseia em amostragem de pontos discretos, o imageamento aéreo gera nuvens de pontos adensadas e Modelos Digitais de Superfície (MDS) com alta resolução espacial, o que (Zhang et al. 2023) caracterizam como um salto qualitativo na interpretação do terreno. Com isso a geração de ortomosaicos e modelos 3D multiespectrais amplia significativamente a capacidade de visualização e análise de dados (Silva & Oliveira, 2024).

A crescente adoção de Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (UAS) na topografia e na engenharia tem impulsionado a necessidade de metodologias robustas para a validação da precisão dos dados coletados, especialmente em ambientes dinâmicos como pedreiras ativas Thammaboribal(2026). Estudos recentes, como o de Yiğit e Senol (2025), demonstram a aplicação de fotogrametria por UAV e análise geoespacial para quantificar mudanças de superfície e avaliar fatores de risco em pedreiras, ressaltando a importância de uma validação rigorosa para garantir a confiabilidade dos resultados. Contudo, a literatura ainda carece de investigações que comparem sistematicamente os resultados obtidos por topografia convencional e por UAS em pedreiras ativas, com superfícies irregulares e condições operacionais reais, especialmente no que tange à acurácia absoluta e relativa dos modelos gerados Thammaboribal.(2026).

Portanto, enquanto os métodos tradicionais com Estação Total permanecem fundamentais para locações que exigem precisão milimétrica, o uso de UAS consolida-se como uma ferramenta de eficiência disruptiva, essencial para suprir as demandas de agilidade e detalhamento de um setor de engenharia cada vez mais dinâmico e tecnológico (Brown et al., 2025).

Nesse sentido, o uso de UAS para o cálculo de volumes tem se mostrado promissor em diversos estudos. Por exemplo, foi proposta, por Jiang et al. (2022), uma metodologia automatizada para a gestão de resíduos de construção e demolição, aplicada em canteiros de obras, aterros e áreas de descarte ilegal. Essa abordagem integrou UAS fotogrametria baseada em SfM, aprendizado profundo (*deep learning*) e sistemas de informações geográficas (GIS) para levantamento, detecção, medição e gerenciamento de informações sobre resíduos. Em um estudo, experimentos realizados em locais de descarte ilegal demonstraram a eficácia da metodologia para detecção e quantificação de resíduos, evidenciando benefícios como a obtenção de informações quantitativas e geográficas para apoiar governos municipais na gestão inteligente desses descartes (JIANG et al., 2022).

Embora estudos anteriores tenham demonstrado a viabilidade do UAS-SfM para estimativas volumétricas em ambientes controlados ou de pequena escala, ainda há carência de investigações que comparem sistematicamente os resultados obtidos por topografia convencional e por UAS em pedreiras ativas, com superfícies irregulares e condições operacionais reais. Adicionalmente, notabiliza-se a possibilidade de contribuir para uma metodologia que considera reconstrução de superfícies primitivas (pré-escavação ou pré-aterro) quando os dados topográficos originais não estão disponíveis, um desafio frequente em projetos de recuperação de áreas mineradas ou de cálculo de passivos ambientais.

Preencher essa lacuna é relevante porque: valida, com dados de campo reais, se a precisão dos UAS é suficiente para fins de engenharia (ex.: fechamento de balanços de massa); fornece à comunidade um método prático e acessível para estimar volumes históricos, sem depender de levantamentos pretéritos; contribui para a padronização de boas práticas em fotogrametria baseada em UAS para aplicações volumétricas, atualmente carentes de protocolos amplamente aceitos. Reforçando essa tendência, um estudo desenvolvido por Jiang et al. (2022) apresentou avanços significativos na automação do monitoramento volumétrico em canteiros de obras e áreas de descarte. Os autores integraram fotogrametria baseada em *Structure from Motion* (SfM) com algoritmos de aprendizado profundo (Deep Learning) e Sistemas de Informações Geográficas (GIS) para gerenciar resíduos de construção e demolição. A metodologia permitiu não apenas a estimativa volumétrica precisa, mas também a detecção automatizada e o mapeamento geográfico dos materiais. Os resultados evidenciaram que a combinação de UAS com inteligência artificial supera as limitações dos métodos convencionais de

inspeção visual e topografia manual, oferecendo uma gestão inteligente e em tempo real, essencial para o planejamento urbano e conformidade ambiental (JIANG et al., 2022).

Ainda, conforme o estudo de Deliry e Avdan (2021), *Accuracy of Unmanned Aerial Systems Photogrammetry and Structure from Motion in Surveying and Mapping: A Review*, o uso de fotogrametria baseada em SfM tem ganhado destaque como uma alternativa viável para levantamentos volumétricos, devido ao seu baixo custo e à rapidez na obtenção de resultados. De acordo com *Review* supracitado, Hugenholtz et al. (2014) aplicaram essa técnica para calcular o volume de um estoque de cascalho, utilizando imagens com resolução de 3,5 cm. A validação dos resultados foi realizada com RTK-GPS, indicando que o método UAS gerou um Modelo Digital de Elevação (MDE) com precisão vertical de 0,10 m. A diferença de volume entre os modelos gerados por UAS e DGPS foi de cerca de 3,2%. Esses resultados apontam que a técnica UAS-SfM pode alcançar níveis de precisão superiores ao LiDAR aerotransportado, embora ainda inferiores ao TLS (scanner a laser terrestre). Também nesse estudo, foi citado Cryderman et al. (2014) que investigaram a precisão da fotogrametria com SfM em levantamentos volumétricos e observaram que, ao comparar os resultados com dados de levantamentos GNSS, os modelos gerados pelo método UAS apresentaram precisão equivalente à obtida com levantamentos GNSS RTK, considerando um nível de confiança de 95%. Segundo os padrões estabelecidos pela ASPRS (Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto), as precisões obtidas (RMSEXY = 0,039 m e RMSEZ = 0,044 m) foram classificadas como adequadas para mapeamentos na escala de 1:200 (ASPRS, 2014).

Diante dessas evidências promissoras e da crescente difusão do uso de UAS, a incorporação de mais exemplos de estudos pode contribuir significativamente para a validação da metodologia pela comunidade científica. Além disso, tais estudos permitem um entendimento mais amplo sobre o comportamento de diferentes levantamentos em diversas aplicações, como aterros rodoviários, empilhamentos de agregados, empilhamentos de rejeitos e outras formas de disposição amplamente utilizadas na engenharia.

Este estudo tem como objetivo geral comparar a acurácia e a eficiência de levantamentos volumétricos realizados por topografia convencional em relação à fotogrametria com UAS, tomando como objeto de análise uma pedreira ativa em Anápolis/GO, com dados coletados em setembro de 2024. Para fundamentar essa comparação, a pesquisa busca quantificar as discrepâncias volumétricas entre ambos os métodos em pilhas de estoque e áreas escavadas, validando a acurácia posicional do modelo digital gerado por UAS frente aos pontos de controle de solo. Adicionalmente, o trabalho propõe e testa um procedimento metodológico para a estimativa de superfícies primitivas (pré-escavação ou pré-aterro) em cenários de ausência de dados topográficos originais. Por fim, pretende-se documentar um fluxo de trabalho replicável e integrado, abrangendo desde a aquisição de imagens até o cálculo final de volumes por meio da utilização dos softwares Agisoft Metashape, QGIS e Surfer.

2. Metodologia

A metodologia adotada neste estudo baseou-se na comparação volumétrica entre dois levantamentos distintos realizados na Pedreira Anápolis/GO: um método topográfico convencional e um levantamento fotogramétrico por meio de (UAS). Inicialmente, o levantamento cadastral foi executado em junho de 2024, fundamentado em 11 seções transversais espaçadas a cada 25 metros (Figura 1, Tabela 1), resultando em um volume calculado de 2.117.824 m³. Subsequentemente, em setembro de 2024, realizou-se o levantamento aéreo, operado a uma altura de voo de 184 m com uma resolução de solo (GSD) de 5,89 cm/px. Para a validação da acurácia do modelo, foram adotadas as métricas de Erro de Reprojeção e o RMSE (Root Mean Square Error).

(Equação 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

O erro de reprojeção quantifica a precisão geométrica do alinhamento das imagens (James et al., 2017), enquanto o RMSE avalia a discrepância entre as coordenadas estimadas e as reais (ASPRS, 2014). A operação cobriu uma área de 1,23 km² através da captura de 420 imagens, apresentando uma sobreposição (overlap) robusta, conforme indicado no mapa de sobreposição (Fig. 1), a vasta maioria da área central foi coberta por mais de 9 imagens por ponto, garantindo taxas de sobreposição longitudinal e lateral superiores a 70-80%, fundamentais para a redundância em áreas de mineração.

O processamento dos dados foi realizado no software Agisoft Metashape Professional (v1.8.3). Para a etapa de alinhamento inicial das imagens (*Structure from Motion*), adotou-se precisão média (*Medium*) e pré-seleção de referência baseada na origem (*Source*), com limites de 40.000 pontos-chave e 4.000 pontos de ligação. Este processo resultou na geração de 313.907 pontos de ligação (*tie points*), com um erro de reprojeção de 2,03 px, concluído em aproximadamente 24 minutos e 43 segundos. A execução ocorreu em uma estação de trabalho equipada com placa-mãe Machinist PR9, processador E5-2640 v3, 48 GB de memória RAM DDR4, placa de vídeo RX 550 (4 GB) e SSD de 120 GB. Esse conjunto de hardware e os parâmetros configurados asseguraram o desempenho adequado para a geração dos Modelos Digitais de Elevação (MDE, permitindo a precisão necessária para a análise volumétrica comparativa.

Para assegurar a comparabilidade entre os métodos, os mesmos pontos de interpolação, no software Surfer, utilizados no levantamento convencional foram aplicados no levantamento com UAS. Ambos os conjuntos de dados foram processados no software QGIS, onde foram gerados modelos digitais de elevação (MDE). Em seguida, as superfícies interpoladas representativas, do entorno da jazida foram criadas utilizando o software Surfer, de modo a garantir maior fidelidade ao modelo do terreno, sendo essas uma aproximação do terreno antes da escavação.

Após a geração das superfícies interpoladas, realizou-se o cálculo dos volumes referentes às áreas de interesse para cada método. Essa abordagem permitiu uma análise comparativa entre os dois levantamentos, avaliando sua precisão, eficiência e eventuais discrepâncias nos resultados.



Figura 1 – Levantamento cadastral - junho de 2024.
Fonte: Autores (2024).

Tabela 1 – Volumes Extraídos do levantamento cadastral – Junho de 2024.

Volumes Extraídos			
Seção	Distância (m)	Espaçamento (m)	Volume de material extraído
S1	45.561	0.000	0.0
S2	70.561	25.000	83.347,00

S3	95.561	25.000	283.624,20
S4	120.561	25.000	567.751,10
S5	145.561	25.000	883.778,60
S6	170.561	25.000	1.204.412,50
S7	195.561	25.000	1.522.154,90
S8	220.561	25.000	1.822.304,80
S9	245.561	25.000	2.024.012,20
S10	270.561	25.000	2.102.035,90
S11	295.561	25.000	2.117.824,3

Fonte: Autores (2024).

No levantamento com UAS utilizou-se o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 22S (EPSG: 31982). A nuvem de pontos inicial continha 341.648 pontos, dos quais 313.907 foram mantidos após o processamento, com um erro de reprojeção RMS de 0,261921 (2,02632 pixels). A nuvem de pontos densa gerada apresentou 28.312.699 pontos, utilizando 3,20 GB de memória e exigindo um tempo de processamento de 15 minutos e 28 segundos no software Agisoft Metashape Professional, versão 1.8.3. O Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado possui dimensões de 10.645 x 8.671 pixels, ocupando um tamanho de 6,09 GB, e foi processado em 16 minutos e 35 segundos, com uso de 1,04 GB de memória. O processamento foi executado em um sistema com 15,85 GB de RAM, processador Intel Xeon E5-2640 v3 @ 2,60GHz e GPU Radeon RX550/550 Series (figura 02).



Figura 2 – Ortomosaico da Pedreira em Estudo.

Fonte: Autores (2024).

Para a coleta de dados realizada em 22 de setembro de 2024, utilizou-se um UAS DJI Mavic pro equipado com a câmera modelo FC220, com ângulo focal de 4,73 mm. Os voos foram conduzidos a uma altura média de 184 metros, resultando na captura de 420 imagens (Figura 3) e na cobertura de uma área de 1,23 km². Para garantir a precisão do levantamento e a georreferência das imagens, utilizou-se o receptor GNSS I50 da CHC NAV, um equipamento de alta

precisão capaz de fornecer dados RTK em tempo real, no sentido de proporcionar a qualidade dos pontos de controle e a exatidão das coordenadas geográficas.

A resolução espacial obtida foi de 5,89 cm/pixel, enquanto o erro médio de reprojeção dos modelos gerados foi de 2,03. Os erros na reconstrução do modelo foram representados graficamente por meio de elipses, sendo que a cor das elipses indica os erros associados à coordenada Z (elevação) e a forma das elipses representa os erros nas coordenadas X e Y (localização horizontal). Adicionalmente, os locais estimados das câmeras durante o levantamento foram marcados por pontos pretos, permitindo uma análise visual da distribuição espacial dos erros e das posições de captura no modelo gerado (Figura 3).

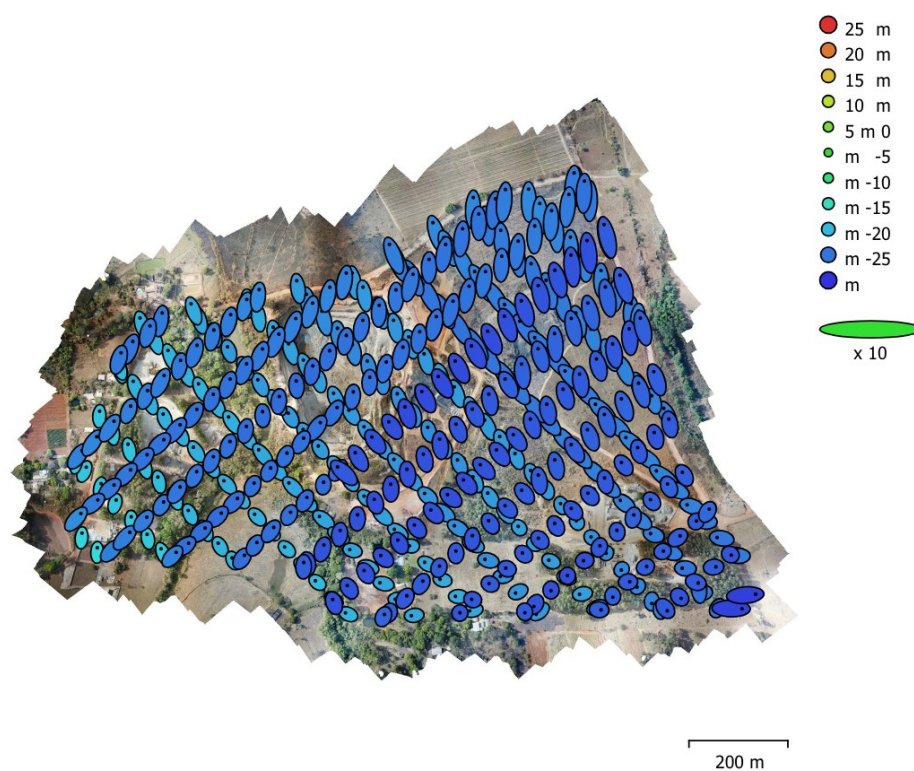


Figura 3 – Posições da câmera e erros estimados.

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 2 apresenta os erros médios de localização das câmeras estimados durante o processamento. O erro médio nas coordenadas horizontais (X e Y) foi de 1,18819 m e 2,50389 m, respectivamente, resultando em um erro combinado XY de 2,7715 m. Por outro lado, o erro médio na coordenada Z (altitude) foi maior, atingindo 19,5297 m, o que contribuiu para um erro total de 19,7253 m. Esses valores destacam a diferença na precisão entre as dimensões horizontais e verticais, refletindo a influência de fatores como a qualidade do modelo digital de terreno e a calibração dos sensores durante o levantamento.

Tabela 2 – Média de erro da camera.

Média de erro da câmera				
X Error (m)	Y Error (m)	Z Error (m)	XY Error (m)	Total error (m)
1.18819	2.50389	19.5297	2.7715	19.7253

Fonte: Autores (2024).

Adiante, é relevante destacar a importância dos pontos de controle terrestre (GCPs) neste levantamento com UAS para a obtenção de imagens com maior acurácia e precisão. Os GCPs são amplamente utilizados para corrigir informações de

posição em imagens capturadas por UAS. Para isso, são distribuídos na área de interesse e suas coordenadas (x, y, z) são medidas com equipamentos de alta precisão, como o sistema RTK-GNSS. Antes da captura das imagens, marcadores visíveis são posicionados sobre os GCPs, facilitando sua identificação nas fotografias aéreas. Posteriormente, as coordenadas corretas desses pontos são inseridas no software de fotogrametria, permitindo o ajuste preciso das posições das imagens por meio do processo de *bundle adjustment* (Taddia; Stecchi; Pellegrinelli, 2020).

No levantamento realizado neste estudo, foram utilizados 20 pontos de controle terrestre (GCPs). A maior parte desses pontos, aproximadamente 15, foi concentrada na região de maior interesse, denominada Jazida. Adicionalmente, três pontos de controle (16, 17 e 18) foram distribuídos na área de processamento, enquanto outros dois pontos (19 e 20) foram posicionados em uma área mais afastada, conforme ilustrado na Figura 04. Os erros associados às coordenadas Z são representados pela coloração das elipses, enquanto os erros nas coordenadas X e Y são indicados pelo formato das elipses. Por fim, as localizações estimadas dos GCPs são marcadas por pontos ou cruzamentos no modelo.

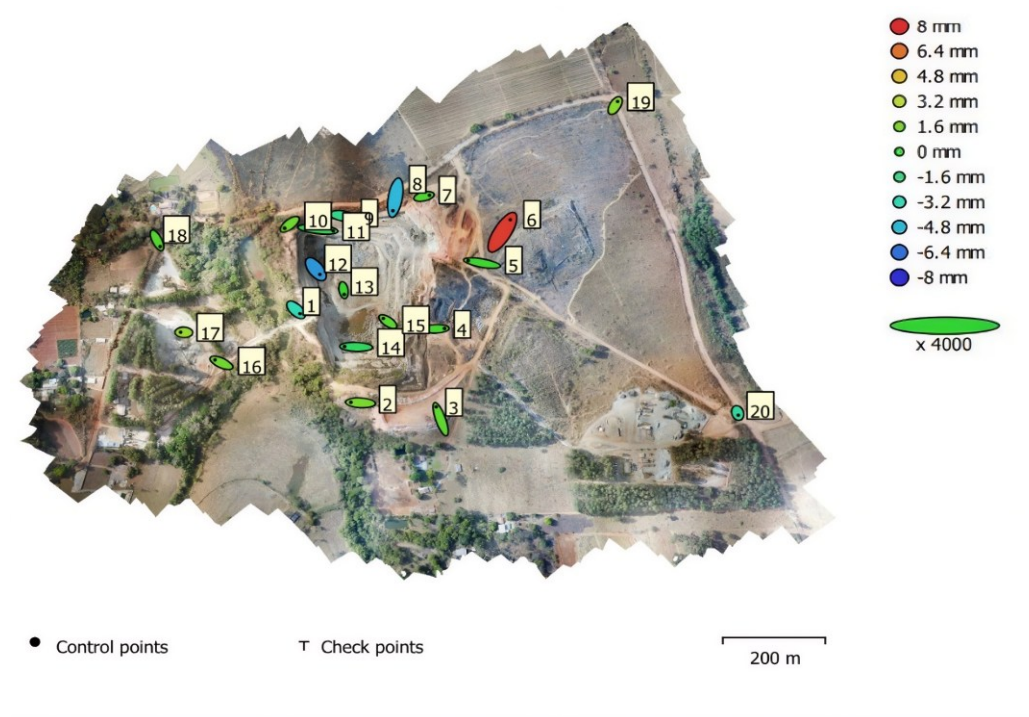


Figura 4 – Localização dos pontos de controle e erros estimados.

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 3 apresenta os valores de erro quadrático médio (RMSE) para os pontos de controle utilizados no levantamento. O erro médio nas coordenadas X e Y foi de 7,03 mm e 6,02 mm, respectivamente, resultando em um erro combinado XY de 9,26 mm. Já o erro associado à coordenada Z (altitude) foi de 2,81 mm, indicando maior precisão vertical em relação às coordenadas horizontais. O erro total, que integra todas as dimensões, foi de 9,68 mm.

Tabela 3 – RMSE referente aos pontos de controle.

RMSE					
Count	X Error (mm)	Y Error (mm)	Z Error (mm)	XY Error (mm)	Total (mm)
20	7.0358	6.02461	2.81721	9.26274	9.68169

Fonte: Autores (2024).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado apresentou uma resolução espacial de 23,6 cm/pixel (Figura 5). Segundo Mandlbarger et al. (2016), resoluções em torno de 25 cm/pixel são consideradas apropriadas para aplicações em engenharia

e planejamento urbano. Além disso, a densidade de pontos alcançada foi de 18 pontos por metro quadrado. Nesse sentido, conforme aponta Vosselman et al. (2010), recomenda-se uma densidade mínima de 10 pontos/m² para modelos de alta precisão. Esses valores indicam que o MDE produzido está dentro dos padrões recomendados pelas referências bibliográficas retromencionadas.

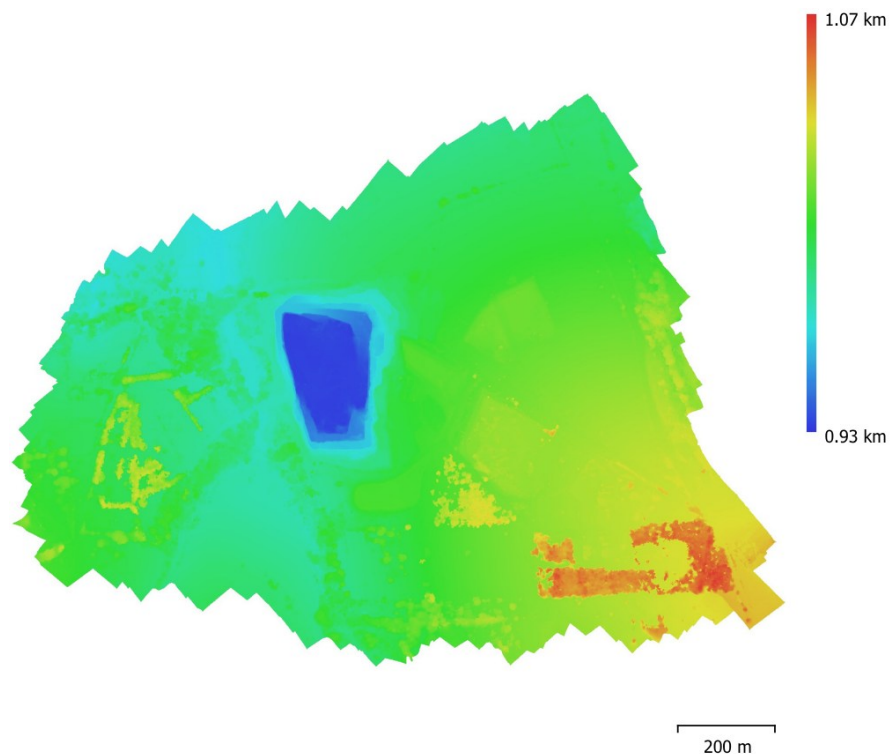


Figura 5 – Modelo Digital de Elevação.

Fonte: Autores (2024).

Para limiar precisamente a jazida, foi utilizado o software QGIS, que permitiu a análise de dados georreferenciados e a avaliação detalhada das características topográficas da região. A figura 6 representa a delimitação da área de estudo, que foi de aproximadamente 25 hectares.

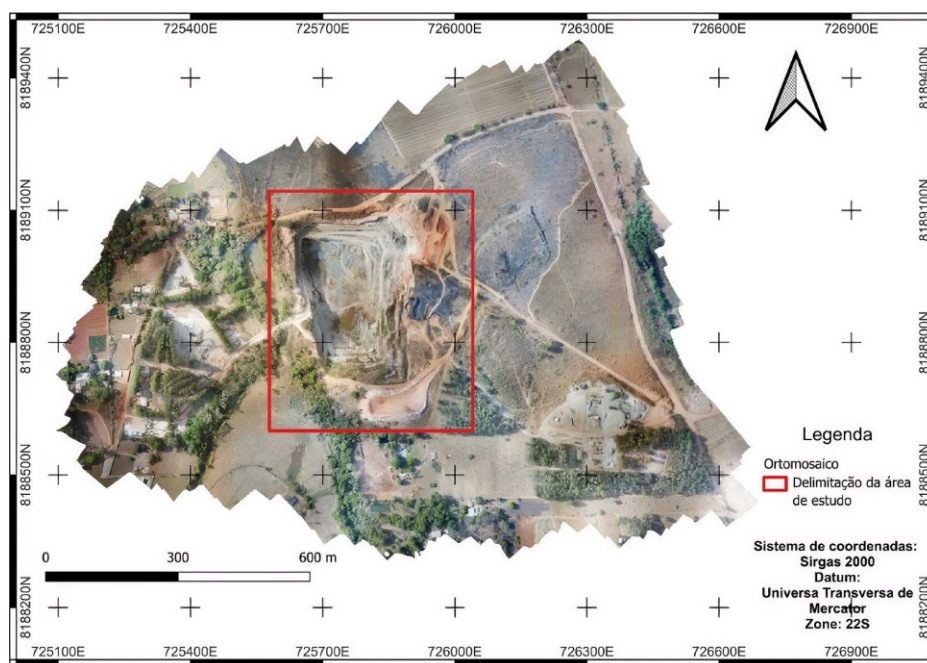


Figura 6 – Delimitação da área de estudo – Software QGIS.

Fonte: Autores (2024).

Com os dados levantados pelo UAS, utilizou-se o software QGIS para gerar os pontos correspondentes às coordenadas da área de interesse, a jazida. Em seguida, com esses pontos e os obtidos pelo levantamento topográfico, foi utilizado o software Surfer para modelar a superfície do terreno.

A escolha da interpolação por Krigagem para a reconstrução da superfície primitiva, em detrimento de outros interpoladores como a Rede Triangular Irregular (TIN), foi fundamentada na necessidade de modelar a tendência do terreno em áreas com dados amostrais restritos às bordas. Embora o TIN seja eficaz para representar feições locais e seja frequentemente utilizado com nuvens de pontos densas geradas por fotogrametria, ele produz uma superfície facetada que pode não ser ideal para estimar uma morfologia original contínua e suave em áreas não amostradas diretamente. (Cheng, T., et. Al.) A Krigagem, por sua vez, é um método geoestatístico que modela a autocorrelação espacial dos dados e, crucialmente, fornece uma estimativa do erro associado à predição (variância de Krigagem), o que é essencial ao reconstruir uma superfície primitiva não amostrada. Essa abordagem alinha-se com estudos de referência, como o de (Zarychta et al. (2020), que validaram o uso da Krigagem para reconstruir morfologias pré-extração em pedreiras. Embora a alta densidade de pontos gerada por levantamentos fotogramétricos possa viabilizar outras estratégias, como a geração direta de Modelos Digitais de Elevação (MDE) por triangulação, a Krigagem mostrou-se mais adequada para o objetivo específico de estimar a superfície original a partir de dados esparsos e restritos ao perímetro preservado.

Para o cálculo do volume escavado, foi necessário determinar a superfície primitiva da área de interesse. Nesse contexto, no software Surfer, a metodologia adotada consistiu na seleção de pontos ao longo do contorno da área de estudo e na aplicação da interpolação por Kriging, utilizando 30 pontos aleatórios localizados no entorno da área de interesse. O número de 30 pontos foi estipulado após análises preliminares que indicaram que o uso de menos ou mais pontos resultava na geração de *outliers*.

O processo de seleção dos 30 pontos foi realizado no software QGIS, com base na análise visual do ortomosaico e do Modelo Digital de Elevação (MDE) atual. Foram selecionados manualmente pontos ao longo do perímetro externo da cava, em locais onde não havia evidências de escavação ou deposição de rejeitos e/ou estéril da mineração, presumindo-se que a topografia original estivesse preservada. Os pontos foram distribuídos de forma aproximadamente equidistante ao redor de toda a área da jazida, garantindo cobertura angular. As coordenadas (X, Y, Z) desses pontos foram extraídas do MDE gerado pelo levantamento com UAS. No software Surfer, a interpolação por Krigagem foi configurada com modelo de semivariograma linear (após testes com modelos exponencial e esférico, o linear apresentou melhor ajuste aos dados), sem anisotropia, e com número máximo de pontos vizinhos fixado em 12. O mesmo conjunto de pontos e os mesmos

parâmetros de interpolação foram aplicados tanto aos dados do levantamento topográfico convencional quanto aos do levantamento com UAS, assegurando a comparabilidade dos resultados.

A opção pela Krigagem, em detrimento de outros interpoladores como a Rede Triangular Irregular (TIN), foi fundamentada na natureza do objetivo proposto: reconstruir a superfície de tendência do terreno pré-escavação a partir de dados amostrais restritos às bordas. A interpolação por TIN é um método determinístico que conecta pontos amostrais por arestas retas, gerando uma superfície facetada. Embora eficaz para representar feições locais, essa abordagem pode apresentar limitações quando se deseja estimar uma superfície contínua em áreas sem dados amostrais bem consolidados.

Conforme discutido por Raza et al. (2023), a Krigagem é uma família de métodos geoestatísticos que, diferentemente dos interpoladores determinísticos, modela a autocorrelação espacial dos dados e, crucialmente, fornece uma estimativa do erro associado à predição (kriging variance). Esta última característica foi um fator determinante para a escolha da Krigagem neste estudo, uma vez que, ao reconstruir uma superfície primitiva não amostrada, é fundamental dispor de uma medida da incerteza da estimativa, especialmente nas áreas mais afastadas dos pontos de borda.

A escolha da pesquisa está alinhada com estudos de referência na área, como o de Zarychta et al. (202 Zary 0), que utilizaram a Krigagem para reconstruir a morfologia pré-extração da Pedreira Liban, na Polônia, a partir de dados de mapas topográficos, validando o método por validação cruzada e por mapas de erro (SDOK). Outros interpoladores, como o Inverso da Distância Ponderada (IDW), foram preteridos por gerarem superfícies com artefatos circulares (bull's-eye effect) e por não fornecerem uma estimativa de erro associada (RAZA et al., 2023). Por esses motivos, a Krigagem foi considerada, neste estudo, como o interpolador mais adequado para a estimativa da superfície primitiva.

Cabe destacar que o levantamento fotogramétrico gerou uma nuvem de pontos densa com aproximadamente 28 milhões de pontos, o que viabilizaria o uso de outras estratégias de modelagem, como a geração direta de um Modelo Digital de Elevação (MDE) por meio de triangulação (TIN) a partir da nuvem densa, ou ainda a aplicação de interpoladores locais como o vizinho natural (natural neighbour), que, conforme Raza et al. (2023), apresentou bom desempenho para conjuntos de dados com alta densidade amostral. No entanto, para o objetivo específico de reconstruir a superfície primitiva (pré-escavação), a qual não foi amostrada diretamente, recorreu-se a uma seleção de pontos exclusivamente no perímetro preservado da jazida. Nesse contexto de dados esparsos e restritos às bordas, a Krigagem mostrou-se mais adequada do que métodos que dependem de alta densidade amostral ou que produzem superfícies facetadas.

Esses pontos foram interpolados para criar uma superfície que representasse, de forma aproximada, as condições do terreno antes da escavação. Para garantir uniformidade e consistência nos cálculos, os mesmos pontos interpolados foram aplicados tanto ao levantamento topográfico quanto ao levantamento realizado com o UAS. Com as superfícies geradas, foi possível calcular os volumes a partir da diferença entre a superfície original e a superfície atual, permitindo uma comparação entre os resultados dos dois métodos. Analisando os dados levantados, o fluxograma apresentado na Figura 7 sintetiza a metodologia utilizada no estudo, detalhando as etapas de coleta, processamento e análise dos levantamentos realizados com UAS e métodos topográficos tradicionais.

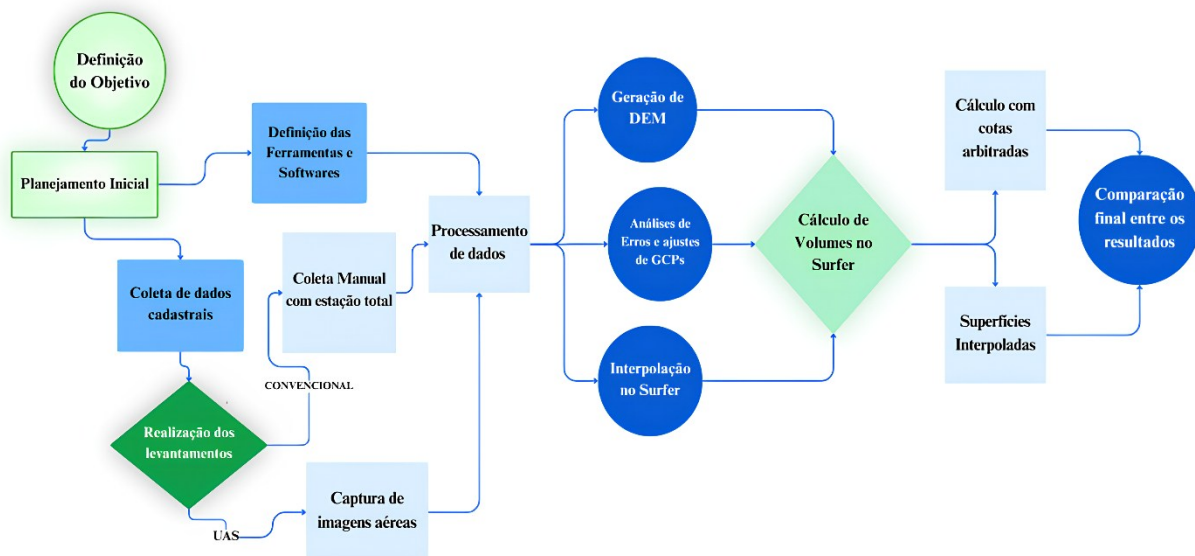
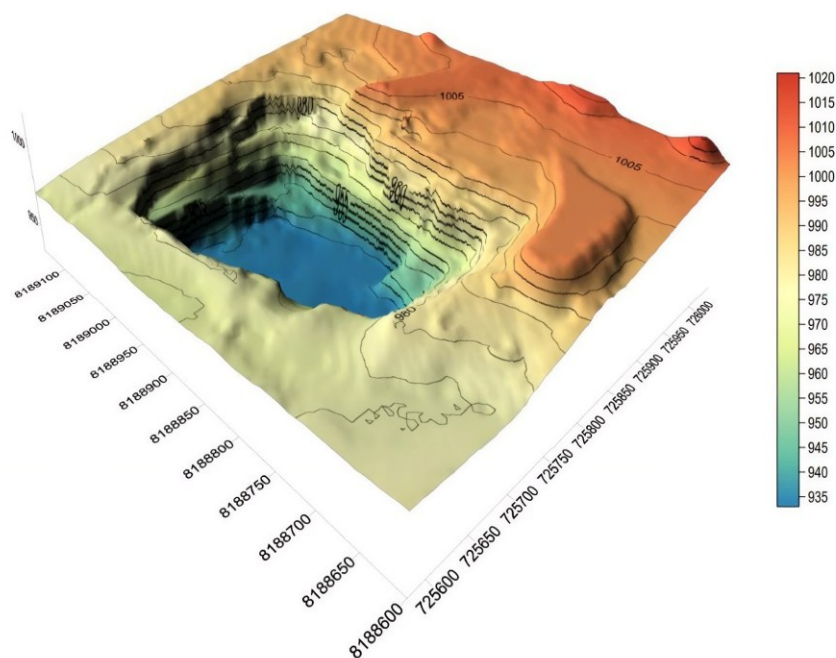


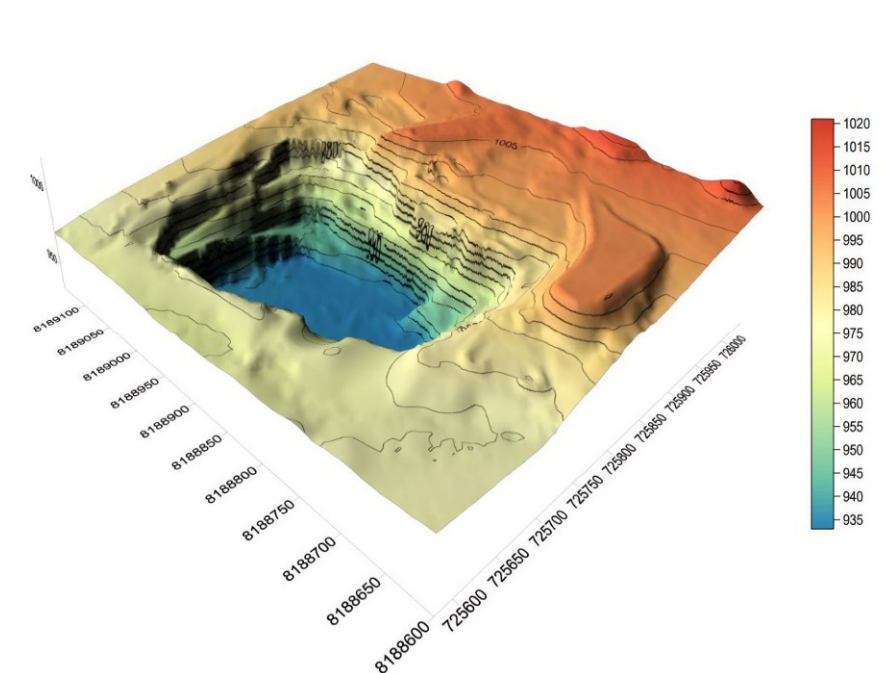
Figura 7 – Fluxograma representando as etapas metodológicas do estudo.
Fonte: Autores (2024).

3. Resultados

Após o processamento dos modelos digitais do terreno, representados nas Figuras 8 e 9, observa-se uma leve diferença na disposição das curvas de nível entre os levantamentos topográficos convencionais e os realizados com UAS. Essas discrepâncias são mínimas, evidenciando aproximação entre os dois métodos de levantamento.



*Figura 8 – Modelo Digital do Terreno pela Topografia Convencional – Software Surfer.
Fonte: Autores (2024).*



*Figura 9 – Modelo Digital de Elevação levantamento com UAS – Software Surfer.
Fonte: Autores (2024).*

Adiante, após a interpolação, foram geradas superfícies que apresentaram uma boa suavização, sem a presença de *outliers*. Essas superfícies se mostraram com indícios quanto à representação das tendências de elevação, com os pontos

mais altos destacados em vermelho e os pontos mais baixos em azul, evidenciando as variações altimétricas do terreno da jazida. Esse resultado pode ser considerado um aspecto positivo da modelagem proposta, demonstrando sua capacidade de capturar, de maneira rápida, as características gerais do relevo (Figura 10 e 11).

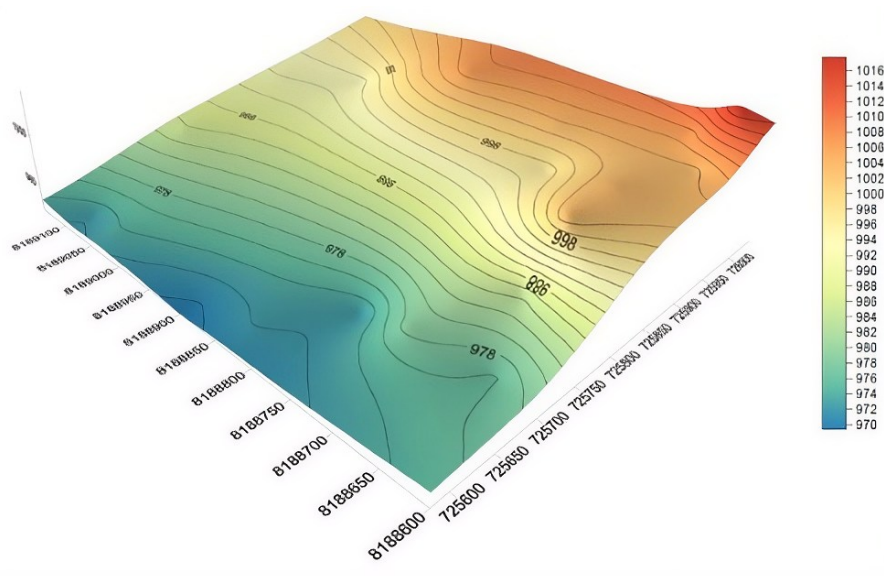


Figura 10 – Superfície Interpolada pelo Software Surfer.
Fonte: Autores (2024).

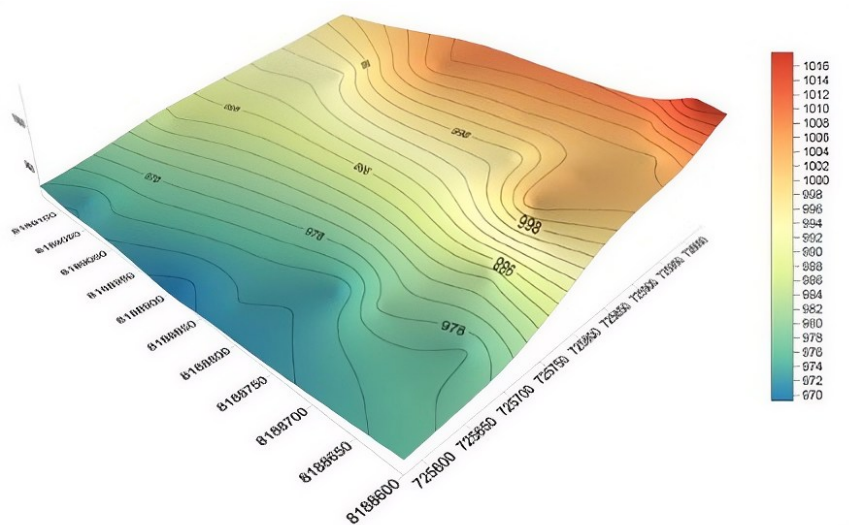


Figura 11 – Superfície Interpolada pelo levantamento com UAS – Software Surfer.
Fonte: Autores (2024).

Após a análise das superfícies mencionadas, optou-se por realizar uma sobreposição entre o modelo digital do terreno e a superfície interpolada para verificar possíveis discrepâncias. Como era esperado, a interpolação apresentou contornos diferentes da superfície original (Figuras 8 e 9), o que ficou evidente em algumas elevações sobressalentes, conforme ilustrado abaixo (Figuras 12 e 13). Esse resultado destaca que o modelo de interpolação proposto possui algumas imperfeições inerentes à sua natureza, dado que seu objetivo é representar, de forma aproximada, as condições do terreno

antes da escavação. Contudo, essas limitações não comprometem sua eficácia como ferramenta para análises preliminares e estimativas aproximadas.

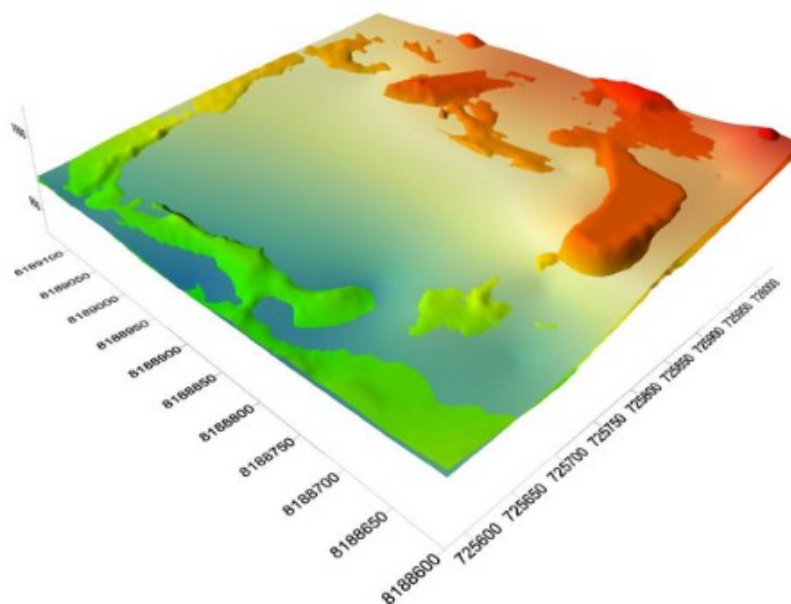


Figura 12 – Sobreposição da superfície interpolada com modelo digital de elevação do levantamento topográfico convencional – Software Surfer.
 Fonte: Autores(2024).

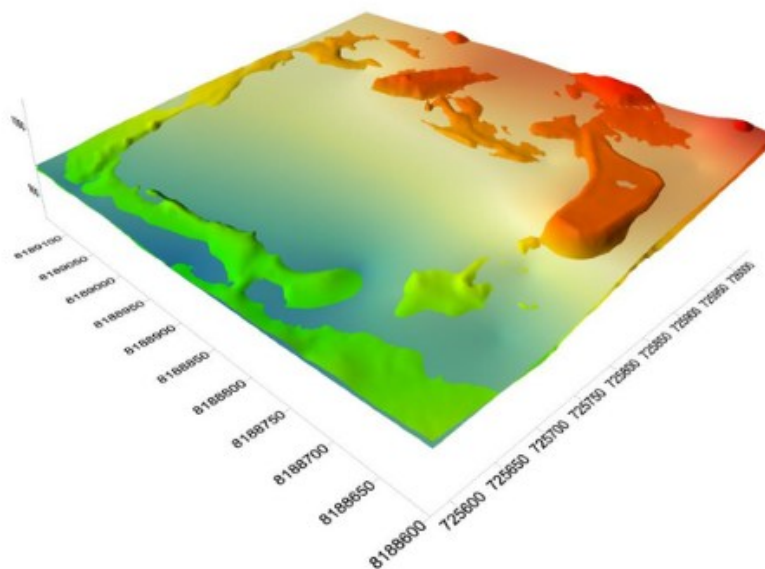


Figura 13 – Sobreposição da superfície interpolada com modelo digital de elevação do levantamento com UAS – Software Surfer.
 Fonte: Autores (2024).

3.1 Análise Comparativa de Volumes

Os relatórios gerados pelo software *Surfer* (Apêndice I) permitiram a obtenção de comparativos de volumes, evidenciando a proximidade entre os resultados obtidos pelo levantamento topográfico convencional e aqueles gerados pelo levantamento com UAS. Essa análise reforça a confiabilidade e a precisão do levantamento por UAS como uma alternativa viável e eficaz.

Inicialmente, foram calculados os volumes de aterro para a cota arbitrada de 1000, cabe destacar que a cota arbitrada foi utilizada como um recurso metodológico para padronizar a superfície de cálculo no *Surfer*, permitindo uma comparação direta entre os dois modelos.

Em uma segunda análise comparativa, foram utilizadas superfícies interpoladas, que representam modelos mais próximos das condições originais do terreno. Essa abordagem apresentou resultados mais práticos em relação à metodologia baseada na cota arbitrada de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação de Volumes Obtidos por Levantamento Topográfico Convencional e Levantamento por UAS.

Comparação de Volumes Obtidos				
Análise Comparativa	Levantamento Topográfico Convencional	Levantamento por UAS	Diferença Absoluta (m³)	Percentual Relativo (%)
Volume de Aterro (m³)	5.269.099,27	5.275.239,31	6.140	0,10%
Volume com Superfícies Interpoladas (m³)	2.593.055,26	2.598.952,42	5.897,16	0,22%
Volume de Corte (Planta Cadastral) (m³)	2.117.824,30	-	-	-

Fonte: Autores (2024).

A diferença relativa de 0,22% entre os volumes calculados pela topografia convencional e pelo levantamento com UAS situa-se entre resultados compatíveis reportados na literatura para ambientes de mineração a céu aberto. Para efeito de comparação, Mora et al. (2020) encontraram diferenças inferiores a 2% ao comparar UAS com TLS em pilhas de estoque de pequena área (345 m²). Ajayi e Ajulo (2021) reportaram erro de 2,3% entre volume estimado por UAS e volume real de moagem, enquanto Kokamägi et al. (2020) obtiveram variações de 1% a 6% dependendo do número de pontos de controle utilizados. Em contrapartida, Kuinkel et al. (2023) encontraram erros da ordem de 11,9% para pilhas muito pequenas (0,14 m³) e ausência de GCPs, o que reforça a importância da estratégia de controle adotada neste estudo (20 GCPs bem distribuídos). A Tabela 5 sintetiza esses resultados comparativos.

Tabela 5 – de Resultados Comparativos.

Resultados Comparativos			
Estudo	Método comparado	Erro volumétrico	Área/contexto
Presente estudo	UAS vs. topografia	0,22%	Pedreira (25 ha)
Mora et al. (2020)	UAS vs. TLS	< 2%	3 pilhas (345 m²)
Ajayi & Ajulo (2021)	UAS vs. moagem real	2,3%	Pilha de estoque
Kokamägi et al. (2020)	UAS vs. TLS/GNSS	1% – 6%	Pilhas diversas
Kuinkel et al. (2023)	UAS vs. peso	11,9%	Pilha muito pequena

Fonte: Autores (2024).

É interessante observar que, ao utilizar como referência a planta cadastral de junho de 2024, a qual se aferiu um volume de corte de 2.117.824,30 m³. Comparando-se com os volumes na ordem de 2,6 milhões de metros cúbicos obtidos nos levantamentos analisados, pode-se inferir que os valores são possivelmente razoáveis e coerentes com a realidade, considerando que, ao longo dos três meses subsequentes ao levantamento cadastral, houve provavelmente extrações adicionais na jazida. Isso resultaria em um aumento no volume total de corte existente.

A metodologia proposta apresenta, portanto, um grande potencial para o acompanhamento periódico da pedreira, possibilitando o monitoramento contínuo dos volumes extraídos. Além disso, destaca-se como uma solução inicial

promissora para aproximar a superfície primitiva do terreno, especialmente em situações em que a superfície real não está disponível ou quando não foi realizado um levantamento topográfico à época.

Ao contrário do estudo realizado por Molnar & Domizi (2016), este trabalho não incluiu a obtenção da superfície primitiva do terreno da pedreira, o que impossibilitou a validação direta e a comparação precisa com os resultados apresentados. Nesse contexto, identifica-se como um próximo passo essencial para o aprimoramento deste estudo a obtenção dessa superfície, permitindo uma análise comparativa mais detalhada e em conformidade com a abordagem utilizada por Molnar Domizi, conforme ilustrado na figura abaixo.

Tabela 6 – Molnar; Domozi, [2016], P.[158].

TABELA MOLNAR; DOMOZI, [2016]

-	VOLUME
Original mine model	~32200 m ³
With covering surface moved to the left	~31500 m ³
With covering surface moved to the right	~37200 m ³
Rotated covering surface 1.	~36100 m ³
Rotated covering surface 1.	~41300 m ³

Fonte: MOLNAR; DOMOZI (2016).

A tabela apresentada evidencia uma discrepância em alguns modelos propostos pelo autor. Nesse sentido, é possível observar que o modelo baseado no algoritmo de Delaunay ainda pode ser aprimorado. A proposta deste estudo poderia preencher essa lacuna, considerando que o software *Surfer* oferece superfícies mais suavizadas, como demonstrado nas figuras 10 e 11.

Adicionalmente, ressalta-se uma problemática apontada pelos autores Molnar & Domizi, relacionada a erros causados por sobreposição e interseção de "faces/triângulos". Essa limitação, em teoria, pode ser mitigada pela metodologia proposta neste trabalho, que busca superar tais desafios e proporcionar resultados mais precisos.

3.2 Pontos de controle

Antes da utilização dos pontos de controle terrestre (GCPs), os erros estimados no modelo apresentavam valores significativamente elevados, especialmente nas coordenadas horizontais e verticais, comprometendo a precisão do levantamento. Com a inclusão dos GCPs e o subsequente processo de ajuste (*bundle adjustment*), os erros foram substancialmente reduzidos. Após o processamento, o erro médio nas coordenadas horizontais (X e Y) foi de 1,18819 m e 2,50389 m, respectivamente, resultando em um erro combinado XY de 2,7715 m. Na coordenada Z (altitude), o erro médio permaneceu mais elevado, atingindo 19,5297 m, contribuindo para um erro total de 19,7253 m.

Após o processamento com pontos de controle, os resultados do levantamento demonstraram uma boa precisão geral, com erro quadrático médio total (RMSE) de 9,68 mm, sendo o erro médio em X de 7,04 mm, em Y de 6,02 mm e em Z de 2,82 mm. A distribuição dos GCPs revelou uma maior concentração na área central, que coincidiu com os menores valores de erro. Em contrapartida, observou-se que pontos localizados em regiões com maior variação topográfica, como os pontos 6, 8 e 12, situados na periferia da jazida, apresentaram erros mais elevados, especialmente na coordenada Z. Essa variação pode estar associada à influência da topografia sobre a precisão do modelo. Apesar disso, os erros obtidos encontram-se dentro de limites aceitáveis descritos na literatura. Conforme Deliry e Avdan (2021), análises quantitativas apontam que o RMSE vertical predominante varia entre 0,04 e 0,06 m, atendendo ao padrão de mapeamento Classe 3 da ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2014). Os autores ressaltam que essas precisões são adequadas para diversas aplicações de engenharia e GIS, reforçando a qualidade do levantamento realizado. Esses resultados destacam, ainda, a importância dos GCPs para melhorar a precisão geral do modelo.

Cabe reconhecer uma limitação metodológica neste estudo: todos os 20 Pontos de Controle no Solo (GCPs) foram utilizados no ajustamento do modelo fotogramétrico (*bundle adjustment*), não tendo sido reservados pontos de verificação independentes (*check points*) para validação da acurácia real do modelo. Conforme demonstrado por Sanz-Abianedo et al. (2018), a avaliação da precisão apenas pelos resíduos dos próprios GCPs pode superestimar a qualidade do produto, pois o modelo se deforma para se ajustar a esses pontos, podendo mascarar erros como a formação de uma superfície tipo

"cúpula" (dome effect) em áreas afastadas dos pontos de controle. Os autores mostram que, com poucos GCPs (10–20), o RMSE calculado nos pontos de verificação pode ser até 5 vezes maior que o indicado pelos resíduos dos GCPs. No presente estudo, os RMSE obtidos para os GCPs foram da ordem de milímetros (Tabela 3), o que reflete a qualidade do ajuste interno, mas não necessariamente a acurácia absoluta do modelo em toda a extensão da jazida.

A decisão de não reservar pontos de verificação deveu-se a restrições operacionais em campo (área de mineração ativa, risco à equipe e tempo disponível) e ao fato de que o objetivo principal do trabalho era a comparação relativa entre os dois métodos (topografia convencional vs. UAS) aplicando os mesmos pontos de interpolação e a mesma metodologia de cálculo de volumes. Para essa finalidade, a consistência entre os métodos, evidenciada pela diferença de apenas 0,22% nos volumes com superfícies interpoladas, não é invalidada pela ausência de pontos, uma vez que ambos os levantamentos compartilham o mesmo sistema de referência e os mesmos pontos de controle.

Estudos futuros devem incorporar um conjunto de pontos de verificação independentes, medidos com GNSS RTK, para quantificar a acurácia real do modelo gerado por UAS, seguindo as recomendações de Sanz-Ablanedo et al. (2018)

4. Discussão

4.1 Limitações metodológicas e fontes de erro

A metodologia de avaliação de precisão adotada neste estudo, que utilizou todos os GCPs no ajustamento do modelo e não incluiu pontos independentes de verificação (check points), apresenta uma limitação inerente. Conforme destacado por Thammaboribal (2026), a ausência de check points independentes pode levar a uma superestimação da acurácia absoluta do modelo, uma vez que os erros reportados (e.g., RMSE dos GCPs) refletem a consistência interna do ajustamento, mas não necessariamente a precisão em relação a um conjunto de dados de referência totalmente independente. Embora essa escolha metodológica não invalide a comparação relativa entre os métodos de levantamento (UAS vs. convencional), é crucial reconhecer que a acurácia absoluta do modelo em toda a extensão da área de estudo pode ser maior do que a indicada pelos RMSEs dos GCPs. Futuros estudos poderiam mitigar essa limitação através da implementação de uma estratégia de check points independentes, conforme as diretrizes de avaliação de acurácia cartográfica.

A análise comparativa de volumes revelou uma diferença relativa de 0,22% entre os métodos de topografia convencional e UAS, um resultado que se alinha com a literatura para ambientes de mineração a céu aberto. Por exemplo, (YİĞİT ŞENOL 2025) quantificaram mudanças volumétricas em pedreiras ativas, demonstrando a capacidade da fotogrametria por UAV para monitoramento preciso. No entanto, é fundamental discutir as possíveis fontes de erro e limitações metodológicas que podem influenciar esses resultados. A subjetividade na seleção dos 30 pontos para a interpolação da superfície primitiva e a escolha do modelo de semivariograma na Krigagem (linear, neste caso) podem introduzir variações na estimativa da superfície original. Além disso, a ausência de check points independentes, como discutido anteriormente, impede uma validação robusta da acurácia absoluta, o que deve ser considerado na interpretação dos volumes calculados. Futuras investigações poderiam explorar a integração de tecnologias complementares, como sistemas LiDAR baseados em UAV, que, embora com diferentes características de acurácia (URBAN et al., 2025), podem oferecer vantagens em cenários específicos, como áreas com vegetação densa ou para segmentação avançada de nuvens de pontos em terrenos escalonados. Adicionalmente, o uso de abordagens mais avançadas para a reconstrução de superfícies primitivas, como técnicas baseadas em aprendizado de máquina e campos de radiação neural, representa uma promissora via para otimizar a precisão e a automação.

4.2 Comparação com estudos da literatura

Os resultados obtidos neste estudo estão alinhados com as conclusões de Raza et al. (2023), que compararam múltiplos interpoladores para modelagem de terreno em mineração. Os autores observaram que a escolha do interpolador impacta diretamente o MDE final, e que para conjuntos de dados com alta densidade amostral o método do vizinho natural apresentou o melhor desempenho ($R = 0,969$). No presente estudo, embora a densidade de pontos da nuvem fotogramétrica seja alta (28 milhões de pontos), a reconstrução da superfície primitiva exigiu o uso de apenas 30 pontos amostrais, justificando a opção pela Krigagem.

Zarychta et al. (2020), em estudo sobre a reconstrução da morfologia pré-extração da Pedreira Liban (Polônia), utilizaram a Krigagem Ordinária a partir de dados de mapas topográficos e obtiveram erros de estimativa (SDOK) inferiores a 0,51 m. Embora a magnitude do erro seja diferente devido às escalas e fontes de dados distintas, a abordagem

metodológica é análoga à adotada neste trabalho, validando a escolha da Krigagem para fins de reconstrução de superfícies primitivas.

Em relação à acurácia posicional, Deliry e Avdan (2021) compilaram diversos estudos e reportaram que o RMSE vertical predominante em levantamentos com UAS varia entre 0,04 e 0,06 m, atendendo ao padrão Classe 3 da ASPRS. Os valores obtidos para os GCPs neste estudo (RMSE Z = 2,81 mm) são inferiores a essa faixa, o que indica boa qualidade do ajuste interno. Contudo, conforme discutido, a ausência de check points impede a comparação direta com os valores da literatura para acurácia absoluta.

O estudo de Molnar & Domizi (2016), embora tenha proposto a reconstrução de superfícies a partir de imagens de UAS, apresentou limitações relacionadas à sobreposição e interseção de faces triangulares. A metodologia aqui proposta, baseada em Krigagem com superfícies suavizadas, conforme evidenciado pelas figuras 10 e 11.

4.3 Melhorias e perspectivas para estudos futuros

No estudo apresentado, a inserção manual de pontos para interpolação, visando estimar a superfície primitiva, foi realizada no software Surfer. Essa abordagem, embora funcional, representa um gargalo no processo, especialmente quando se busca maior eficiência e redução de tempo. Nesse sentido, seria interessante desenvolver algoritmos capazes de realizar o reconhecimento automático dos contornos dessas áreas em aterros e cortes, identificando as bordas de interesse de maneira automatizada.

É importante destacar que o estudo de Jiang et al. (2022) demonstrou a identificação automatizada de empilhamentos e resíduos sólidos, indicando um caminho promissor. No entanto, compreende-se que os desafios são maiores para casos de materiais homogêneos, como aterros e cortes, onde as delimitações podem ser menos evidentes para ferramentas baseadas em *machine learning*.

Dessa forma, uma sugestão para o aprimoramento da metodologia apresentada é a investigação de técnicas automatizadas que utilizem algoritmos de *machine learning* para identificar contornos e áreas de interesse em aterros, empilhamentos e cortes. Tais algoritmos poderiam ser desenvolvidos para lidar com materiais homogêneos, contribuindo para maior precisão e eficiência no cálculo de volumes.

Outro ponto de melhoria seria a obtenção, junto à pedreira de Anápolis, da superfície primitiva do terreno antes de qualquer escavação, possibilitando uma comparação direta com o modelo interpolado em termos de aproximação realística do terreno. Além disso, seria relevante testar a metodologia proposta em diferentes cenários, bem como variar os parâmetros de interpolação ou empregar outros modelos. Esse procedimento permitiria uma calibração mais precisa, aproximando ainda mais os resultados da realidade topográfica do terreno original.

5. Considerações Finais

Este estudo apresentou uma metodologia para o cálculo de volumes utilizando UAS, softwares QGIS e Surfer. Comparando-a com o método tradicional baseado em levantamentos topográficos. Os resultados demonstraram que o uso de UAS pode proporcionar benefícios significativos, como maior praticidade, redução de tempo de execução e maior densidade de dados, permitindo análises mais detalhadas. A integração com softwares como QGIS e Agisoft Metashape reforçou a eficiência do processo, destacando a capacidade dos UAS de atender às demandas de projetos de engenharia.

Embora a metodologia proposta tenha apresentado precisão, especialmente com o uso de Pontos de Controle Terrestre (GCPs), desafios como a identificação automática de contornos e a modelagem de superfícies primitivas para materiais homogêneos ainda precisam ser superados. Estudos futuros devem explorar o desenvolvimento de algoritmos de *machine learning* e *deep learning* para automatizar essas etapas, otimizando ainda mais o processo e ampliando suas aplicações.

como uma ferramenta moderna e eficiente para levantamentos volumétricos em projetos de engenharia, contribuindo para práticas mais seguras, rápidas e precisas em comparação aos métodos tradicionais.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Sr. José Garcia de Andrade Neto, pela colaboração, em parceria com a empresa Pedreira Anápolis, no fornecimento dos dados necessários para as análises e o processamento realizados neste estudo. Sua contribuição foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, que visa gerar resultados significativos para a comunidade acadêmica e contribuir para o avanço do conhecimento na área.

Referências

- ALSAYED, Ahmad; NABAWY, Mostafa R. A. Stockpile volume estimation in open and confined environments: A review. *Drones*, v. 7, n. 8, p. 537, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones7080537>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CHEN, Tao *et al.* E-L 0: Advanced surface segmentation of LiDAR point clouds in open-pit mine stepped terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 18, p. 19176–19190, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- DELIRY, Sayed Ishaq; AVDAN, Ugur. Accuracy of Unmanned Aerial Systems Photogrammetry and Structure from Motion in Surveying and Mapping: A Review. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 49, n. 4, p. 919–937, abr. 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/350595130>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- DUARTE, Francisco Kleber Dantas; DA COSTA, Franklin Roberto. Altimetria e planimetria, análise de métodos fotogramétricos por VANT versus topografia convencional. *Revista Pensar Geografia*, v. 7, n. 1, p. e7202302, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/pensargeo.2023.15340>. Acesso em: 09 abr. 2026.
- GE, Yingwei *et al.* 3D reconstruction of ancient buildings using UAV images and neural radiation field with depth supervision. *Remote Sensing*, v. 16, n. 3, p. 473, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16030473>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- JIANG, Yuhan *et al.* Automatic Volume Calculation and Mapping of Construction and Demolition Debris Using Drones, Deep Learning, and GIS. *Drones*, v. 6, n. 10, p. 279, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones6100279>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- MAI, Gengchen *et al.* Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 136, 104368, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368>. Acesso em: 09 abr. 2026.
- MANDLBURGER, G.; OTEPKA, J.; KAREL, W. UAV-Based LiDAR for Very High-Resolution DEM Generation. *Remote Sensing*, v. 8, n. 12, p. 849, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8100849>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- MOHD, F. *et al.* Volume Estimation of Stockpile Using Unmanned Aerial Vehicle. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL SYSTEM, COMPUTING AND ENGINEERING (ICCSCE), 9., 2019, Penang. Proceedings [...]. Penang: IEEE, 2019. p. 1-6. Acesso em: 20 nov. 2024.
- MOLNAR, Andras; DOMOZI, Zsolt. Volume analysis of surface formations on the basis of aerial photographs taken by drones. *International Journal of Signal Processing*, [s. l.], 2024. Disponível em: <http://iaras.org/iaras/journals/ijsp>. Acesso em: 07 dez. 2024.
- RAZAS, M. A. *et al.* A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 123, n. 2, p. 53–62, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1715/2023>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- THAMMABORIBAL, P. Comparative study of UAV mapping with and without Ground Control Points (GCPs). *International Journal of Geoinformatics*, v. 22, n. 50, p. 36, 2026. Disponível em: <https://journals.sfu.ca/ijg>. Acesso em: 20 abr. 2026.
- URBAN, Rudolf *et al.* Testing the accuracy and characteristics of data acquired using DJI Zenmuse L1 and L2 lidar systems and photogrammetric data acquired using DJI Zenmuse P1 in a quarry environment. *European Journal of Remote Sensing*, v. 58, n. 1, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2025.2458921>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- VOSSELMAN, G.; MAAS, H. G. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Boca Raton: CRC Press, 2010.

-
- YIĞIT, Abdurahman Yasin; ŞENOL, Halil İbrahim. Surface change and stability analysis in open-pit mines using UAV photogrammetric data and geospatial analysis. *Drones*, v. 9, n. 7, p. 472, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones9070472>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- ZARYCHTA, Roksana; ZARYCHTA, Adrian; BZDEGA, Katarzyna. Progress in the reconstruction of terrain relief before extraction of rock materials—the case of Liban Quarry, Poland. *Remote Sensing*, v. 12, n. 10, p. 1548, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12101548>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- ZHANG, Geng *et al.* Nickel grade inversion of lateritic nickel ore using WorldView-3 data incorporating geospatial location information: A case study of North Konawe, Indonesia. *Remote Sensing*, v. 15, n. 14, p. 3660, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15143660>. Acesso em: 09 abr. 2026.