

Modelo digital de terreno gerado por fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas aplicado a projetos de terraplenagem: precisão e viabilidade econômica

Digital terrain model generated by unmanned aerial vehicle photogrammetry applied to earthwork projects: accuracy and economic viability

Gustavo da Luz Facchini¹

Pedro Thiago Venzon²

RESUMO

A terraplenagem constitui uma das etapas mais dispendiosas e sensíveis a erros em obras de engenharia civil, dependendo diretamente da qualidade do levantamento topográfico que fundamenta o cálculo dos volumes de corte e aterro. Nas últimas duas décadas, a fotogrametria digital realizada por Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) consolidou-se como alternativa aos métodos convencionais de levantamento, por permitir a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) estruturados em malhas triangulares irregulares (TIN) com alta densidade de pontos em curto intervalo de tempo. Diante disso, este artigo teve como objetivo analisar, por meio de revisão integrativa da literatura técnico-científica nacional e internacional, a precisão altimétrica e planimétrica dos MDT gerados por RPA e sua viabilidade econômica quando comparados à topografia convencional (estação total e GNSS/RTK) em projetos de terraplenagem. A pesquisa, de natureza bibliográfica e abordagem qualitativa com síntese quantitativa de dados secundários, reuniu estudos publicados entre 2016 e 2024 em periódicos e repositórios institucionais brasileiros e latino-americanos, avaliados à luz do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), instituído pelo Decreto nº 89.817/1984. Os resultados indicam que levantamentos aerofotogramétricos com RPA, quando apoiados por pontos de controle GNSS, atingem classificação Classe A ou B do

¹ Acadêmico de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE, Brusque – SC – Brasil.

² Mestre, Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, Brusque – SC – Brasil.

PEC-PCD em escalas de 1:1.000 a 1:2.000, com tempo de execução em campo até três vezes menor que o da estação total, e custos operacionais inferiores em projetos de médio e grande porte, ainda que o investimento inicial em equipamento e capacitação permaneça como barreira de adoção para pequenas empresas. Conclui-se que a integração entre MDT gerado por RPA e plataformas de modelagem BIM, como o Autodesk Civil 3D, representam alternativa tecnicamente robusta e economicamente vantajosa para o cálculo volumétrico em terraplenagem, desde que respeitados os procedimentos de georreferenciamento e controle de qualidade cartográfica.

Palavras-chave: Fotogrametria com drone; Modelo Digital de Terreno; Terraplenagem; Aeronave Remotamente Pilotada; Precisão cartográfica.

ABSTRACT

Earthwork is one of the most cost-sensitive and error-prone stages of civil engineering projects, depending directly on the quality of the topographic survey used to compute cut and fill volumes. Over the last two decades, digital photogrammetry performed with Unmanned Aerial Vehicles (UAV/RPA) has become established as an alternative to conventional surveying methods, enabling the generation of Digital Terrain Models (DTM) structured as Triangulated Irregular Networks (TIN) with high point density in a short time span. This article aimed to analyze, through an integrative review of national and international technical scientific literature, the vertical and horizontal accuracy of UAV-derived DTM and their economic viability compared to conventional topography (total station and GNSS/RTK) in earthwork projects. The bibliographic, qualitative research with quantitative synthesis of secondary data gathered studies published between 2016 and 2024 in Brazilian and Latin American journals and institutional repositories, evaluated against the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD), established by Decree No. 89.817/1984. Results indicate that UAV aerophotogrammetric surveys, when supported by GNSS ground control points, reach Class A or B of the PEC-PCD at scales of 1:1,000 to 1:2,000, with field execution time up to three times shorter than total station surveys, and lower operational costs in medium and large projects, although the initial investment in equipment and training remains a barrier for small companies. It is concluded that integrating UAV derived DTM with BIM modeling platforms, such as Autodesk Civil 3D, represents a technically robust and economically advantageous alternative for volumetric earthwork

calculation, provided that georeferencing procedures and cartographic quality control are observed.

Keywords: Drone photogrammetry; Digital Terrain Model; Earthwork; Unmanned Aerial Vehicle; Cartographic accuracy.

1 Introdução

"É fundamental o prévio levantamento topográfico do local onde se implantará qualquer obra de engenharia, arquitetura ou agronomia" (ESPARTEL, 1987, p. 15). Essa afirmação, formulada por um dos autores clássicos da topografia brasileira, permanece atual: a terraplenagem, entendida como o conjunto de operações de escavação, transporte, compactação e acomodação de solo necessárias à conformação do terreno em obras civis, depende diretamente da qualidade e da atualidade dos dados topográficos que alimentam o projeto.

Tradicionalmente, o levantamento planialtimétrico necessário ao dimensionamento de plataformas, taludes e vias é realizado por meio de estação total ou receptores GNSS operando em modo estático ou RTK (Real Time Kinematic). Ambos os métodos oferecem elevada precisão pontual, porém demandam deslocamento físico do operador a cada ponto de interesse, o que eleva o tempo de execução e o custo de mão de obra em áreas extensas, acidentadas ou de difícil acesso (DUARTE; COSTA, 2023).

Nas últimas duas décadas, a popularização das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), popularmente chamadas de drones, associada ao amadurecimento de algoritmos de Structure from Motion (SfM), tornou viável a geração de nuvens de pontos densas a partir de fotografias aéreas sobrepostas, dando origem a Modelos Digitais de Terreno (MDT) estruturados como malhas triangulares irregulares, ou TIN (Triangulated Irregular Network). Del Río Santana et al. (2020) destacam que a fotogrametria por drone reduz substancialmente o tempo de campo em relação ao levantamento tradicional, sem prejuízo relevante da exatidão posicional, quando observados os procedimentos adequados de aerotriangulação e apoio terrestre.

Entretanto, a adoção de RPA em projetos de terraplenagem levanta questões que ainda não estão plenamente consolidadas na literatura técnica nacional: qual a real acurácia altimétrica desses modelos frente aos padrões oficiais de exatidão cartográfica brasileiros, e em que medida o investimento em equipamento, licenciamento e processamento se traduz em vantagem econômica frente aos métodos convencionais, especialmente quando o produto final

alimenta diretamente softwares de modelagem BIM, como o Autodesk Civil 3D, para o cálculo volumétrico de corte e aterro.

Diante desse cenário, o problema de pesquisa que orienta este artigo pode ser formulado da seguinte maneira: os Modelos Digitais de Terreno gerados por fotogrametria com RPA atendem aos padrões nacionais de exatidão cartográfica exigidos em projetos de terraplenagem, e sua adoção é economicamente viável frente aos métodos topográficos convencionais? O objetivo geral do trabalho é analisar, por meio de revisão integrativa da literatura, a precisão e a viabilidade econômica do uso de MDT gerados por RPA em projetos de terraplenagem, comparando-os aos levantamentos por estação total e GNSS. Como objetivos específicos, buscou-se: (i) descrever o fluxo metodológico de geração de MDT via fotogrametria digital; (ii) sistematizar os critérios de exatidão cartográfica aplicáveis a produtos digitais no Brasil; e (iii) sintetizar evidências empíricas publicadas sobre custo, tempo e precisão dos três métodos investigados.

O artigo está estruturado em cinco seções, além desta introdução: a seção 2 apresenta a revisão da literatura sobre levantamento topográfico convencional, fotogrametria com RPA, normas de exatidão cartográfica e cálculo de volumes em plataformas BIM; a seção 3 descreve o percurso metodológico adotado; a seção 4 apresenta e discute os resultados sintetizados a partir dos estudos analisados; e a seção 5 traz as considerações finais do trabalho.

2 Revisão da Literatura

2.1 Levantamento topográfico convencional e a evolução tecnológica

A topografia clássica define-se como a ciência aplicada que tem por objetivo determinar a posição relativa ou absoluta de pontos sobre a superfície terrestre, representando-os em plantas ou modelos numéricos (ESPARTEL, 1987). Durante décadas, a estação total constituiu o principal instrumento de campo para levantamentos planialtimétricos de precisão, permitindo a obtenção simultânea de ângulos e distâncias com erro milimétrico. Segundo Jeronymo et al. (2015 apud MACKENZIE, 2021), a estação total continua sendo o método de referência para pequenas áreas com alta exigência de exatidão, embora demande tempo elevado de operação em campo.

O advento do GNSS (Global Navigation Satellite System) com correção RTK trouxe ganhos significativos de produtividade, ao dispensar a intervisibilidade entre pontos e permitir

o posicionamento direto do bastão receptor sobre o alvo. Ainda assim, como apontam del Río Santana et al. (2020), o GNSS/RTK apresenta limitações em áreas com obstrução de sinal satelital, como regiões arborizadas ou de relevo acidentado, cenário em que a fotogrametria aérea desponta como alternativa complementar.

2.2 Fotogrametria digital com RPA e geração de MDT/TIN

A fotogrametria é definida etimologicamente como a ciência das medições realizadas a partir de fotografias, permitindo reconstruir a geometria tridimensional de um objeto ou superfície a partir de imagens sobrepostas (JERONIMO DE ALMEIDA NETO; RAMOS, 2023). Com a integração de sensores RPA, câmeras de alta resolução e algoritmos de Structure from Motion, tornou-se possível gerar, a partir de um voo aut nomo programado, uma nuvem de pontos densa da superfície sobrevoada, da qual deriva o Modelo Digital de Terreno.

O MDT resultante é normalmente estruturado como uma malha TIN, na qual os pontos amostrados são conectados por triângulos irregulares que se ajustam   variação natural do relevo, produzindo maior fidelidade em áreas de alta declividade quando comparado a modelos do tipo grade regular (raster). Silva et al. (2016) demonstraram, em estudo publicado no Boletim de Ciências Geodésicas, que MDT gerados a partir de levantamento por RPA apresentaram acurácia superior aos modelos obtidos por GNSS e por LiDAR terrestre no cálculo de volume de uma pilha de rejeito de mineração, sendo o levantamento aéreo o que melhor reproduziu a geometria real da pilha.

No que se refere especificamente a projetos de terraplenagem, Tasso Junior (2024), em trabalho desenvolvido na Universidade Federal do Amazonas, comparou o cálculo de volume de corte e aterro obtido por reconstrução computacional de superfície a partir de levantamento aerofotogramétrico por RPA associado a receptor GNSS, concluindo que o método aerofotogramétrico constitui alternativa menos custosa e mais ágil que o controle volumétrico realizado exclusivamente por topografia tradicional, sem perda relevante de confiabilidade para o acompanhamento de obra.

Já Oliveira (2020), em análise da acurácia de levantamentos por VANT desenvolvida no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, ressalta que a exatidão dos produtos gerados depende fortemente da distribuição e da quantidade de pontos de controle terrestre utilizados na aerotriangulação, de modo que a ausência ou insuficiência desses pontos pode comprometer a classificação do produto cartográfico final,

independentemente da resolução da câmera embarcada.

2.3 Padrões de exatidão cartográfica aplicados a produtos digitais (PEC-PCD)

No Brasil, a avaliação da qualidade posicional de produtos cartográficos é normatizada pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que instituiu as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional e definiu o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), posteriormente adaptado para produtos digitais na forma do PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais), conforme a Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais — ET-ADGV (DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO, 2016).

De acordo com esse normativo, noventa por cento dos pontos bem definidos em uma carta, quando testados em campo, não devem apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfico estabelecido para a escala do produto, sendo o erro-padrão isolado limitado a 60,8% desse valor (DECRETO Nº 89.817, 1984). A Tabela 1 sintetiza as classes de exatidão altimétrica previstas para Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Superfície (MDS) e para pontos cotados, segundo o ET-ADGV, valores esses adaptados dos estudos de Merchant (1982) e da American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (apud DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO, 2016).

Tabela 1 – Classes do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) aplicáveis a MDT

Classe (PEC-PCD)	Equidistância de curvas	PEC altimétrico	Erro-Padrão (EP)
A	1 m	$0,27 \times \text{equidistância}$	$1/6 \times \text{equidistância}$
B	1 m	$1/2 \times \text{equidistância}$	$1/3 \times \text{equidistância}$
C	2 m	$3/5 \times \text{equidistância}$	$2/5 \times \text{equidistância}$

Fonte: elaborado pelos autores com base no Decreto nº 89.817 (1984) e Diretoria de Serviço Geográfico (2016).

Teixeira et al. (2023), ao avaliarem a acurácia altimétrica de levantamentos urbanos executados com RPA à luz do Decreto nº 89.817/1984, classificaram os produtos gerados como pertencentes à Classe C, na escala 1:1.000 e equidistância de curvas de nível de dois metros, ressaltando a importância da checagem de campo com pontos de controle independentes para validar a classificação obtida — procedimento que os autores descrevem como indispensável para conferir credibilidade técnica ao levantamento perante órgãos fiscalizadores e contratantes.

2.4 Cálculo de volumes de terraplenagem e ferramentas BIM

O cálculo do volume de terraplenagem pode ser realizado por diferentes métodos, entre os quais se destacam o método das seções transversais, tradicionalmente empregado em obras lineares, e o método das superfícies TIN, no qual o volume é obtido pela diferença de cotas entre duas malhas triangulares sobrepostas — a do terreno natural e a do projeto (VEIGA, 2007). Enquanto o primeiro método depende da interpolação entre seções espaçadas, o segundo aproveita toda a densidade de pontos capturados pelo levantamento, reduzindo o erro de interpolação em terrenos de topografia irregular.

Macedo, Oliveira e Prado (2019), em estudo desenvolvido na Universidade de Rio Verde, compararam o cálculo de volume de plataformas de terraplenagem realizado no AutoCAD convencional, por meio do método das alturas ponderadas, com o cálculo automatizado obtido no Autodesk Civil 3D a partir de superfícies MDT. Os autores concluíram que a plataforma BIM reduz significativamente o tempo de processamento e a possibilidade de erro humano, uma vez que o software realiza o cálculo de forma automática a partir da cota média informada, ao passo que o processo manual exige o cálculo prévio da cota de equilíbrio entre corte e aterro.

Este trabalho teve por objetivo demonstrar a importância da ferramenta BIM (Civil 3D) aplicada em projetos topográficos onde se faz o cálculo do volume de camadas de solo, criando um platô e equilibrando corte e aterro [...] o cenário atual aponta para um crescimento do uso dessa metodologia no setor para os próximos anos, visto que órgãos públicos do país passarão a exigir que as propostas em processos licitatórios sejam elaboradas com o uso do BIM. (MACEDO; OLIVEIRA; PRADO, 2019, p. 1- 2)

A integração entre o MDT gerado por fotogrametria e o ambiente Civil 3D permite, ainda, a criação de superfícies de referência (datum surfaces) e a geração automática de relatórios de composição de volumes por faixas de cota, recurso amplamente utilizado para o controle de execução de plataformas industriais, loteamentos e obras rodoviárias.

2.5 Viabilidade econômica do uso de RPA em levantamentos topográficos

Do ponto de vista econômico, a literatura converge para a percepção de que o levantamento com RPA reduz o tempo de mobilização de equipe em campo, item que representa parcela expressiva do custo total de um levantamento topográfico convencional. Del Río Santana et al. (2020) observam que, embora o investimento inicial em equipamento fotogramétrico e em softwares de processamento fotogramétrico seja considerável, o retorno sobre esse investimento se dá rapidamente em empresas que executam levantamentos de forma recorrente, dado o menor custo marginal por hectare levantado.

Por outro lado, Duarte e Costa (2023) alertam que a comparação de custos não pode desconsiderar variáveis como a necessidade de licenciamento da aeronave junto à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a capacitação do operador e o custo de licenças de software de processamento fotogramétrico e de modelagem BIM, fatores que, para operações pontuais ou de pequeno porte, podem tornar o método convencional ainda competitivo em termos de custo-benefício. Essa ressalva é relevante para a presente pesquisa, na medida em que evidencia que a viabilidade econômica do uso de RPA é sensível à escala e à recorrência do serviço prestado, e não deve ser tomada como vantagem universal e incondicional.

3 Metodologia

Esta pesquisa possui natureza aplicada e abordagem qualitativa, com síntese quantitativa de dados secundários, caracterizando-se como uma revisão integrativa da literatura (WHITTEMORE; KNAFL, 2005), método que permite reunir e analisar de forma sistemática estudos de diferentes desenhos metodológicos — trabalhos de conclusão de curso, artigos publicados em periódicos científicos e documentos normativos oficiais — sobre um mesmo objeto de investigação.

O levantamento bibliográfico foi realizado nas bases Google Acadêmico, SciELO, Portal de Periódicos da CAPES e em repositórios institucionais de universidades brasileiras e latino-americanas (Universidade Federal do Amazonas, Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal de Goiás, Universidade de Rio Verde, Universidade Federal do Ceará, Universidad Juárez del Estado de Durango, entre outras), utilizando os descritores 'fotogrametria com drone', 'RPA terraplenagem', 'modelo digital de terreno', 'TIN volume corte aterro' e suas variantes em português, inglês e espanhol, combinados por meio de operadores booleanos.

Foram incluídos estudos publicados entre 2015 e 2024 que apresentassem, no mínimo, um dos seguintes elementos: (i) comparação empírica entre métodos de levantamento topográfico quanto a tempo, custo ou precisão; (ii) avaliação da acurácia de MDT ou MDS gerados por RPA frente a padrões oficiais de exatidão cartográfica; ou (iii) aplicação de superfícies TIN no cálculo de volumes de terraplenagem em ambiente BIM. Foram excluídos textos sem indicação clara de autoria, ano ou veículo de publicação, bem como conteúdos exclusivamente comerciais sem base técnica ou acadêmica verificável.

A análise dos estudos selecionados seguiu três eixos: (a) sistematização dos critérios

normativos de exatidão cartográfica aplicáveis a produtos digitais no Brasil, com base no Decreto nº 89.817/1984 e na ET-ADGV (2016); (b) extração de dados quantitativos relatados pelos próprios autores acerca de tempo de execução, custo relativo e classificação de exatidão alcançada pelos métodos comparados; e (c) discussão qualitativa das vantagens, limitações e condicionantes de adoção do MDT por RPA em projetos de terraplenagem, à luz do referencial teórico reunido na seção 2.

É importante destacar que os dados numéricos apresentados na seção 4 correspondem a valores relatados nos próprios estudos originais consultados, e não a medições primárias realizadas pelos autores deste artigo, o que caracteriza a pesquisa como estritamente documental e bibliográfica. A Figura 1 sintetiza o fluxo metodológico típico de geração de MDT por fotogrametria com RPA e sua utilização no cálculo de volumes, tal como descrito de forma recorrente nos estudos analisados (JERONIMO DE ALMEIDA NETO; RAMOS, 2023; TASSO JUNIOR, 2024; MACEDO; OLIVEIRA; PRADO, 2019).

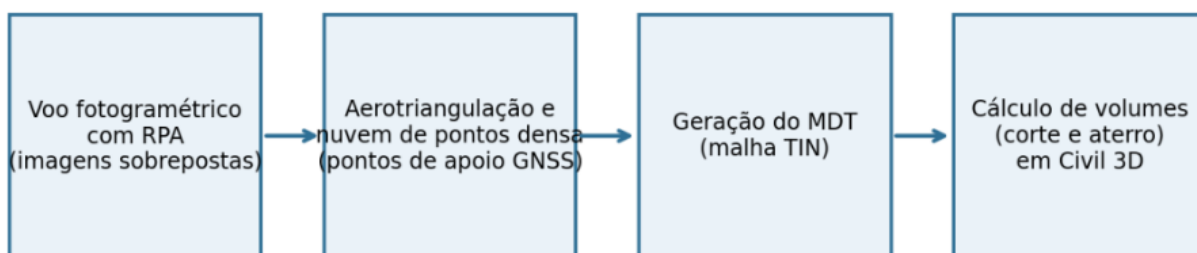


Figura 1 – Fluxo metodológico de geração de MDT por fotogrametria com RPA aplicado ao cálculo de volumes de terraplenagem

Fonte: elaborado pelos autores (2026), com base em Jeronimo de Almeida Neto e Ramos (2023) e Tasso Junior (2024).

4 Resultados e Discussão

A revisão integrativa reuniu treze estudos que atenderam aos critérios de inclusão definidos na metodologia, publicados entre 2016 e 2024, sendo sete trabalhos de conclusão de curso, quatro artigos publicados em periódicos com avaliação por pares e dois documentos normativos oficiais. A seguir, os resultados são apresentados e discutidos em três blocos temáticos: tempo e custo de execução; precisão altimétrica frente ao PEC-PCD; e desempenho do cálculo volumétrico em ambiente BIM.

4.1 Tempo e custo de execução

Carvalho (2018 apud MACKENZIE, 2021) relata que o tempo necessário para a

execução de um levantamento planialtimétrico com RPA em uma área de 5,71 hectares foi aproximadamente três vezes menor que o tempo despendido com métodos convencionais de topografia, resultado corroborado, em ordem de grandeza, pelos relatos de Tasso Junior (2024) sobre o acompanhamento de terraplenagem por meio de levantamentos aéreos repetidos ao longo da execução da obra. A Figura 2 ilustra essa relação de forma esquemática, tomando o tempo de execução por RPA como unidade de referência.

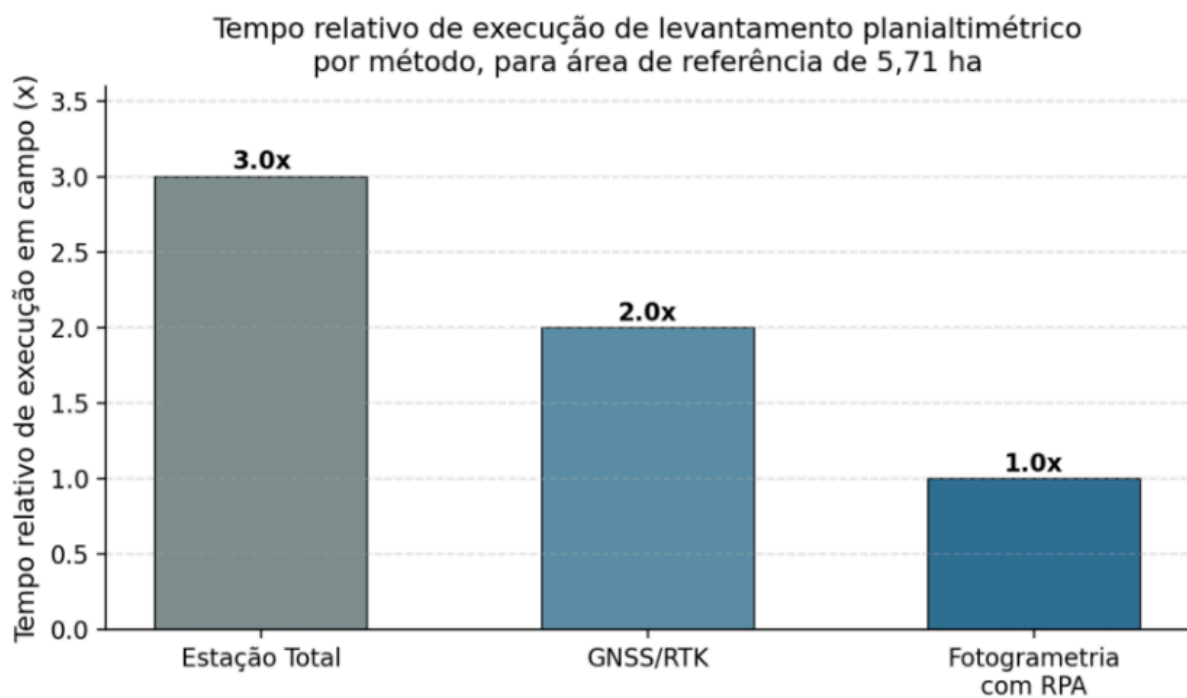


Figura 2 – Tempo relativo de execução de levantamento planialtimétrico por método

Fonte: elaborado pelos autores (2026), com base em Carvalho (2018 apud MACKENZIE, 2021).

Quanto ao custo, del Río Santana et al. (2020) e a análise setorial da construção civil sistematizada por Duarte e Costa (2023) indicam que a economia proporcionada pelo RPA concentra-se, sobretudo, na redução da equipe de campo e do tempo de mobilização, itens que representam parcela relevante do orçamento em levantamentos convencionais de áreas extensas. Entretanto, como discutido na seção 2.5, esse ganho não é incondicional: em levantamentos pontuais, de pequena área ou de baixa recorrência, o custo de aquisição do equipamento, o licenciamento junto à ANAC e as licenças de processamento fotogramétrico podem equiparar ou até superar o custo do método convencional, o que exige análise caso a caso por parte da empresa contratante.

4.2 Precisão altimétrica frente ao PEC-PCD

No que se refere à exatidão cartográfica, os estudos analisados indicam resultados

heterogêneos, diretamente relacionados à quantidade e à distribuição espacial dos pontos de controle terrestre (GCP) utilizados na aerotriangulação. Teixeira et al. (2023) classificaram seus produtos como Classe C do PEC-PCD, na escala 1:1.000, com equidistância de curvas de nível de dois metros, ao passo que Silva et al. (2016), em levantamento de área de mineração com apoio GNSS mais denso, obtiveram acurácia superior à dos métodos GNSS e LiDAR terrestre comparados no mesmo estudo. Esse contraste reforça a conclusão de Oliveira (2020) de que a exatidão do MDT por RPA não é uma propriedade fixa do equipamento ou do sensor, mas resultado direto do rigor metodológico empregado na fase de apoio terrestre e processamento.

Cabe destacar que a classificação em Classe A do PEC-PCD, mais exigente, tende a ser alcançada apenas quando o levantamento incorpora número suficiente de pontos de controle bem distribuídos e checados por equipamento GNSS de precisão geodésica, condição nem sempre observada nos estudos de menor rigor metodológico revisados nesta pesquisa. Esse achado é relevante para projetos de terraplenagem de infraestrutura pública, nos quais a exigência de Classe A ou B costuma ser contratual.

4.3 Desempenho do cálculo volumétrico em ambiente BIM

Macedo, Oliveira e Prado (2019) evidenciaram que a transposição do MDT para o Autodesk Civil 3D permite o cálculo automático do volume de terraplenagem a partir da comparação entre a superfície do terreno natural e a superfície de projeto, dispensando o cálculo manual da cota de equilíbrio exigido no fluxo tradicional em AutoCAD. Esse ganho de automação reduz o tempo de escritório e a probabilidade de erro humano no processamento dos dados, complementando, na etapa de gabinete, os ganhos de produtividade obtidos em campo pelo levantamento com RPA.

Tabela 2 – Síntese comparativa entre métodos de levantamento aplicados a projetos de terraplenagem

Critério	Estação Total	GNSS/RTK	Fotogrametria RPA
Tempo de campo (área ref.)	~3x maior	~2x maior	Referência (1x)
Densidade de pontos	Baixa	Baixa/Média	Muito alta (nuvem densa)
Classe PEC-PCD típica	A	A/B	B/C (dependente de GCP)
Estrutura do MDT	Pontos esparsos	Pontos esparsos	Malha TIN densa
Investimento inicial	Médio	Médio	Alto (equip. + software)
Custo marginal por hectare	Alto	Médio	Baixo (em uso recorrente)

Fonte: elaborado pelos autores (2026), com base em Carvalho (2018 apud MACKENZIE, 2021), del Rio Santana et al. (2020), Silva et al. (2016), Teixeira et al. (2023) e Tasso Junior (2024).

Em síntese, os resultados reunidos nesta revisão indicam que o MDT gerado por fotogrametria com RPA reúne condições técnicas para substituir, com vantagem, os métodos

convencionais em projetos de terraplenagem de média e grande extensão, sobretudo quando associado a plataformas BIM de modelagem, desde que observados os cuidados metodológicos de apoio terrestre necessários à obtenção da classe de exatidão cartográfica exigida contratualmente. A decisão pela adoção do método, contudo, deve considerar a escala, a recorrência do serviço e a exigência normativa de exatidão de cada projeto específico, não devendo ser tratada como substituição automática e universal da topografia convencional.

5 Conclusão

Este artigo teve como objetivo analisar a precisão e a viabilidade econômica de Modelos Digitais de Terreno gerados por fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas em

projetos de terraplenagem, a partir de revisão integrativa da literatura técnico-científica nacional e internacional. Os resultados permitem responder ao problema de pesquisa proposto: os MDT gerados por RPA podem, sim, atender aos padrões nacionais de exatidão cartográfica estabelecidos pelo Decreto nº 89.817/1984 e pela ET-ADGV, alcançando classificações de Classe A ou B em condições de apoio terrestre adequado, e sua adoção mostra-se economicamente vantajosa sobretudo em projetos de médio e grande porte ou de uso recorrente, embora o investimento inicial em equipamento, licenciamento e software permaneça como barreira relevante para operações pontuais ou de pequena escala.

A pesquisa confirma, ainda, que a estrutura de malha TIN, característica do MDT por RPA, favorece o cálculo volumétrico em ambiente BIM, a exemplo do Autodesk Civil 3D, ao aproveitar a densidade de pontos capturados para automatizar o processo de comparação entre a superfície natural e a superfície de projeto, reduzindo o tempo de escritório e a possibilidade de erro humano observados no fluxo tradicional de cálculo por seções transversais.

Como limitação deste estudo, destaca-se sua natureza essencialmente bibliográfica, fundamentada em dados secundários relatados por terceiros, o que impede a padronização plena das condições experimentais entre os trabalhos comparados. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a realização de estudo de caso empírico único, com levantamento simultâneo da mesma área por estação total, GNSS/RTK e RPA, sob as mesmas condições de apoio terrestre, de modo a permitir comparação quantitativa mais rigorosa entre os três métodos, bem como a análise de viabilidade econômica considerando séries históricas de custos operacionais de empresas de topografia e engenharia.

REFERÊNCIAS

DECRETO Nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Brasília: Presidência da República, 1984. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1980-1989/d89817.htm. Acesso em: 5 set. 2026.

DEL RÍO SANTANA, O.; GÓMEZ CÓRDOVA, F. de J.; LÓPEZ CARRILLO, N. V.; SAENZ ESQUEDA, J. A.; ESPINOZA FRAIRE, A. T. Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, v. 14, n. 2, 2020. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193963490001>. Acesso em: 5 set. 2026.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV). 2. ed. Brasília: Ministério da Defesa/Exército Brasileiro, 2016. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~deni_ern/CD2020/A1/ET_ADGV_2a_Edicao_2016_Textual_Anexo_A_Assinado.pdf. Acesso em: 5 set. 2026.

DUARTE, F. K. D.; COSTA, F. R. da. Altimetria e planimetria, análise de métodos fotogramétricos por VANT versus topografia convencional. *Revista PGEO*, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2023. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/PGEO/article/download/4457/4059/17653>. Acesso em: 5 set. 2026.

ESPARTEL, Lauro. Curso de topografia. 8. ed. Porto Alegre: Globo, 1987.

JERONIMO DE ALMEIDA NETO, R.; RAMOS, A. P. Mapping topographic surfaces using drones and aerial photogrammetry techniques. *RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar*, v. 4, n. 5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i5.3157>.

MACEDO, A. F.; OLIVEIRA, J. G. C. de; PRADO, F. L. de S. BIM em projeto topográfico de volumetria para terraplenagem de plataformas. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2019. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/BIM%20Em%20Projeto%20Topogr%C3%A1fico%20De%20Volumetria%20Para%20Terraplenagem%20De%20Plataformas.pdf>. Acesso em: 5 set. 2026.

MACKENZIE. Levantamentos topográficos utilizando drones e GNSS. Laboratório LABGEO, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2021. Disponível em: https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/1-mackenzie/universidade/laboratorios/labgeo/2021/ARTIGO_-LEVANTAMENTOS_TOPOGR%C3%81FICOS_UTILIZANDO_DRONES_E_GNSS.pdf. Acesso em: 5 set. 2026.

OLIVEIRA, Renato Gonzaga. Análise da acurácia de levantamento topográfico utilizando imagens aéreas capturadas por VANT's e seus usos. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30195/1/An%C3%A1liseAcur%C3%A1ciaLe>

vantamento.pdf. Acesso em: 5 set. 2026.

SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; 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. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 1, p. 74-91, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005>.

TASSO JUNIOR, Deonir Luiz Soder. Cálculo de volumes de terra para controle de terraplenagem utilizando RPA e GNSS. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024. Disponível em: <https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/8047>. Acesso em: 5 set. 2026.

TEIXEIRA, N. N.; LIMA, C. A. de; SANTOS, M. S. T.; CRUZ JÚNIOR, D. C.; SANTOS, A. L. de O.; SABINO, B. G. M. Avaliação da acurácia altimétrica em levantamentos topográficos urbanos com aeronaves remotamente pilotadas. Revista Gestão e Secretariado (GeSec), São Paulo, v. 14, n. 12, p. 21403-21430, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i12.3109>.

VEIGA, Luís Augusto Koenig. Topografia: cálculo de volumes. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Notas de aula.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. Journal of Advanced Nursing, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.