



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Análise Comparativa de tecnologias e equipamentos utilizados em Levantamentos Topográficos Planialtimétricos

Priscila Camelo¹, Bárbara Vilar², Sanderllan Costa³, Artur Silva⁴, Simone Sato⁵

¹Bacharel pela Universidade de Pernambuco – UPE, CEP: 50750-500, Recife – PE, Brasil, priscilacamel@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5833-4068; ²Bacharel pela Universidade de Pernambuco – UPE, CEP: 50750-500, Recife – PE, Brasil, barbarapvilar@gmail.com, orcid.org/0009-0002-4693-2527; ³Mestre pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, CEP: 50740-550, Recife – PE, Brasil, sanderllanc@gmail.com, orcid.org/0009-0004-1797-5303; ⁴Bacharel pela Faculdade Maurício de Nassau – UNINASSAU, CEP: 52011-210, Recife – PE, Brasil, arthursilva@outlook.com, orcid.org/0009-0000-7104-7875; ⁵Professora Doutora, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, CEP: 50740-550; Recife – PE, Brasil, simone.sato@ufpe.br, orcid.org/0000-0002-2516-8876.

Artigo recebido em 09/11/2025 e aceito em 24/02/2026

RESUMO

Diante da diversidade de tecnologias disponíveis para levantamentos topográficos, este estudo surgiu a partir da necessidade de comparar diferentes métodos, com o objetivo de identificar os mais eficazes em distintas condições de aplicação. Para isso, foi realizada uma análise comparativa entre estação total, GNSS RTK, UAS, laser scanner terrestre e laser scanner aéreo, considerando a acurácia na extração de coordenadas e medidas, bem como a eficiência operacional e a aplicabilidade dos produtos gerados. Os levantamentos foram conduzidos em uma área de aproximadamente 80 ha, e a análise estatística foi fundamentada nos parâmetros estabelecidos pelo Decreto-Lei nº 89.817/1984 e pela Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geospaciais (ET-CQDG). Os resultados demonstraram que o UAS se destacou pela rapidez e eficiência na obtenção de medições. Com pontos de controle, o UAS alcançou acurácia centimétrica na planialtimetria, com diferenças médias entre 2,22 cm e 2,80 cm em relação ao GNSS RTK e à estação total, além de atingir até 96,07% do valor de referência na estimativa volumétrica. O GNSS RTK e a estação total apresentaram desempenho semelhante na análise de volumes, com diferença de apenas 0,48% entre si. Em contrapartida, a comparação entre a estação total e o laser scanner terrestre revelou discrepância de 12,55% na estimativa volumétrica, evidenciando a limitação da estação total na representação de superfícies complexas. O laser scanner aéreo, por sua vez, apresentou superioridade no levantamento de áreas com vegetação densa, devido à capacidade de penetração do feixe laser entre as copas das árvores. Conclui-se que a escolha do método mais adequado depende das especificações do projeto, podendo a integração entre diferentes tecnologias mitigar limitações individuais e otimizar os resultados.

Palavras-chave: topografia; UAS; GNSS RTK; laser scanner; acurácia posicional.

Comparative Analysis of Technologies and Equipment Used in Planimetric and Altimetric Topographic Surveys

ABSTRACT

Given the diversity of technologies available for topographic surveys, this study was motivated by the need to compare different methods to identify the most effective under distinct application conditions. A comparative analysis was carried out involving total station, GNSS RTK, UAS, terrestrial laser scanner, and aerial laser scanner, considering accuracy in coordinate extraction and measurements, as well as operational efficiency and applicability of the generated products. The surveys were conducted over an area of approximately 80 ha, and the statistical analysis was based on the parameters established by Decree-Law No. 89.817/1984 and the Technical Specification for Geospatial Data Quality Control (ET-CQDG). The results showed that UAS stood out for its speed and efficiency in data acquisition. When control points were used, UAS achieved centimetric planialtimetric accuracy, with mean differences ranging from 2.22 cm to 2.80 cm relative to GNSS RTK and total station, and reached up to 96.07% of the reference value in volumetric estimation. GNSS RTK and total station showed similar performance in volume estimation, with a difference of only 0.48% between them. In contrast, the comparison between total station and terrestrial laser scanner revealed a discrepancy of 12.55% in volumetric estimation, highlighting the limitation of the total station in representing complex surfaces. The aerial laser scanner showed superior performance in surveying densely vegetated areas due to the laser beam's penetration through the canopy. It is concluded that the selection of the most suitable method depends on project specifications, and that integrating different technologies can mitigate individual limitations and optimize results.

Keywords: topographic surveying; UAS; GNSS RTK; laser scanner; positional accuracy.

Introdução

Os levantamentos topográficos planialtimétricos constituem um processo fundamental na engenharia, sendo utilizados para mapear a superfície terrestre e fornecer dados precisos para a elaboração de projetos e o acompanhamento de obras Vaz et al. (2020); Vu et al. (2023). Como resultado, obtêm-se representações detalhadas da topografia do terreno, essenciais para diferentes aplicações técnicas. Esse processo tem evoluído continuamente (Smith e Vericat, 2015; Toan et al., 2025), incorporando novas tecnologias que ampliam a precisão, a agilidade e a automação das medições (Macedo e Ferreira, 2023). Nesse contexto, métodos tradicionais e contemporâneos coexistem, incluindo instrumentos clássicos, estação total (Vaz et al. 2020) e sua versão robótica Zhou et al. (2022); Jiang et al. (2026), Global Navigation Satellite System em modo Real-Time Kinematic (GNSS RTK), drone (Unmanned Aircraft Systems – UAS) e laser scanners. Cada técnica apresenta vantagens e limitações que devem ser avaliadas de acordo com as características do projeto e da superfície a ser levantada Kolkos et al. (2022); Mustafa et al. (2022); Gu et al. (2024).

Com a crescente demanda por levantamentos mais acurados e detalhados, a escolha do método de aquisição tornou-se um aspecto decisivo. Nesse cenário, o uso de UAS com câmeras embarcadas e de laser scanners vem ganhando destaque no mapeamento topográfico (Ferrer-González et al., 2020), ao permitir a coleta de dados com rapidez, menor necessidade de acesso físico ao terreno e potencial para geração de modelos tridimensionais. Entretanto, o imageamento aéreo com UAS ainda apresenta desafios relacionados à acurácia em áreas complexas ou com vegetação densa (Patricio et al., 2023). Em contrapartida, os levantamentos com estação total e GNSS RTK permanecem como referência pela robustez dos dados obtidos (Kevorkov et al., 2017; Eker et al., 2021), embora normalmente demandem maior tempo de operação e esforço em campo Furby e Akhavian (2024).

A introdução da estação total representou um avanço importante ao integrar medições angulares e de distância em um único equipamento, tornando a coleta de dados mais eficiente (Nadolins et al., 2017). Em configurações mais recentes, sobretudo nas estações totais robóticas, recursos como rastreamento automatizado e maior estabilidade instrumental ampliaram sua eficiência operacional em aplicações de monitoramento e

levantamento de precisão Zhou et al. (2022). Posteriormente, o desenvolvimento do GNSS ampliou a capacidade de obtenção de coordenadas com rapidez e precisão (Park e Park, 2015). Entre seus métodos de posicionamento, destaca-se o GNSS RTK, que permite ao usuário determinar posições acuradas em tempo real por meio do posicionamento relativo (Dai et al., 2010; Vaz et al. 2020). Esse método pode alcançar acurácia centimétrica, sem necessidade de processamento posterior, desde que a solução das ambiguidades seja confiável (Dai et al., 2010). Paralelamente, o uso de UAS tem ampliado as possibilidades para especialistas em construção, cartógrafos e agrimensores, ao possibilitar a obtenção de dados georreferenciados em áreas de difícil acesso por métodos convencionais (Tkáč e Mésároš, 2019), consolidando-se progressivamente como ferramenta relevante para aplicações em topografia e engenharia civil (Sestras et al., 2025). Estudos mais recentes têm demonstrado, ainda, que sistemas UAS com RTK podem alcançar acurácia compatível com aplicações topográficas mesmo com redução do número de pontos de controle em solo, desde que sejam observadas condições adequadas de aquisição, geometria de voo e processamento (Niu et al. 2024). Por sua vez, o laser scanner, especialmente na forma de Light Detection and Ranging (LiDAR), destaca-se pela capacidade de captar milhões de pontos por segundo, produzir dados precisos em ambientes complexos e recobrir grandes áreas com eficiência. Além disso, sua operação independe das condições de iluminação, favorecendo a geração de modelos tridimensionais de alta fidelidade (Sestras et al., 2025).

A diversidade de equipamentos atualmente disponíveis para levantamentos topográficos, cada qual com características e especificações próprias, influencia diretamente sua aplicabilidade, precisão e eficiência. Diante da demanda recorrente por levantamentos na TPF Engenharia e das limitações observadas em campo com o uso de determinados equipamentos, torna-se necessária uma análise criteriosa dessas tecnologias, de modo a apoiar a seleção do método mais adequado para cada atividade. Estudos comparativos entre métodos tradicionais e tecnologias emergentes têm evidenciado essa necessidade. Chekole (2014), por exemplo, ressaltou a importância de avaliar precisão, acurácia e tempo de execução na escolha entre estação total, GNSS e laser scanner terrestre. Outros autores ampliaram essa comparação ao incluir UAS com câmeras embarcadas e laser scanner (LiDAR) Eker et al. (2021), além de

considerar o comportamento dos métodos em diferentes superfícies e aplicações, como infraestrutura Vu et al. (2023). Mais recentemente, Tamimi e Toth (2024) demonstraram que o UAV LiDAR pode apresentar desempenho competitivo em comparação com a estação total para aquisição de dados geoespaciais em contexto de levantamento, enquanto Sestras et al. (2025) reforçaram a complementaridade entre fotogrametria UAS e LiDAR, especialmente quando se contrastam superfícies abertas e áreas com vegetação. De modo semelhante, Peterson et al. (2019), ao compararem nuvens de pontos derivadas de imagens adquiridas por UAS com aquelas obtidas por laser scanner terrestre, verificaram que, embora ambos os métodos sejam precisos, o levantamento com UAS apresentou viés médio de +8 cm em algumas feições, indicando a necessidade de adequações segundo a finalidade do levantamento.

Esses estudos reforçam a relevância do tema e evidenciam que a incorporação de inovações tecnológicas pode proporcionar maior agilidade, automação de processos, redução da margem de erro e aumento do nível de detalhamento, com reflexos diretos na redução de custos, na otimização dos prazos e no suporte à tomada de decisão em projetos de engenharia. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo

realizar uma análise comparativa entre estação total, GNSS RTK, UAS, laser scanner terrestre e laser scanner aéreo, buscando identificar vantagens, limitações e adequação de uso dessas metodologias. A abordagem adotada considera critérios como área de cobertura, tempo de coleta, tempo de processamento, custo dos equipamentos, equipe necessária, entregáveis e acurácia dos dados, a fim de contribuir para decisões futuras mais fundamentadas e para o aprimoramento da eficiência e da qualidade das entregas em projetos de engenharia.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido no bairro do Caximba, localizado no município de Curitiba-PR, Brasil, abrangendo uma área aproximada de 80 hectares. A região caracteriza-se por intensa movimentação de terra associada a obras de infraestrutura urbana, além da presença de áreas com vegetação densa, configurando um ambiente adequado para a avaliação comparativa de diferentes tecnologias de levantamento topográfico. A localização da área de estudo é apresentada na Figura 1.



Figura 1. Localização geográfica da área de estudo em Caximba, Curitiba-PR.

Equipamentos

Foram utilizados diferentes sensores e tecnologias, com o objetivo de comparar métodos convencionais e técnicas de captura da realidade. Os equipamentos empregados foram: UAS DJI Air; receptor GNSS RTK GHC i73; estação total Geodetic GD2i8; laser scanner aéreo CHC

AlphaAir 450; e laser scanner terrestre Leica RTC360. A adoção desses equipamentos permitiu comparar desempenho geométrico, nível de detalhamento, produtividade e aplicabilidade em diferentes situações de levantamento.

Planejamento e Captura de Dados

O levantamento foi executado em três frentes principais: aerofotogrametria com UAS, escaneamento a laser e levantamento por métodos convencionais, de modo a permitir a comparação entre diferentes tecnologias de captura espacial em uma mesma área de estudo.

Para a aquisição fotogramétrica com UAS, o plano de voo foi definido com 80% de sobreposição longitudinal e lateral, à altura de 40 m, resultando em uma resolução espacial de aproximadamente 1,1 cm/pixel (GSD). Esses parâmetros foram adotados com o objetivo de garantir recobrimento adequado entre as imagens, favorecer a reconstrução fotogramétrica e reduzir inconsistências geométricas no processamento.

No levantamento com laser scanner aéreo, o voo foi planejado a 90 m de altura em relação ao terreno, cobrindo integralmente a área de interesse em uma única poligonal de voo. Essa estratégia foi adotada para minimizar descontinuidades entre faixas, reduzir a ocorrência de desalinhamentos durante o processamento e preservar a homogeneidade da nuvem de pontos gerada.

Previamente às aquisições aéreas, foram implantados em campo pontos de controle e de checagem, materializados com tinta branca e distribuídos de forma homogênea em toda a área experimental. As coordenadas desses pontos foram determinadas com GNSS RTK e estação total, tomando-se como referência o marco geodésico pré-existente M336. A utilização desses pontos teve como finalidade assegurar o georreferenciamento dos produtos gerados, bem como subsidiar a avaliação da acurácia planialtimétrica dos diferentes métodos testados.

Além disso, para a análise comparativa da precisão geométrica e volumétrica, as pilhas de materiais presentes na área foram cadastradas e levantadas individualmente com GNSS RTK e estação total, servindo como base de referência para as comparações entre os produtos obtidos por cada tecnologia.

Processamento dos Dados

O processamento dos dados adquiridos em campo foi realizado por meio de diferentes softwares especializados, organizados em um fluxo integrado conforme o tipo de dado e a finalidade da análise.

As imagens obtidas pelo aerolevantamento com UAS foram processadas na plataforma de software fotogramétrico DroneDeploy, na qual

foram executadas as etapas de alinhamento das imagens, geração de nuvem de pontos densa, modelo digital de superfície (MDS), modelo digital do terreno (MDT) e ortomosaico. A partir desses produtos, também foram realizadas extrações de medidas e análises preliminares.

As nuvens de pontos provenientes do laser scanner terrestre foram processadas no software Leica Cyclone REGISTER 360, contemplando as etapas de registro, alinhamento das cenas e ajuste do conjunto de dados, resultando em uma nuvem de pontos consolidada e georreferenciada.

Posteriormente, as nuvens de pontos, tanto do laser scanner quanto derivadas da fotogrametria, foram manipuladas no software Autodesk Recap Pro, no qual foram realizadas etapas de visualização, organização dos dados e extração de medidas lineares. Para análises mais avançadas, incluindo filtragem, limpeza e comparação entre nuvens de diferentes origens, foi utilizado o software CloudCompare (solução open source), permitindo a avaliação das discrepâncias geométricas entre os métodos.

Para a geração de superfícies e cálculo de volumes, os dados foram exportados para o software Autodesk Civil 3D, no qual foram modeladas superfícies trianguladas (TIN) representando o terreno e as pilhas de materiais, possibilitando a estimativa volumétrica e análises comparativas entre os diferentes métodos de levantamento. Por fim, os resultados obtidos foram organizados e analisados na planilha eletrônica do Microsoft Excel, onde foram sistematizadas as métricas estatísticas e os dados comparativos entre as metodologias avaliadas.

Análise Estatística

A avaliação da acurácia planialtimétrica foi realizada por meio da comparação entre as coordenadas obtidas pelos diferentes métodos de levantamento e aquelas consideradas como referência, provenientes dos levantamentos convencionais com GNSS RTK e estação total. Inicialmente, foram calculadas as discrepâncias posicionais para cada ponto de checagem, definidas como a diferença entre as coordenadas estimadas pelos métodos avaliados e as respectivas coordenadas de referência. As análises foram conduzidas separadamente para as componentes planimétricas (X e Y) e altimétrica (Z).

Para quantificar a magnitude dos erros, foi utilizado o Erro Médio Quadrático (Root Mean Square Error - RMSE), conforme a Equação (1), calculado individualmente para cada componente,

permitindo a avaliação detalhada do comportamento dos erros em cada direção. Complementarmente, foram analisadas as diferenças médias entre os métodos, com o objetivo de identificar possíveis tendências sistemáticas nos dados.

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad \text{Equação 1}$$

Em que d_i apresenta a discrepância observada no ponto i , calculada pela diferença entre o valor obtido pelo método avaliado e o valor de referência, e n corresponde ao número total de pontos de checagem utilizados na análise. Para as componentes individuais, as discrepâncias foram representadas por d_{xi} , d_{yi} , d_{zi} respectivamente para as coordenadas planimétricas e altimétrica. Complementarmente, foram analisadas as diferenças médias entre os métodos, com o objetivo de identificar possíveis tendências sistemáticas nos dados.

A interpretação dos resultados e a avaliação da qualidade posicional dos produtos foram realizadas com base nos parâmetros estabelecidos pelo Decreto nº 89.817/1984 (Brasil, 1984) e pela Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), (Brasil, 2016). Para a análise planimétrica, adotou-se o Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográfico Digitais (PEC-PCD) para a escala 1:1.000, cujos limites são: Classe A (EM = 0,28 m; EP = 0,17 m), Classe B (EM = 0,50 m; EP = 0,30 m), Classe C (EM = 0,80 m; EP = 0,50 m) e Classe D (EM = 1,00 m; EP = 0,60 m). O enquadramento dos produtos foi realizado verificando-se, simultaneamente, se 90% das discrepâncias posicionais permaneceram abaixo do valor do Erro Máximo (EM) da classe considerada e se o erro-padrão (EP) estimado atendeu ao respectivo limite. Para a componente altimétrica, o enquadramento foi conduzido conforme os parâmetros da ET-CQDG aplicáveis aos produtos altimétricos digitais, considerando os limites de PEC-PCD e EP definidos em função do tipo de produto e da equidistância vertical adotada. Esse procedimento é coerente com aplicações recentes do PEC-PCD em produtos derivados de UAS PPK, como demonstrado por França et al. (2026), que avaliaram ortomosaicos e MDS em encostas íngremes a partir de discrepâncias posicionais, Raiz quadrada do Erro Quadrático Médio planimétrico e altimétrico e classificação cartográfica segundo o padrão brasileiro, (França et al. 2026).

Além da análise planialtimétrica, foram realizadas avaliações da acurácia na extração de comprimentos e da estimativa volumétrica, utilizando como indicadores as diferenças absolutas e relativas em relação aos valores de referência, bem como o RMSE associado.

Resultados e discussão

Os resultados foram organizados de modo a permitir a comparação entre os métodos avaliados quanto à acurácia planialtimétrica, à extração de medidas, à estimativa volumétrica, ao nível de detalhamento e aos aspectos operacionais relacionados a tempo, custo e equipe. A análise conjunta desses elementos permitiu avaliar a eficácia de cada técnica e subsidiar a definição de critérios para a seleção da abordagem mais adequada em diferentes tipos de levantamento topográfico.

Acurácia planialtimétrica

As coordenadas dos pontos de checagem coletados com a estação total, com o GNSS RTK e aquelas extraídas a partir dos ortomosaicos, foram comparadas entre si, com o objetivo de estimar e analisar os erros posicionais. Para isso, foram calculadas as médias dos desvios e os valores de RMSE proveniente da comparação entre a diferentes conjuntos de coordenadas: estação total comparada com GNSS RTK;

- Amostra da estação total comparada com a amostra do GNSS RTK;
- Amostra da estação total comparada com a amostra extraída do ortomosaico processado com os pontos de controle levantados com a estação total;
- Amostra do GNSS RTK comparada com a amostra extraída do ortomosaico processado com os pontos de controle levantados com o GNSS RTK;
- Amostra do GNSS RTK comparada com a amostra coletada do ortomosaico processado com os pontos de controle levantados com a estação total;
- Amostra da estação total comparada com a amostra coletada do ortomosaico processado com os pontos de controle levantados com o GNSS RTK.

A comparação entre os métodos convencionais mostrou elevada proximidade entre estação total e GNSS RTK, com média geral das diferenças de 3,02 cm, conforme apresentado na Tabela 1, evidenciando a confiabilidade de ambos

para levantamentos planialtimétricos de referência. Entre os ortomosaicos com pontos de controle, o melhor desempenho foi obtido quando os GCPs foram levantados com GNSS RTK, resultando em média geral de 2,22 cm, conforme a Tabela 3, enquanto o ortomosaico processado com pontos obtidos pela estação total apresentou média geral

de 2,80 cm, conforme a Tabela 2. Esses resultados indicam que o uso de pontos de controle melhora significativamente a qualidade posicional dos produtos fotogramétricos e que o GNSS RTK se mostrou particularmente eficiente como suporte ao georreferenciamento.

Tabela 1. Comparação de coordenadas entre as topografias convencionais

Estação total			GNSS RTK			Diferença			
Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Este (cm)	Norte (cm)	Cota (cm)	
665431,460	7165419,851	878,791	665431,490	7165419,800	878,850	3,030	5,100	5,920	
665448,501	7165428,546	878,546	665448,520	7165428,500	878,560	1,920	4,600	1,440	
665479,847	7165412,102	879,534	665479,860	7165412,090	879,550	1,260	1,200	1,580	
665486,981	7165396,662	879,880	665487,010	7165396,650	879,900	2,890	1,200	2,040	
665539,314	7165346,711	881,713	665539,370	7165346,700	881,740	5,590	1,100	2,740	
665555,090	7165325,236	882,729	665555,140	7165325,250	882,750	4,960	1,400	2,070	
665562,435	7165333,833	883,093	665562,470	7165333,850	883,120	3,520	1,700	2,690	
665611,229	7165240,451	886,699	665611,280	7165240,500	886,720	5,080	4,900	2,070	
665638,413	7165220,071	888,383	665638,450	7165220,120	888,400	3,670	4,900	1,660	
665640,958	7165259,978	887,879	665641,010	7165260,10	887,900	5,200	3,200	2,090	
						Média (cm)	3,712	2,930	2,430
						RMSE (cm)	3,967	3,382	2,724
						Média geral (cm)		3,024	

Tabela 2. Comparação de coordenadas entre ortomosaico processado com pontos de controle obtidos pela estação total e coordenadas obtidas pela estação total.

Ortomosaico (estação total)			Estação total			Diferença		
x	y	Elevação	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Este (cm)	Norte (cm)	Cota (cm)
665431,450	7165419,813	878,818	665431,460	7165419,851	878,791	1,017	3,824	2,756
665448,460	7165428,538	878,573	665448,501	7165428,546	878,546	4,030	0,846	2,752
665479,823	7165412,134	879,511	665479,847	7165412,102	879,534	2,432	3,196	2,315
665487,009	7165396,667	879,812	665486,981	7165396,662	879,880	2,752	0,496	6,802
665539,364	7165346,733	881,678	665539,314	7165346,711	881,713	4,947	2,161	3,419

665555,107	7165325,244	882,680	665555,090	7165325,236	882,729	1,678	0,836	4,906
665562,458	7165333,841	883,082	665562,435	7165333,833	883,093	2,304	0,781	1,113
665611,259	7165240,386	886,668	665611,229	7165240,451	886,699	2,973	6,532	3,103
665638,405	7165220,022	888,356	665638,413	7165220,071	888,383	0,877	4,873	2,708
665640,992	7165259,968	887,848	665640,958	7165259,978	887,879	3,378	1,036	3,144
					Média (cm)	2,639	2,458	3,302
					RMSE (cm)	2,905	3,151	3,614
					Média geral (cm)		2,800	

Tabela 3. Comparação de coordenadas entre ortomosaico processado com pontos de controle obtidos pelo GNSS RTK e coordenadas obtidas pelo GNSS RTK.

Ortomosaico (GNSS RTK)			GNSS RTK			Diferença		
x	y	Elevação	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Este (cm)	Norte (cm)	Cota (cm)
665431,481	7165419,758	878,861	665431,490	7165419,800	878,850	0,874	4,193	1,145
665448,494	7165428,491	878,604	665448,520	7165428,500	878,560	2,637	0,892	4,352
665479,858	7165412,118	879,554	665479,860	7165412,090	879,550	0,186	2,818	0,383
665487,046	7165396,645	879,858	665487,010	7165396,650	879,900	3,649	0,513	4,240
665539,408	7165346,735	881,726	665539,370	7165346,700	881,740	3,809	3,454	1,405
665555,156	7165325,257	882,732	665555,140	7165325,250	882,750	1,626	0,715	1,813
665562,495	7165333,857	883,132	665562,470	7165333,850	883,120	2,465	0,694	1,165
665611,299	7165240,431	886,688	665611,280	7165240,500	886,720	1,924	6,910	3,171
665638,431	7165220,077	888,390	665638,450	7165220,120	888,400	1,900	4,286	0,986
665641,025	7165259,997	887,884	665641,010	7165260,010	887,900	1,461	1,308	1,646
					Média (cm)	2,053	2,578	2,030
					RMSE (cm)	2,318	3,276	2,423
					Média geral (cm)		2,221	

As comparações cruzadas entre ortomosaicos gerados com um método de controle e coordenadas de referência obtidas por outro apresentaram desvios mais elevados, com médias gerais de 3,92 cm e 3,40 cm, respectivamente, como mostrado nas Tabelas 4 e 5. Esse comportamento sugere que a consistência entre o

método de levantamento dos pontos de controle e o método utilizado como referência influencia o desempenho final do produto. Por fim, a comparação entre a estação total e o ortomosaico processado sem pontos de controle revelou discrepâncias muito superiores, com diferença média de 1,75 m na coordenada Este, 2,78 m na

coordenada Norte e 82,62 m na cota altimétrica, evidenciando que não é possível assegurar a

acurácia posicional do produto sem controle adequado em campo.

Tabela 4. Comparação de coordenadas entre ortomosaico processado com pontos obtidos pela estação total e coordenadas obtidas pelo GNSS RTK.

Ortomosaico (estação total)			GNSS RTK			Diferença		
x	y	Elevação	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Este (cm)	Norte (cm)	Cota (cm)
665431,450	7165419,813	878,818	665431,490	7165419,800	878,850	4,047	1,276	3,164
665448,460	7165428,538	878,573	665448,520	7165428,500	878,560	5,950	3,754	1,312
665479,823	7165412,134	879,511	665479,860	7165412,090	879,550	3,692	4,396	3,895
665487,009	7165396,667	879,812	665487,010	7165396,650	879,900	0,138	1,696	8,842
665539,364	7165346,733	881,678	665539,370	7165346,700	881,740	0,643	3,261	6,159
665555,107	7165325,244	882,680	665555,140	7165325,250	882,750	3,282	0,564	6,976
665562,458	7165333,841	883,082	665562,470	7165333,850	883,120	1,216	0,919	3,803
665611,259	7165240,386	886,668	665611,280	7165240,500	886,720	2,107	11,432	5,173
665638,405	7165220,022	888,356	665638,450	7165220,120	888,400	4,547	9,773	4,368
665640,992	7165259,968	887,848	665641,010	7165260,010	887,900	1,822	4,236	5,234
					Média (cm)	2,744	4,131	4,893
					RMSE (cm)	3,264	5,421	5,286
					Média geral (cm)	3,923		

Tabela 5. Comparação de coordenadas entre ortomosaico processado com pontos obtidos pelo GNSS RTK e coordenadas obtidas pela estação total.

Ortomosaico (GNSS RTK)			Estação total			Diferença		
x	y	Elevação	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Este (cm)	Norte (cm)	Cota (cm)
665431,481	7165419,758	878,861	665431,460	7165419,851	878,791	2,156	9,293	7,065
665448,494	7165428,491	878,604	665448,501	7165428,546	878,546	0,717	5,492	5,792
665479,858	7165412,118	879,554	665479,847	7165412,102	879,534	1,074	1,618	1,963
665487,046	7165396,645	879,858	665486,981	7165396,662	879,880	6,539	1,713	2,200
665539,408	7165346,735	881,726	665539,314	7165346,711	881,713	9,399	2,354	1,335
665555,156	7165325,257	882,732	665555,090	7165325,236	882,729	6,586	2,115	0,257
665562,495	7165333,857	883,132	665562,435	7165333,833	883,093	5,985	2,394	3,855
665611,299	7165240,431	886,688	665611,229	7165240,451	886,699	7,004	2,010	1,101

665638,4 31	7165220, 077	888,390	665638,4 13	7165220, 071	888,383	1,770	0,614	0,674
665641,0 25	7165259, 997	887,884	665640,9 58	7165259, 978	887,879	6,661	1,892	0,444
					Média (cm)	4,789	2,949	2,469
					RMSE (cm)	5,596	3,818	3,328
					Média geral (cm)	3,402		

Esses resultados confirmam que os pontos de controle exercem papel decisivo na qualidade geométrica dos ortomosaicos. A melhoria observada entre produtos com e sem GCP está de acordo com a literatura recente, que aponta ganhos expressivos de acurácia com ajuste geométrico adequado em levantamentos com UAS RTK. Niu et al. (2024), por exemplo, mostraram que o georreferenciamento direto com RTK pode atingir desempenho compatível com aplicações topográficas, mas que a consistência espacial do produto ainda depende da geometria de aquisição, da distribuição dos pontos de verificação e do processamento fotogramétrico. De modo complementar, Szypuła (2024) mostrou que modelos gerados sem pontos de controle podem apresentar degradação relevante da acurácia, sobretudo na componente vertical. Assim, os resultados deste estudo reforçam que a robustez posicional do ortomosaico depende não apenas do sensor embarcado, mas também da estratégia de georreferenciamento adotada.

Esses resultados confirmam que os pontos de controle exercem papel decisivo na qualidade geométrica dos ortomosaicos. A melhoria observada entre produtos com e sem GCP está de acordo com a literatura recente, que aponta ganhos expressivos de acurácia com ajuste geométrico adequado em levantamentos com drones RTK e PPK. Niu et al. (2024) mostraram que o

georreferenciamento direto com RTK pode atingir desempenho compatível com aplicações topográficas, mas que a consistência espacial do produto ainda depende da geometria de aquisição, da distribuição dos pontos de verificação e do processamento fotogramétrico. De modo complementar, França et al. (2026) verificaram que ortomosaicos gerados com UAS PPK puderam atingir PEC-PCD Classe A em 1:1.000 para a componente planimétrica, mesmo em área de encosta íngreme, o que reforça a pertinência do enquadramento adotado no presente estudo.

Acurácia na extração de comprimentos

Para essa análise, foram comparadas dimensões obtidas a partir dos ortomosaicos processados com e sem pontos de controle, adotando-se como referencial verdadeiro os comprimentos obtidos a partir da nuvem de pontos do laser scanner terrestre, em razão de sua acurácia milimétrica e maior detalhamento do ambiente. As amostras incluíram laterais de bueiros, comprimentos de vias, alturas de edificações, janelas, portas e portões. Esses dados foram coletados por meio do ortomosaico gerado no DroneDeploy e da nuvem de pontos pelo o Recap Pro. Na Figura 2(a) e (b) e 3 (a) e (b) é possível observar como ocorreu a extração de comprimentos nos dois softwares citados.



Figura 2. (a) Medida horizontal extraída no Recap Pro, (b) Medida horizontal extraída no DroneDeploy.



Figura 3. (a) Medida vertical extraída no Recap Pro, (b) Medida vertical extraída no DroneDeploy.

No plano horizontal, as diferenças entre o laser scanner terrestre e o ortomosaico com GCP variaram até 3,0 cm, com média de 1,09 cm e RMSE de 1,5 cm, conforme apresentado na Tabela 6, indicando alta acurácia e baixa distorção das medições. O ortomosaico sem GCP apresentou comportamento semelhante, porém com desvios

ligeiramente maiores, alcançando até 4,0 cm, média de 1,43 cm e RMSE de 2,0 cm, também resumidos na Tabela 6. Esses resultados mostram que, para medições horizontais, mesmo produtos sem GCP podem apresentar bom desempenho métrico relativo, embora não garantam confiabilidade posicional absoluta.

Tabela 6. Comparação das medições de comprimento no plano horizontal.

Comprimento			Diferença	
Laser Scanner estático (m)	Ortomosaico com GPC (m)	Ortomosaico sem GPC (m)	Laser - Ortomosaico com GCP (cm)	Laser - Ortomosaico sem GCP (cm)
6,167	6,160	6,190	0,700	2,300
4,940	4,950	4,940	1,000	0,000
6,573	6,580	6,590	0,700	1,700
8,760	8,760	8,760	0,000	0,000
7,792	7,780	7,780	1,200	1,200
6,542	6,560	6,560	1,800	1,800
0,990	0,990	0,990	0,000	0,000
5,706	5,710	5,690	0,400	1,600
8,970	8,940	8,930	3,000	4,000

11,301	11,280	11,270	2,100	3,100
22,471	22,460	22,470	1,100	0,100
		Média (cm)	1,091	1,436
		RMSE (cm)	1,500	2,000

No plano vertical, os desvios foram mais elevados. As diferenças entre o laser scanner terrestre e o ortomosaico com GCP atingiram até 10,9 cm, com média de 4,98 cm e RMSE de 5,96 cm, enquanto no ortomosaico sem GCP as diferenças chegaram a 11,9 cm, com média de 5,15 cm e RMSE de 6,18 cm, como demonstrado na

Tabela 7. A maior sensibilidade das medições verticais era esperada, uma vez que a câmera, posicionada de forma predominantemente ortogonal ao solo, favorece a representação do plano horizontal em detrimento das superfícies laterais e descontinuidades geométricas.

Tabela 7. Comparação das medições de comprimento no plano vertical

Comprimento			Diferença	
Laser Scanner estático (m)	Ortomosaico com GPC (m)	Ortomosaico sem GPC (m)	Laser - Ortomosaico com GCP (cm)	Laser - Ortomosaico sem GCP (cm)
6,736	6,690	6,750	4,600	1,400
4,020	4,010	4,010	1,000	1,000
1,811	1,920	1,930	10,900	11,900
2,261	2,210	2,220	5,100	4,100
2,116	2,150	2,050	3,400	6,600
1,071	1,130	1,120	5,900	4,900
		Média (cm)	4,983	5,150
		RMSE (cm)	5,960	6,180

A diferença entre os desempenhos horizontal e vertical reforça a necessidade de cuidados adicionais quando se pretende utilizar fotogrametria para extração de medidas tridimensionais. A literatura recente mostra que a componente vertical permanece mais sensível às condições de aquisição e ao tratamento geométrico das imagens, mesmo em plataformas com RTK. Niu et al. (2024) observaram que a acurácia do georreferenciamento direto depende da consistência espacial e da configuração do levantamento, e estudos recentes recomendam o uso de imagens oblíquas e ajustes operacionais para reduzir erros sistemáticos, sobretudo na componente Z. Nesse sentido, os maiores desvios verticais observados neste trabalho são coerentes com a limitação geométrica de imagens predominantemente nadirais e indicam que ajustes como redução da altura de voo e aquisição oblíqua podem melhorar a reconstrução de feições laterais e superfícies com maior complexidade morfológica.

A diferença entre os desempenhos horizontal e vertical reforça a necessidade de cuidados adicionais quando se pretende utilizar fotogrametria para extração de medidas tridimensionais. A literatura recente mostra que a componente vertical permanece mais sensível às

condições de aquisição e ao tratamento geométrico das imagens, mesmo em plataformas com RTK ou PPK. Niu et al. (2024) observaram que a acurácia do georreferenciamento direto depende da consistência espacial e da configuração do levantamento, enquanto França et al. (2026) mostraram que, em produtos gerados com UAS PPK, a classificação altimétrica pode apresentar maior variabilidade entre plataformas e softwares, embora ainda seja possível atingir Classe A em 1:1.000 em condições favoráveis. Esses resultados são coerentes com os maiores desvios verticais observados neste trabalho e reforçam a necessidade de ajustes operacionais, como redução da altura de voo e aquisição de imagens oblíquas, para melhorar a reconstrução de superfícies com maior complexidade morfológica.

Acurácia volumétrica

A análise de acurácia volumétrica foi realizada com base em três pilhas de materiais. Após a coleta e o processamento dos dados, foram geradas superfícies para o pé e a crista das pilhas no Civil 3D para cada técnica de levantamento, sendo calculado o volume contido entre elas. Os volumes estimados foram comparados com valores de referência obtidos por laser scanner terrestre ou

aéreo, adotados como referenciais devido à maior densidade de pontos e maior fidelidade na representação da superfície. Além disso, a estimativa de volume obtida no Civil 3D foi comparada àquela gerada no DroneDeploy.

Na Pilha A, levantada com estação total e GNSS RTK, os volumes estimados foram de 24,72 m³ e 24,84 m³, respectivamente, com diferença de apenas 0,12 m³, equivalente a 0,48%, conforme a Tabela 8. A comparação visual entre as superfícies trianguladas e as curvas de nível, apresentada nas Figuras 4 e 5, mostra elevada concordância entre os dois métodos. É possível observar a

sobreposição das curvas de nível obtidas a partir de ambos os métodos com espaçamento de 20 cm, o que permite uma análise detalhada da topografia do terreno. As curvas primárias e secundárias mostram-se coincidentes, indicando uma alta concordância entre os dois métodos. De forma complementar, a sobreposição dos perfis longitudinais da pilha, mostrada na Figura 6, evidencia boa aderência entre os resultados, embora ainda haja pequenas discrepâncias nos picos, provavelmente associadas à resolução e à distribuição dos pontos coletados.

Tabela 8. Comparativo de volumes da Pilha A obtido por diferentes métodos

Equipamento	Método de cálculo	Volume (m ³)
Estação total	Civil 3D	24,72
GNSS RTK	Civil 3D	24,84

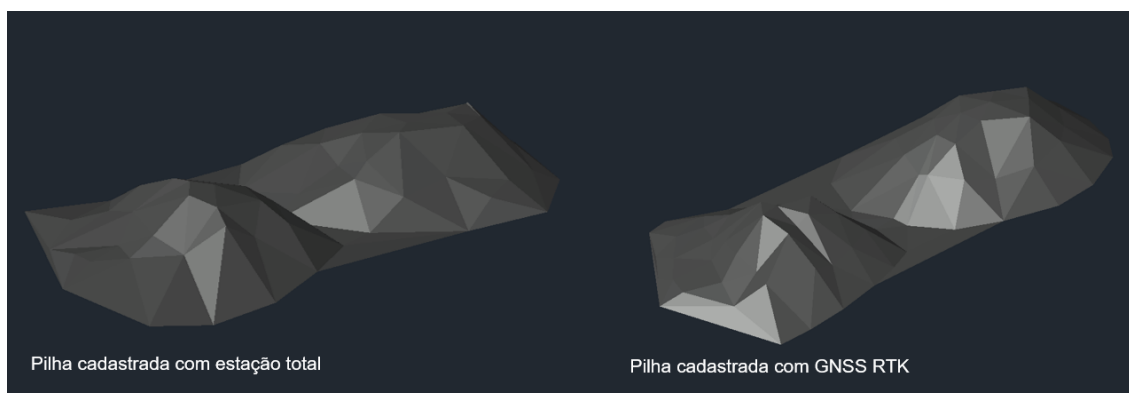


Figura 4. Comparação entre a triangulação das superfícies da pilha A obtidas por diferentes métodos.

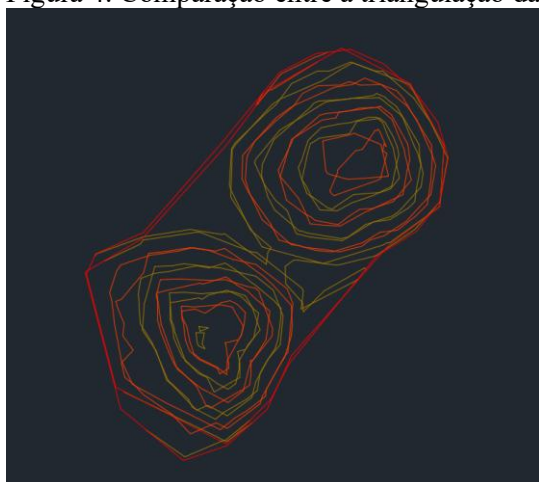


Figura 5. Sobreposição das curvas de nível da pilha A obtida por diferentes métodos.

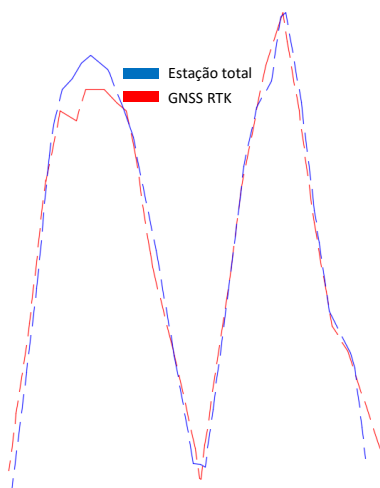


Figura 6. Sobreposição dos perfis longitudinais da pilha A obtidas por diferentes métodos.

Na Pilha B, comparando estação total, laser scanner terrestre e UAS, o laser scanner terrestre foi adotado como referencial, sendo a pilha ilustrada na Figura 7. Os resultados da Tabela 9 mostram que o volume obtido com UAS e calculado no Civil 3D atingiu 96,07% do valor de

referência, enquanto o valor estimado no DroneDeploy atingiu 90,53%. A estação total, por sua vez, alcançou 87,45% do referencial. O UAS sem GCP também apresentou desempenho expressivo, com 95,34% no Civil 3D e 91,75% no DroneDeploy.



Figura 7. Pilha B.

Tabela 9. Comparação entre os volumes da pilha B obtidos por diferentes métodos.

Equipamento	Método de cálculo	Volume (m³)	Relação (%)
Laser Terrestre	Civil 3D	53,75	100,00
Estação total	Civil 3D	47,00	87,45
UAS com GCP	Civil 3D	51,64	96,07
UAS com GCP	DroneDeploy	48,66	90,53
UAS sem GCP	Civil 3D	51,25	95,34
UAS sem GCP	DroneDeploy	49,32	91,75

O volume obtido pelo UAS sem pontos de controle, é um dado interessante, pois demonstra que, apesar de não garantir acurácia posicional, é possível extrair medidas com um bom grau de precisão. Essa observação destaca a capacidade do UAS em fornecer resultados volumétricos precisos, mesmo sem a utilização de pontos de controle, o que pode ser vantajoso em contextos em que a rapidez e a simplicidade operacional são prioritárias. Na Figura 8, é possível observar que os espaçamentos das linhas de triangulação variam significativamente entre os métodos: o UAS apresenta espaçamentos entre 5 cm e 25 cm, a

estação total entre 25 cm e 130 cm, e o laser terrestre entre 1 cm e 10 cm. Estas variações refletem a densidade de pontos capturados, com o laser terrestre fornecendo o maior nível de detalhamento, seguido pelo UAS, e a estação total com o menor detalhamento. Essas diferenças influenciam diretamente a acurácia e a qualidade dos modelos gerados, destacando a superioridade do laser terrestre e do UAS na captura de detalhes da superfície, enquanto a estação total requer uma coleta mais densa para resultados comparáveis, porém, o castrado de mais pontos implica em mais tempo de operação.

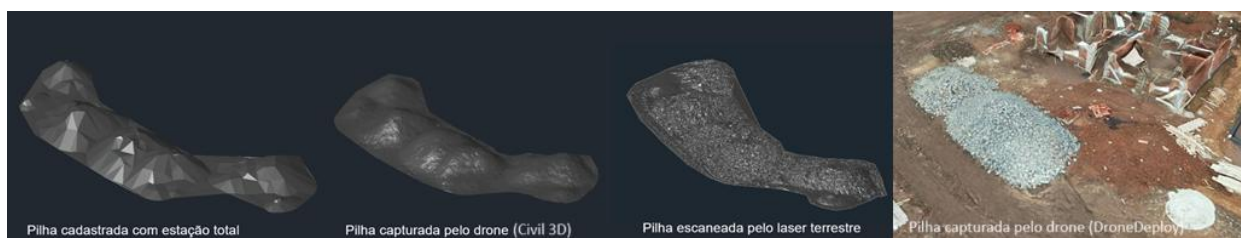


Figura 8. Comparação entre a triangulação das superfícies da pilha B obtidas por diferentes métodos.

A Figura 9 apresenta as curvas de nível da pilha B, espaçadas em 20 cm. Observa-se que, embora as curvas primárias e secundárias sigam um comportamento semelhante, as curvas obtidas com a estação total são mais angulares e possuem menos detalhes em comparação com as dos outros

métodos. A superfície capturada pelo UAS apresenta curvas mais suavizadas e consistentes, enquanto a superfície escaneada pelo laser terrestre apresenta o maior nível de detalhamento, com curvas muito mais densas.

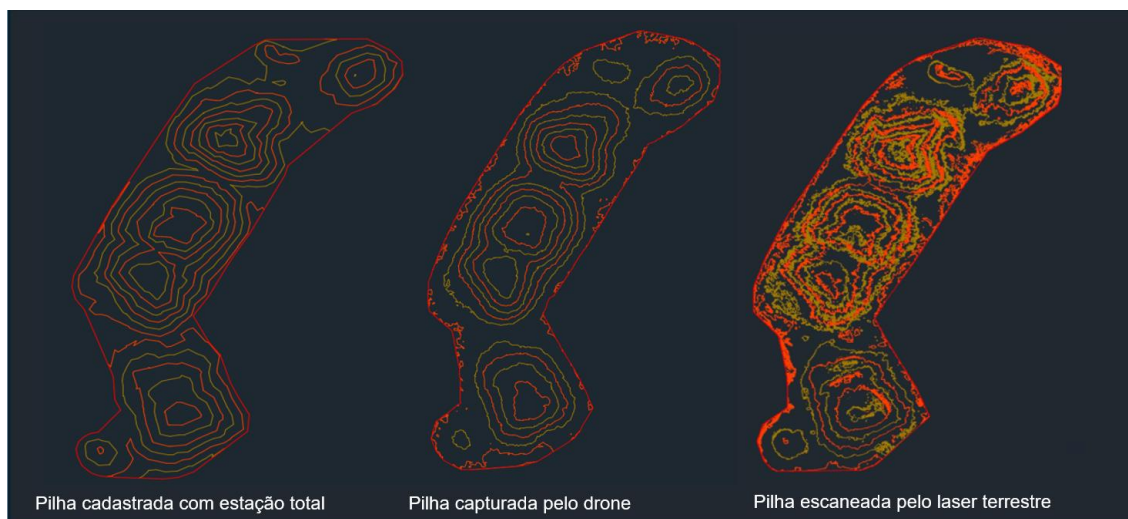


Figura 9. Sobreposição das curvas de nível da pilha B obtidas por diferentes métodos.

A Figura 10 apresenta a sobreposição dos perfis longitudinais. Observa-se que os perfis se assemelham, indicando alta concordância entre esses métodos. No entanto, a fotogrametria não atinge as cotas mais baixas em alguns declives, sugerindo limitações na captura de dados. Apesar disso, os resultados são satisfatórios, mostrando boa correspondência geral das feições. Esses resultados evidenciam que a fotogrametria com

UAS pode apresentar excelente desempenho volumétrico, mesmo quando o posicionamento absoluto não é suficientemente robusto. A explicação está no fato de que a estimativa de volume depende fortemente da capacidade do método em representar a geometria relativa da superfície, o que foi favorecido pela maior densidade de pontos do UAS em comparação com a estação total.

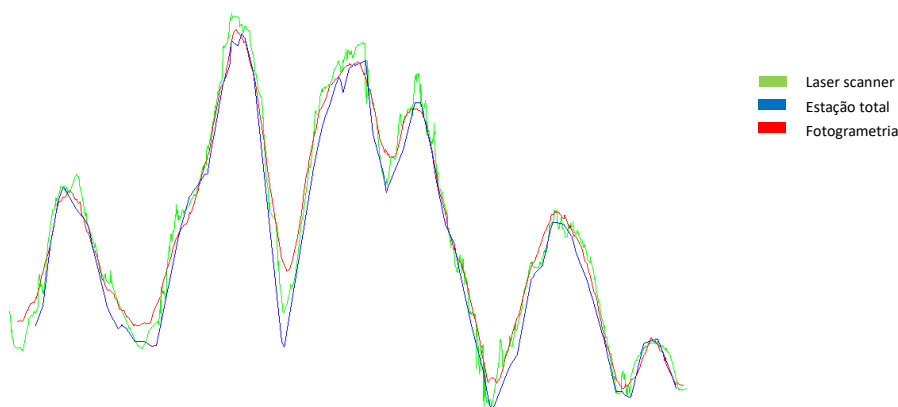


Figura 10. Sobreposição de Perfis Longitudinais da pilha B obtidos por diferentes métodos.

Na pilha C, levantada com estação total, UAS e o laser scanner aéreo, o volume obtido com o UAS atingiu 95,67% do referencial, enquanto a estação total alcançou 91,9%, como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Comparação dos volumes da pilha C obtidos por diferentes métodos.

Equipamento	Método de cálculo	Volume (m³)	Relação (%)
Laser scanner aéreo	Civil 3D	12.95	100
Estação total	Civil 3D	11.90	91,9
UAS	Civil 3D	12.39	95,67

A interpretação visual da triangulação das superfícies (Figura 11), da comparação das curvas de nível (Figura 12) e da sobreposição dos perfis longitudinais (Figura 13) confirma a maior riqueza geométrica dos produtos gerados por UAS e laser scanner em relação à estação total. Esses resultados reforçam a limitação da estação total na modelagem de superfícies mais complexas e explicam a discrepância volumétrica observada em relação aos métodos baseados em nuvens de pontos mais densas. Os perfis longitudinais reforçam essas observações, mostrando que, apesar de algumas limitações na captura de dados de picos pelo UAS, os resultados obtidos ainda são satisfatórios.

De modo geral, os resultados volumétricos mostram que a fotogrametria com UAS constitui alternativa viável e eficiente para esse tipo de aplicação, sobretudo quando associada a processamento adequado e, preferencialmente, a

pontos de controle. Esse comportamento é coerente com estudos recentes que indicam que, em aplicações de volumetria e modelagem superficial, a qualidade da representação geométrica relativa pode ser mais determinante do que a acurácia posicional absoluta do conjunto. Isso ajuda a explicar por que, neste estudo, o UAS sem GCP ainda apresentou desempenho volumétrico elevado, mesmo sem garantir confiabilidade posicional no mesmo nível dos produtos controlados. Ao mesmo tempo, a diferença entre os resultados obtidos no Civil 3D e no DroneDeploy indica que a escolha do software e do fluxo de modelagem influencia diretamente o valor final estimado, o que também é compatível com a literatura recente sobre sensibilidade dos produtos fotogramétricos aos parâmetros de processamento e reconstrução.



Figura 11. Comparação entre a triangulação das superfícies da pilha C obtidas por diferentes métodos.

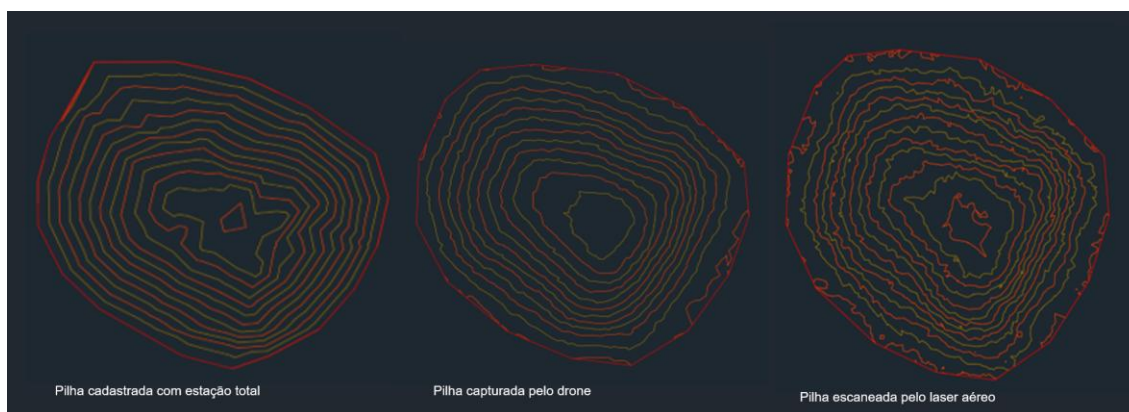


Figura 12. Comparação das curvas de nível da pilha C obtidas por diferentes métodos.

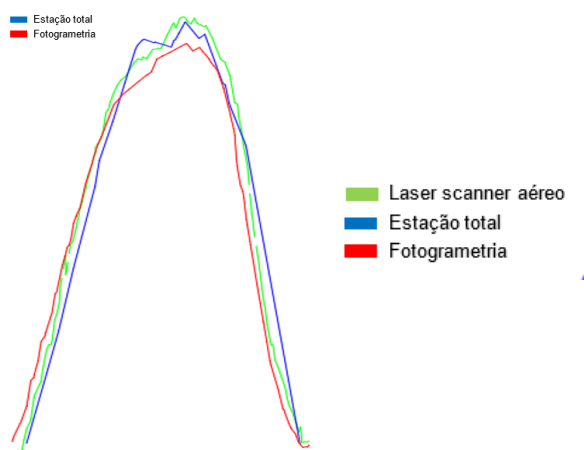


Figura 13. Sobreposição de perfis longitudinais da pilha C obtidos por diferentes métodos.

Detalhamento

Outro fator importante na seleção do tipo mais adequado de equipamento é o nível de detalhamento alcançado. O nível de detalhamento alcançado por cada tecnologia foi avaliado a partir da comparação entre nuvens de pontos obtidas por laser scanner terrestre, laser scanner aéreo e UAS. Foram considerados a densidade da nuvem, a identificação de elementos como edificações, postes e fiações, além da capacidade de penetração em áreas vegetadas. As diferenças visuais entre as nuvens geradas por cada método podem ser observadas na Figura 14.

Os resultados indicaram que o laser scanner terrestre apresentou o maior nível de detalhamento, representando com maior fidelidade

elementos finos, como postes, fiações e geometrias de meio-fio. O UAS e o laser scanner aéreo, embora mais eficientes em cobertura e produtividade, não alcançaram o mesmo nível de representação desses elementos, em razão da menor densidade pontual em superfícies de pequena dimensão ou geometrias muito delgadas. Em contrapartida, ambos se mostraram eficazes na representação de edificações, sobretudo nas coberturas. No caso do UAS, além da nuvem de pontos, a geração de ortomosaico e modelo tridimensional, ilustrados na Figura 15, amplia as possibilidades de interpretação visual e análise espacial.

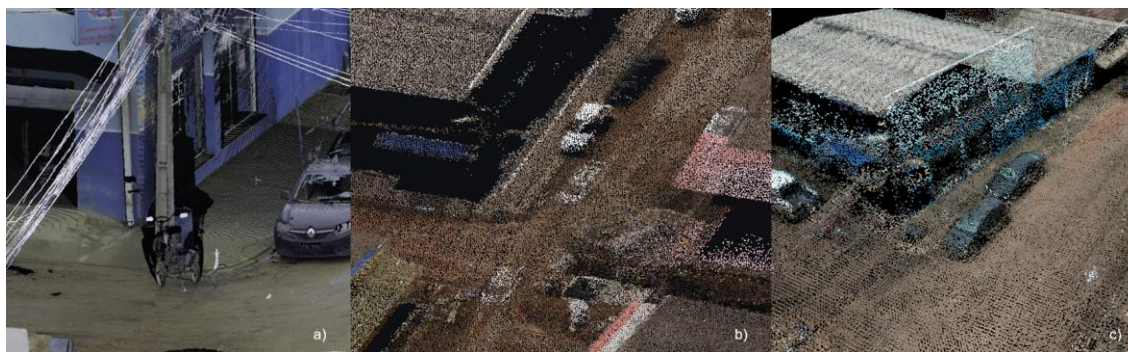


Figura 14. a) Laser scanner terrestre, b) Laser scanner aéreo, c) UAS.

Na análise dos perfis transversais de vias, observou-se que os métodos aéreos não reproduziram o meio-fio com a mesma fidelidade do laser scanner terrestre, conforme ilustrado na Figura 16. Mesmo com ajustes no planejamento do voo do laser scanner aéreo, como redução da altura para aumento da densidade de pontos, o

detalhamento permaneceu inferior ao do escaneamento terrestre, como mostrado na Figura 17. Isso evidencia uma limitação inerente ao formato de captura aérea para elementos muito pequenos ou com descontinuidades geométricas acentuadas.

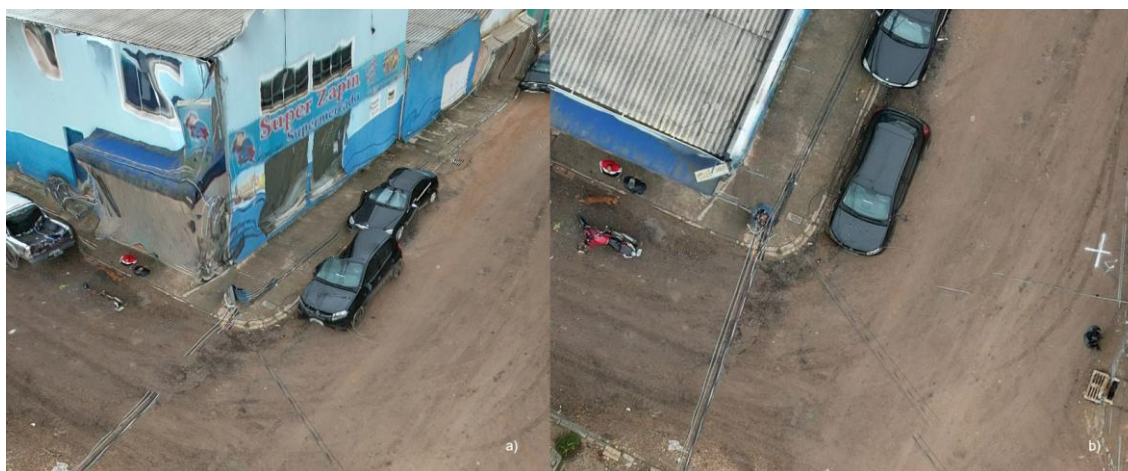


Figura 15. a) Modelo tridimensional da captura com o UAS, b) Ortomosaico gerado da captura com o UAS.

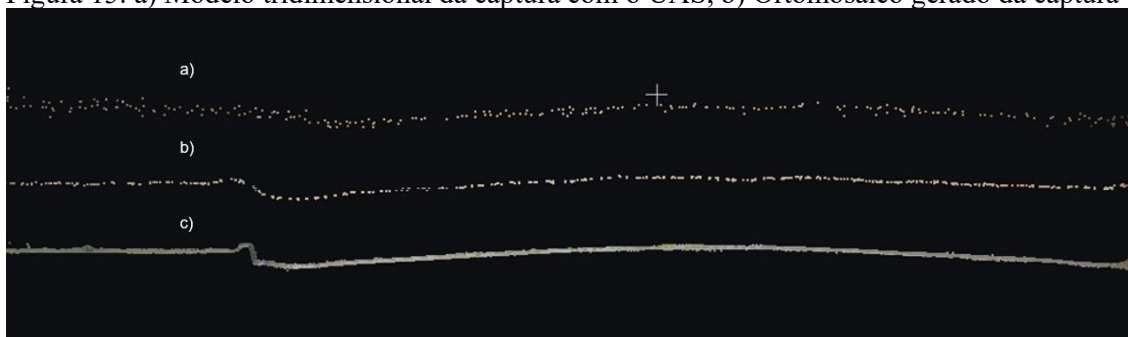


Figura 16. (a) Laser scanner aéreo a 90 metros (b) UAS a 40 metros (c) Laser scanner terrestre no nível do solo.

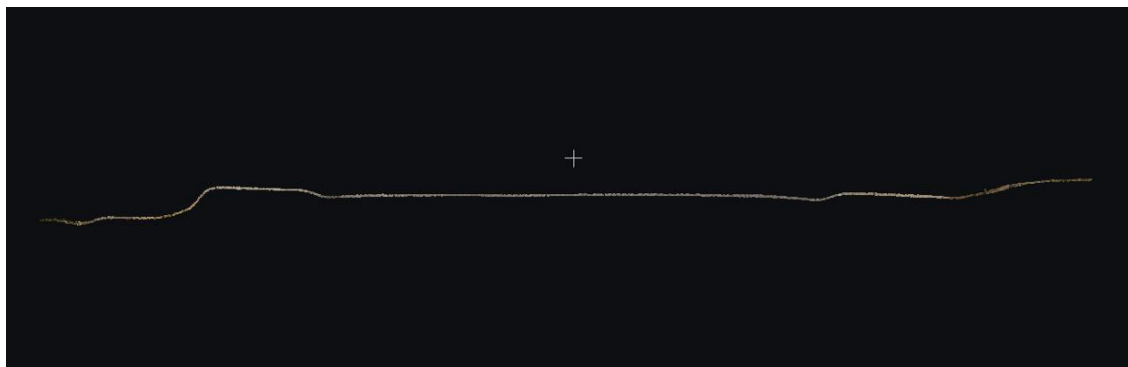


Figura 17. Perfil transversal de meio fio com laser scanner aéreo a 40 metros.

Outro ponto avaliado foi o comportamento dos levantamentos aéreos em áreas com vegetação densa e sua capacidade de penetração, visando obter o máximo de informações do solo para gerar o MDT. O laser scanner aéreo mostrou desempenho superior na obtenção de informações do solo, uma vez que os feixes laser conseguem penetrar entre as copas das árvores, enquanto o UAS permaneceu limitado à superfície visível. Essa diferença pode ser observada na Figura 18. As discrepâncias podem ser observadas na tabela e no mapa hipsométrico e da Figura 19, destacadas na coluna “Área”, nota-se discrepâncias significativas nas áreas cobertas por cada escala de elevação entre os levantamentos. Isso é devido à interpolação com as bordas da região, que ocorre de forma mais frequente no ortomosaico, por causa das lacunas que aparecem na cobertura ocasionada pela falta de informações do solo. Os resultados

confirmam que, embora ambos os métodos representem tendências gerais do relevo, o laser scanner aéreo é mais adequado quando o objetivo é gerar modelos digitais do terreno em áreas vegetadas com maior confiabilidade. Esses resultados convergem com Sestras et al. (2025), que destacam a complementaridade entre fotogrametria UAV e LiDAR: a primeira tende a apresentar melhor desempenho em superfícies abertas e texturizadas, enquanto o LiDAR se sobressai em áreas cobertas por vegetação, em razão da capacidade de penetrar entre as copas e recuperar informações do terreno. De forma convergente, Tamimi e Toth (2024) mostraram que o UAV LiDAR pode atingir desempenho competitivo em comparação com a estação total em contextos de levantamento, especialmente em cenários com obstrução visual e cobertura vegetal.

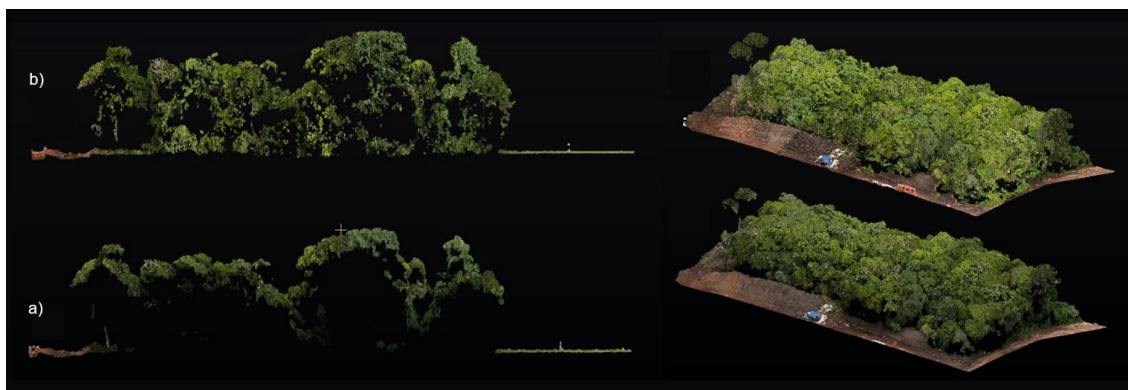
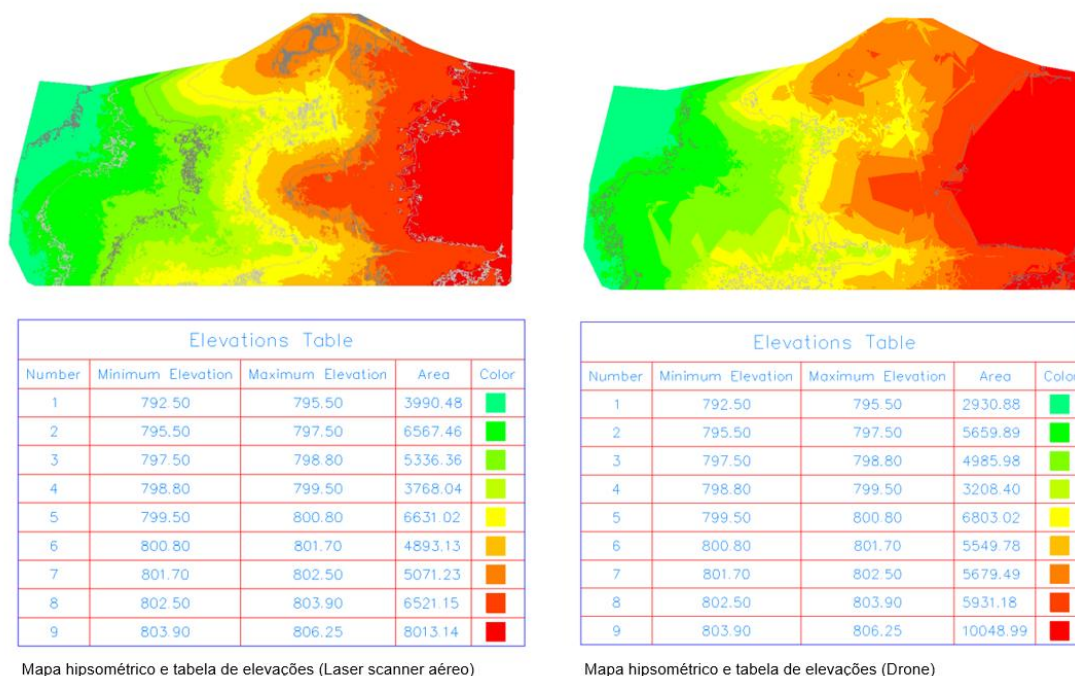


Figura 18. Perfil longitudinal de vegetação (a) UAS, (b) Laser scanner aéreo.



Mapa hipsométrico e tabela de elevações (Laser scanner aéreo)

Mapa hipsométrico e tabela de elevações (Drone)

Figura 19. Mapa hipsométrico do MDT e tabela de elevações.

Tempo, custo e equipe

A análise do tempo, custo e equipe necessária para cada um dos levantamentos é crucial nos serviços de engenharia, pois impacta diretamente o cronograma e orçamento da operação. Assim, este estudo avaliou esses aspectos para cada levantamento realizado, proporcionando uma melhor perspectiva sobre a operação de cada tecnologia. O UAS, destacou-se pela rapidez na aquisição de dados, cobrindo uma área de 23 ha em 40 minutos de voo, com aproximadamente 3 horas de processamento. Quando não há necessidade de implantação de pontos de controle, o ganho operacional é ainda maior. Na necessário o uso de pontos de controle, deve-se considerar o tempo adicional do levantamento dos pontos com GNSS RTK/estação total ou outro equipamento para finalização da operação. Para este estudo, a materialização em campo com tinta branca durou aproximadamente 1 hora, podendo variar dependendo da localidade e da quantidade de pontos implantados. Esta operação foi executada por um piloto, responsável por conduzir o voo de UAS e um observador prestando assistência. Não se fez necessária a locação do UAS pois este já estava disponível na obra onde foi realizado o estudo, no entanto, a diária de um modelo como o Phantom 4 Pro V2.0 pode variar em torno de R\$ 600,00.

O GNSS RTK e a estação total apresentaram alta confiabilidade, porém

demandaram mais tempo de campo. O GNSS RTK concluiu o levantamento em 3 h, enquanto a estação total demandou 4 h, além de exigir mão de obra mais especializada. O GNSS apresentou um ganho em agilidade para 30%, em relação a complexidade operacional da estação total. A operação com a estação total demandou uma equipe composta por um topógrafo e auxiliar de topógrafo, enquanto a operação com o GNSS RTK necessitou de um operador treinado e um auxiliar. Em termos de custos, não se fez necessária a locação da estação total pois o equipamento já estava disponível no local, porém, sua diária gira em torno de R\$200,00 enquanto a diária do GNSS RTK é em média R\$300,00. Ambos os métodos não necessitaram de processamento adicional, pois os dados exportados estavam prontos para uso.

O laser scanner terrestre apresentou alta qualidade geométrica e riqueza de detalhes, mas com elevado tempo de campo e processamento, além de custo mais alto. demandou aproximadamente 7 horas para concluir o escaneamento de 75 cenas, englobando uma área de 1,8 hectares, com tempo total de processamento de 6 horas. A diária do equipamento utilizado é em torno de R\$ 1850,00, mas é possível encontrar outros modelos no mercado por valores mais acessíveis, girando em torno de R\$ 700,00. Este método não gera uma nuvem de pontos georreferenciada automaticamente, necessitando de pontos de controle para ajuste posicional dos dados. A equipe para realizar este levantamento

consistiu em um operador qualificado e um auxiliar prestando assistência.

O laser scanner aéreo embarcado em um UAS tem tempo de voo similar à operação com o UAS comum. Na área em questão, com uma altura de 90 metros, o sobrevoo durou 25 minutos. Esse escaneamento foi realizado em conjunto com o GNSS RTK para georreferenciar a nuvem de pontos, com a base permanecendo em rastreio por pelo menos 2 horas e durante todo o voo. O tempo de processamento é variável, podendo durar 1 hora em casos que apenas um voo seja executado sem nenhum transporte de base, já operações mais complexas, com múltiplos voos e transporte para diferentes bases, demanda mais tempo de processamento, podendo se estender para mais de um dia. Este equipamento não está disponível para locação, sendo necessário contratar o serviço, o que o torna a opção mais cara. Neste caso, o levantamento de cada hectare custou R\$ 88,88, mas o valor varia conforme a região e a complexidade do levantamento. Por se tratar de um serviço contratado, os materiais não são obtidos de imediato, dependendo do prazo estipulado em escopo, que neste caso foi de 15 dias. O piloto é o operador chave para esta atividade, e além, um auxiliar para ser observador da base do GNSS RTK, caso necessário.

Analisando os equipamentos, o UAS se destaca pela rapidez, facilidade de operação e custos reduzidos, sendo indicado para levantamentos que exigem agilidade e acurácia. O GNSS RTK também se sobressai pela facilidade de manuseio e pela alta precisão dos seus dados, demonstrando ser uma combinação eficaz quando utilizado em conjunto com o UAS. A estação total, embora muito precisa, necessita de mão de obra especializada e demanda mais tempo na realização das operações, sendo recomendada quando o

GNSS RTK não pode ser utilizado devido a interferências de sinal. O laser scanner aéreo, por sua vez, mostrou boa produtividade e alto potencial para áreas extensas e vegetadas, porém com custo operacional elevado e dependência de serviço especializado. O laser scanner terrestre, apesar do maior tempo de processamento, oferece alta acurácia e detalhamento, ideal para áreas complexas que exigem uma representação realística e milimétrica, mas desaconselhado para o monitoramento de obras dinâmicas com alterações diárias. Esses resultados demonstram que a escolha da tecnologia não depende apenas da acurácia, mas também do equilíbrio entre custo, produtividade e objetivo do levantamento.

1. Síntese comparativa dos levantamentos topográficos

A Tabela 11 reúne, de forma sintética, os principais parâmetros operacionais e técnicos dos métodos avaliados, incluindo custos, tempo de operação, equipe necessária, entregáveis, acurácia e indicação de aplicação. Neste estudo, se considerou levantamentos em uma área de 2 hectares, predominantemente urbana. Esta tabela inclui informações detalhadas sobre custos, tempo de operação (coleta e processamento), equipe necessária, acurácia dos dados, entregáveis e indicações, oferecendo uma visão completa do desenvolvimento do processo. As estimativas apresentadas na tabela baseiam-se tanto no estudo em questão quanto em outros levantamentos realizados pela TPF Engenharia e é importante evidenciar que os tempos de operação e os custos não consideram a mobilização da equipe e do equipamento, uma vez que esses fatores variam de acordo com a área de aplicação.

Tabela 11. Resumo dos padrões de operação.

Método	Área levantada, tempo de coleta e de processamento	Custo do(s) equipamento(s)	Equipe necessária	Entregável(is)	Acurácia dos dados (valores obtidos no estudo)	Indicação de aplicação
UAS (sem GCP)	2 ha em 15 min e 1 hora	R\$ 600,00 (uma diária)	Um piloto e um observador	Nuvem de pontos, ortomosaico, modelos digitais de superfície e terreno, curvas	Acurácia planialtimétrica: Diferença média de 1,75 m no eixo x, 2,78 m no eixo y e 82,62 m no eixo z. Extração de comprimentos:	Levantamento de pequenas a grandes áreas com rapidez e sem necessidade de garantia de alta acurácia

				de nível, entre outros	Diferença média de 1,43 e 5,15 cm nas medidas horizontais e verticais, respectivamente Acurácia volumétrica: Acurácia de 95,34% pelo Civil 3D e 91,75% pelo DroneDeploy	
UAS (com GCP a partir do GNSS RTK)	2 ha em 15 min de voo e 2 horas de coleta dos GCP e 3 hora para processamento	R\$ 600,00 (uma diária do UAS) + R\$330,00 (uma diária do GNSS)	Um piloto para operar o UAS e o GNSS RTK e um observador do UAS e da base do GNSS RTK	Nuvem de pontos, ortomosaico, modelos digitais de superfície e terreno, curvas de nível, entre outros	Acurácia planialtimétrica: Diferença média de 2,22 cm Extração de comprimentos: Diferença média de 1,09 e 4,98 cm nas medidas horizontais e verticais, respectivamente Acurácia volumétrica: Com o Civil 3D, acurácia de 96,07% e 95,67%, a depender da pilha analisada. Já com o DroneDeploy, para a última delas, acurácia de 90,53%	Levantamento de pequenas a grandes áreas com rapidez e alta acurácia, mas que não englobem matas fechadas e necessidade de extração de detalhamentos como meio fio de vias
UAS (com GCP a partir da estação total)	2 ha em 15 min de voo e 3 horas de coleta dos GCP e 3 hora para processamento	R\$ 600,00 (uma diária do UAS) + R\$200,00 (uma diária da estação total)	Um piloto, um topógrafo e um auxiliar de topógrafo para atuar como observador do UAS e operação da estação total	Nuvem de pontos, ortomosaico, modelos digitais de superfície e terreno, curvas de nível, entre outros	Acurácia planialtimétrica: Diferença média de 2,80 cm Extração de comprimentos: Equiparado ao resultado do UAS com GCP a partir de GNSS RTK Acurácia volumétrica: Equiparado ao resultado do UAS com GCP a partir de GNSS RTK	Levantamento de pequenas a grandes áreas com rapidez e alta acurácia, mas que não englobem matas fechadas e necessidade de extração de detalhamentos como meio fio de vias
Laser Scanner Terrestre	2 ha (90 cenas) em 7,5 horas e 8 hora para processamento	R\$3.206,50 (duas diárias)	Um operador e um auxiliar	Nuvem de pontos e tour virtual	Referencial verdadeiro adotado. Na especificação do fabricante afirma-se ter entre 1,9 e 2,9 mm de acurácia	Levantamento de pequenas e médias áreas com alta acurácia e riqueza de detalhes como meio fio de vias

Laser Scanner Aéreo	2 ha em 15 min de voo mais 2 horas de rastreamento com GNSS e 1 hora para processamento	R\$6.000,00 (valor mínimo de serviço)	Um piloto especializado	Nuvem de pontos	Referencial verdadeiro adotado. Na especificação do fabricante afirma-se ter entre 2 e 3 cm de acurácia	Levantamento de pequenas a grandes áreas com rapidez, alta acurácia e riqueza de detalhes, podendo englobar matas fechadas, mas não detalhamentos como meio fio de vias
GNSS RTK	2 ha (600 pontos, entre pontos de meio-fio, postes, árvores, bueiros e portões) em 8 horas, sem necessidade de processamento	R\$330,00 (uma diária)	Um operador e um observador da base	Coordenadas em arquivo TXT ou DXF	Acurácia planialtimétrica: Diferença média de 3,02 cm comparando com a estação total Acurácia volumétrica: Acurácia equivalente a estação total, atingido uma diferença de apenas 0,48% entre os métodos	Levantamento de pequenas a grandes áreas com alta acurácia, mas com limitações na extração de volumetria e em áreas fechadas
Estação Total	2 ha (600 pontos, entre pontos de meio-fio, postes, árvores, bueiros e portões) em 10,5 horas, sem necessidade de processamento	R\$200,00 (uma diária)	Um topógrafo e um auxiliar de topógrafo	Coordenadas em arquivo TXT ou DXF	Acurácia volumétrica: Acurácia de 87,45% e 91,9%, a depender da pilha analisada	Levantamento de pequenas a grandes áreas com alta acurácia, mas com limitações na extração de volumetria

A síntese dos resultados evidencia que não existe um método universalmente superior, mas técnicas mais adequadas a diferentes finalidades. O UAS, especialmente quando associado a GCP e GNSS RTK, mostrou-se altamente eficiente para levantamentos de pequenas áreas, com rapidez e boa acurácia. O GNSS RTK apresentou excelente desempenho para apoio geodésico e levantamento planialtimétrico. A estação total permaneceu confiável, mas menos eficiente em produtividade e menos capaz de representar superfícies complexas. O laser scanner terrestre foi a melhor opção para

alto detalhamento e geometrias complexas, enquanto o laser scanner aéreo se destacou em levantamentos de áreas vegetadas e na obtenção de MDT com maior qualidade.

A combinação entre métodos mostrou-se especialmente promissora. O uso conjunto de UAS e GNSS RTK, por exemplo, aliou agilidade operacional e controle posicional. De forma semelhante, a complementaridade entre fotogrametria e Laser scanner permitiu mitigar limitações específicas de cada técnica. Assim, a escolha da metodologia deve considerar o objetivo

do projeto, o nível de detalhamento requerido, a necessidade de acurácia posicional ou relativa e os recursos disponíveis, de modo a garantir maior eficiência e melhor custo-benefício nas aplicações de engenharia.

Discussões

Os resultados confirmaram que a utilização de pontos de controle é essencial para aumentar a acurácia dos modelos gerados. Comparando-se os ortomosaicos com e sem pontos de controle, observa-se uma redução significativa nos desvios, especialmente no plano vertical, em que as diferenças médias foram 0,32 cm menores no modelo com GCP. Essa melhoria é consistente com estudos que destacam o impacto positivo do ajuste geométrico em ortomosaicos processados, Štroner (2021), por exemplo, evidenciou que o uso de pontos de controle pode reduzir os erros verticais para menos de 5 cm em levantamentos realizados com UAS RTK.

Em relação às medições verticais, estas apresentaram desvios maiores em comparação às horizontais, um resultado previsto devido à posição ortogonal das câmeras durante o levantamento aéreo. Essa limitação pode ser mitigada com a captura de imagens oblíquas conforme recomendado pela literatura, permitindo uma melhor representação tridimensional dos elementos levantados. Esse resultado também foi observado em experimentos que compararam UAS RTK e sistemas GNSS, nos quais os ajustes na angulação das câmeras resultaram em ganhos de até 30% na precisão das medições verticais (Niu, Z, 2024).

A análise de tempo e custo evidenciou que o UAS se destaca pela rapidez e baixo custo operacional. A coleta de dados em uma área de 23 hectares foi concluída em 40 minutos, com um tempo de processamento de 3 horas. Em comparação, o levantamento com a estação total demandou 4 horas apenas para a coleta de dados, destacando a eficiência das técnicas aéreas. Um estudo paralelo relatou eficiência semelhante, no qual UAS RTK cobriram 1 hectare em menos de 20 minutos com desvios inferiores a 4 cm na planimetria Barry e Coakley (2013); Furby e Akhavian (2024). No entanto, o uso do UAS sem pontos de controle também se mostrou vantajoso para aplicações que priorizam rapidez em detrimento de alta precisão. Além disso, ajustes como voos mais baixos e configurações otimizadas de câmera podem melhorar a densidade de pontos capturados, aprimorando a qualidade dos modelos gerados.

Por fim, a escolha do método deve considerar o objetivo do levantamento. As diferenças de densidade de pontos entre os métodos analisados, por exemplo, reforçam a importância de avaliar as demandas específicas de cada levantamento. O laser scanner terrestre é recomendado para detalhes milimétricos, enquanto o UAS oferece um equilíbrio entre detalhamento e eficiência em levantamentos de grande escala. Estudos recentes recomendam UAVs RTK para projetos que exigem precisão moderada e rapidez. Em contraste, laser scanners terrestres são preferíveis para áreas com necessidade de detalhes milimétricos ou vegetação densa, devido à sua capacidade de penetração e densidade de pontos significativamente maior (Niu, Z, 2024).

Conclusões

1. A escolha da metodologia de levantamento topográfico deve considerar o equilíbrio entre acurácia, custo, tempo de operação e nível de detalhamento requerido, uma vez que não existe um método universalmente superior para todas as aplicações.
2. O uso de pontos de controle melhorou significativamente a acurácia dos produtos fotogramétricos, enquanto os ortomosaicos processados sem GCP não apresentaram confiabilidade posicional compatível com aplicações que exigem controle geométrico rigoroso.
3. O levantamento com UAS apresentou elevada eficiência operacional e bom desempenho na extração de medidas horizontais e na estimativa volumétrica, constituindo alternativa viável para levantamentos de pequenas e grandes áreas, especialmente quando associado a GCP e GNSS RTK.
4. As medições verticais derivadas da fotogrametria mostraram maior sensibilidade a limitações geométricas do levantamento, indicando a necessidade de ajustes operacionais, como redução da altura de voo e aquisição de imagens oblíquas, quando se busca maior confiabilidade altimétrica.
5. O GNSS RTK apresentou desempenho confiável no apoio geodésico e no levantamento planialtimétrico, com resultados próximos aos da estação total e com maior agilidade operacional.
6. A estação total permaneceu como método confiável para levantamentos de precisão, porém mostrou menor eficiência operacional e menor capacidade de representação de

superfícies complexas quando comparada às metodologias baseadas em nuvens de pontos densas.

7. O laser scanner terrestre foi o método que proporcionou maior nível de detalhamento e melhor representação de geometrias complexas e elementos finos, sendo o mais indicado para levantamentos que exigem alta fidelidade espacial.
8. O laser scanner aéreo demonstrou superioridade na obtenção de informações do terreno em áreas com vegetação densa, evidenciando vantagem em relação à fotogrametria quando o objetivo é gerar modelos digitais do terreno com maior consistência nessas condições.
9. A integração entre diferentes tecnologias mostrou-se a estratégia mais promissora, pois permite combinar rapidez, controle posicional, detalhamento e capacidade de representação do terreno, contribuindo para levantamentos mais eficientes e adequados às diferentes demandas da engenharia.
10. A integração entre metodologias mostrou-se vantajosa, especialmente pela associação entre UAS e GNSS RTK, que permitiu aliar rapidez na aquisição dos dados e elevada precisão posicional.
11. O fluxo de processamento influenciou diretamente os resultados obtidos, sobretudo nas estimativas volumétricas, evidenciando que a escolha do software também deve ser considerada na avaliação técnica e operacional dos levantamentos.

De modo geral, a escolha da tecnologia mais adequada deve considerar a natureza do projeto, o nível de detalhamento requerido, a acurácia necessária e os recursos disponíveis, uma vez que essa decisão influencia diretamente a qualidade final do levantamento e sua viabilidade técnica e econômica.

Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem à TPF Engenharia e aos colaboradores envolvidos pelo apoio e empenho em viabilizar todos os equipamentos necessários ao estudo, além de disponibilizarem um ambiente propício para o desenvolvimento das atividades em campo. Agradecemos, ainda, à Universidade Federal de Pernambuco pelo suporte técnico e acadêmico, que foi fundamental para o sucesso deste estudo.

Referências

- Barry, P., & Coakley, R. (2013). Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, 2, 2731.
- Brasil. (1984). *Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984: Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional*. Diário Oficial da União.
- Brasil. Exército Brasileiro. Diretoria de Serviço Geográfico. (2016). *Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)* (EB80-N-72.004, 1. ed.). Brasília, DF.
- Chekole, S. D. (2014). Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner: A comparative study. *KTH Royal Institute of Technology*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23262.92488>.
- Dai, L., Wang, J., Rizos, C., Han, S., Barbosa, E. de M., Monico, J. F. G., Alves, D. B. M., & de Oliveira, L. C. (2010). Integrity in RTK and network RTK positioning. *Journal of Geodesy*, 76(11–12), 589–605.
<https://doi.org/10.1590/s1982-21702010000400007>.
- Eker, R., Alkan, E., & Aydın, A. (2021). A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types. *European Journal of Forest Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.33904/ejfe.938067>.
- Furby, B.; Akhavian, R. A Comprehensive Comparison of Photogrammetric and RTK-GPS Methods for General Order Land Surveying. *Buildings* 2024, 14, 1863.
<https://doi.org/10.3390/buildings14061863>.
- Gu, L., Zhang, H., & Wu, X. (2024). Surveying and mapping of large-scale 3D digital topographic map based on oblique photography technology. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(1), 100772.
<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100772>.
- Jiang, Y., Gao, H., & Zhou, J. (2026). Reliable Automated Displacement Monitoring Using Robotic Total Station Assisted by a Fixed-Length Track. *Sensors*, 26(2), 1–18.
<https://doi.org/10.3390/s26020746>.
- Kevorkov, I. A., Parpura, D. I., Kurmachev, R. D., Priymenko, A. O., & Galstyan, A. M. (2017). Field research of total stations. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 12(1). <https://doi.org/10.22363/2312-797x-2017-12-1-47-57>.
- Kolkos, G., Stergiadou, A., Kantartzis, A., & Tselepis, A. J. (2022). Accuracy of topographical

- instruments and Unmanned Aerial Systems for mapping and surveying environmental projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1123, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1123/1/012015>.
- França, L., Santos, A. de P. dos, Freitas, I., Gavazza, S., & Sato, S. (2026). Avaliação da Acurácia posicional de Ortomosaicos e MDS gerados com UAS PPK segundo o PEC-PCD em Encostas Íngremes: Assessment of the Positional Accuracy of PPK-Based UAS Orthomosaics and DSM according to PEC-PCD over Steep Slopes. *Revista De Geociências Do Nordeste*, 12(1), 218–230. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2026v12n1ID42195>.
- Macedo, M., & Ferreira, B. (2023). Use of advanced technologies for topographic surveys in civil construction. *Journal of Management and Sustainability*, 13(2), 17. <https://doi.org/10.5539/jms.v13n2p17>.
- Mustafa, M. A., El-Turki, A. M., Rustum, I., Jabir, T. A., & El-Amaari, T. M. (2022). Topographic Surveying using Low-Cost Amateur Drones & 4K Ultra-High-Definition Videos. *Open Access Research Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.53022/oarjst.2022.4.2.0040>.
- Nadolnits, L., Levin, E., & Akhmedov, D. (2017). *Surveying Instruments and Technology* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781315153346>.
- Niu, Z., Xia, H., Tao, P., and Ke, T.: Accuracy Assessment of UAV Photogrammetry System with RTK Measurements for Direct Georeferencing, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, X-1-2024, 169–176, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-2024-169-2024>, 2024
- Park, J. K., & Park, D. W. (2015). Availability evaluation of the smart phone application for the topographic surveying. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(18).
- Park, J. K., & Park, D. W. (2015). Availability evaluation of the smart phone application for the topographic surveying. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(18).
- P Peterson, S., Lopez, J., & Munjy, R. (2019). Comparison of UAV imagery-derived point cloud to terrestrial laser scanner point cloud. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W5, 149–155. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-149-2019>.
- Sestras, P., Badea, G., Cornelia, A., Salagean, T., Roșca, S., Kader, S., & Remondino, F. (2025). Automation in Construction Land surveying with UAV photogrammetry and LiDAR for optimal building planning. *Automation in Construction*, 173(February), 106092. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106092>.
- Smith, M. W., & Vericat, D. (2015). From experimental plots to experimental landscapes: Topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1656–1671. <https://doi.org/10.1002/ESP.3747>.
- Štroner, M., Urban, R., Seidl, J., Reindl, T., & Brouček, J. (2021). Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without GCPs. *Remote Sensing*, 13(7), 1336. <https://doi.org/10.3390/rs13071336>.
- Szypuła, B. (2024). Accuracy of UAV-based DEMs without ground control points. *GeoInformatica*, 28(1), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10707-023-00498-1>.
- Tamimi, R., & Toth, C. (2024). *Accuracy Assessment of UAV LiDAR Compared to Traditional Total Station for Geospatial Data Collection in Land Surveying Contexts. XLVIII*(June), 11–14.
- Tkáč, M., & Mésároš, P. (2019). Utilizing drone technology in the civil engineering. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 14(1), 27–37. <https://doi.org/10.1515/SSPJCE-2019-0003>.
- Toan, V. P., Phuc, L. Van, & Thuan, T. Van. (2025). Evaluation of Application of Flycam Technology in Topographical Survey: A Case Study of Mai Van Khai Road, Dong Thap Province. *Transportation Research Procedia*, 85, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.03.149>.
- Vaz, J. A., Cintra, J. P., & Almeida Filho, F. G. V. de. (2020). A Evolução do Ensino de Topografia e Áreas Afins na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72, 1051–1068. <https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56477>.
- Vu, N. Q., Nguyen, V. H., Ta, L. B., & Van, H. T. (2023). A comparative study of UAV lidar, UAV, and GNSS RTK on infrastructure survey. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1289, 012098. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1289/1/012098>.

Zhou, J., Luo, C., Jiang, W., Yu, X., & Wang, P.
(2022). Using UAVs and robotic total stations in
determining height differences when crossing
obstacles. *Measurement*, 188, 110372.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110372>.