



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LAURO VILELA DE CASTRO MAGALHÃES

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECISÃO POSICIONAL NAS COORDENADAS
PLANIALTIMÉTRICAS EM LEVANTAMENTOS POR SISTEMAS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS**

Uberlândia - MG

2026

LAURO VILELA DE CASTRO MAGALHÃES

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECISÃO POSICIONAL NAS COORDENADAS
PLANIALTIMÉTRICAS EM LEVANTAMENTOS POR SISTEMAS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Nassau de Nogueira Nardez

Uberlândia - MG

2026

LAURO VILELA DE CASTRO MAGALHÃES

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRECISÃO POSICIONAL NAS COORDENADAS
PLANIALTIMÉTRICAS EM LEVANTAMENTOS POR SISTEMAS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Uberlândia, _____ de _____ de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nassau de Nogueira Nardez – Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Raquel Naiara Fernandes Silva – Avaliadora

Engenheiro Me. Marcos Rodrigo Lopes Campos – Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional, pelo incentivo constante e por todos os sacrifícios que tornaram possível a realização desta jornada acadêmica. Sem vocês, nada disso seria possível.

À minha namorada Maria Julia, pelo carinho, pela paciência e pela compreensão nos momentos de dedicação aos estudos. Sua presença foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Ao meu amigo João Pedro, pela parceria, amizade, pelas conversas e por estar presente nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

Ao Professor Nassau de Nogueira Nardez, meu orientador, expresso minha mais sincera gratidão. Mais do que um orientador, foi um parceiro ao longo de todo este processo, sempre atencioso, disponível e disposto a ouvir.

Lauro Vilela de Castro Magalhães

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo realizar uma análise comparativa da precisão posicional obtida por meio de três distintas metodologias de levantamento: fluxo fotogramétrico UAS-SfM (Sistema Aéreo Não Tripulado com processamento *Structure from Motion*), nivelamento geométrico por visadas extremas e posicionamento por GNSS em modo RTK. A pesquisa visa avaliar a confiabilidade dos resultados gerados, com ênfase na acurácia alcançada, bem como nas potencialidades e limitações inerentes a cada técnica, considerando aspectos relacionados ao tempo de execução, custos operacionais e aplicabilidade em diferentes contextos práticos. A abordagem metodológica fundamenta-se na comparação direta entre os produtos oriundos de cada método, tomando como referência critérios de qualidade posicional e sua adequação às exigências de levantamentos topográficos que demandam elevado grau de rigor. Nesse sentido, os resultados obtidos têm o potencial de subsidiar a tomada de decisão quanto à escolha da técnica mais apropriada para diferentes cenários de aplicação, contribuindo, assim, para o aprimoramento das práticas profissionais no âmbito das geotecnologias e da topografia.

Palavras-chave: sistema aéreo não tripulado; GNSS RTK; nivelamento geométrico; acurácia posicional; fotogrametria.

ABSTRACT

This study aims to comparatively evaluate the positional accuracy of topographic surveys conducted using three distinct methods: UAS-SfM workflow (Unmanned Aircraft System with Structure from Motion photogrammetry), geometric leveling by extreme sights, and GNSS in RTK mode. The research assesses the reliability of the results obtained by each technique, with emphasis on the accuracy achieved and the operational advantages and limitations inherent to each method, considering aspects related to execution time, operational costs, and applicability in different practical contexts. The methodological approach is based on the direct comparison of the products generated by each method, using positional quality criteria as reference. The results are expected to support decision-making regarding the choice of the most appropriate technique for different survey scenarios, thereby contributing to the improvement of professional practices in the field of geotechnologies and topography applied to civil engineering.

Keywords: remotely piloted aircraft; GNSS RTK; geometric leveling; positional accuracy; photogrammetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Materialização da malha regular quadriculada	22
Figura 2: Malha regular quadriculada.....	22
Figura 3: Discrepâncias Planimétricas.....	28
Figura 4: Discrepância Altimétricas	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas planimétricas e suas discrepâncias (metros)	26
Tabela 2: Resultado do Teste t de Student pareado — Planimetria (UAS × RTK).....	29
Tabela 3: Coordenadas altimétricas e suas discrepâncias (metros)	30
Tabela 4: Discrepâncias Altimétricas em relação ao Nivelamento Geométrico	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DP	Desvio Padrão
EM	Erro Médio
GCP	<i>Ground Control Point</i> (Ponto de Apoio em Campo)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GRS80	<i>Geodetic Reference System</i> 1980 (Elipsoide de Referência)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Erro Quadrático Médio)
UAS	Sistema Aéreo Não Tripulado (UAS)
RTK	<i>Real-Time Kinematic</i> (Posicionamento Cinemático em Tempo Real)
SfM	<i>Structure from Motion</i> (Reconstrução Tridimensional por Movimento)
SIRGAS 2000	Sistema de Referência Geocentric para as Américas
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UTM	Universal Transversa de Mercator
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Veículo Aéreo Não Tripulado)
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Landing</i> (Decolagem e Pouso Vertical)
WebODM	<i>Web OpenDroneMap</i>
WGS84	<i>World Geodetic System</i> 1984

Sumário

1. Introdução	12
1.1 Objetivos.....	13
2. Referencial teórico	14
2.1 Sistema Aéreo Não Tripulado (UAS).....	14
2.1.1 Definição e classificação	14
2.1.2 Princípios da fotogrametria aérea e geração de produtos	15
2.1.3 Vantagens e limitações operacionais	16
2.2 Posicionamento por GNSS em Modo RTK.....	16
2.2.1 Princípios do posicionamento por satélite	16
2.2.2 Vantagens e limitações	17
2.3 Nivelamento Geométrico por Visadas Extremas.....	17
2.4 Testes Estatísticos	19
2.4.1 Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)	19
2.4.2 Teste t de Student pareado.....	19
2.4.3 Teste de Wilcoxon para amostras pareadas	20
2.4.4 RMSE	20
3. Metodologia.....	21
3.1 Coleta de dados	23
3.1.1 Nivelamento Geométrico por visadas extremas	24
3.1.2 Levantamento GNSS RTK	24
3.1.3 Levantamento UAS-SfM.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 Discrepâncias Planimétricas: UAS × GNSS RTK.....	26
4.1.2 Teste t de Student Pareado e Teste de Wilcoxon — Componente Planimétrica.....	29
4.2 Discrepâncias Altimétricas: GNSS RTK e uas × Nivelamento Geométrico	29
4.2.1 Teste de Normalidade (Shapiro-Wilk) — Componente Altimétrica.....	31

4.2.2 Teste t de Student Pareado e Teste de Wilcoxon — Componente Altimétrica.....	32
4.3 Comparativo e Discussão	33
5. Conclusão	35
6. REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias digitais nas últimas décadas tem transformado profundamente os métodos de coleta, processamento e análise de dados espaciais na engenharia civil. Nesse contexto, os Sistemas Aéreos Não Tripulados (ingl. *Unmanned Aircraft System* – UAS), são sistemas que utilizam os veículos aéreos não tripulados (ingl. *Unmanned Aerial Vehicle* – UAV), popularmente conhecidos como drones, emergem como ferramentas de grande relevância para o setor da construção, permitindo a execução de levantamentos topográficos com maior eficiência operacional e menor custo em comparação com métodos tradicionais (Tkáč; Mésároš, 2019; Fan; Saadeghvaziri, 2019).

Na engenharia civil, os UAS têm sido empregados em diversas frentes: inspeção de estruturas, monitoramento de obras, mapeamento topográfico de grandes áreas, geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) e de Terreno (MDT), além do monitoramento de progresso em canteiros de obras e inspeção de estruturas de difícil acesso (Tkáč; Mésároš, 2019). A capacidade de cobrir grandes áreas em curto espaço de tempo, com economia operacional significativa em relação aos métodos convencionais, torna esses sistemas especialmente atrativos para aplicações na construção civil que demandam levantamentos ágeis e de grande cobertura espacial (Fan; Saadeghvaziri, 2019).

A capacidade de capturar imagens de alta resolução em curtos intervalos de tempo, aliada à fotogrametria aérea e à técnica de reconstrução tridimensional *Structure-from-Motion* (SfM), permite a produção de nuvens de pontos densas e ortomosaicos georreferenciados com elevado detalhamento geométrico (Fan; Saadeghvaziri, 2019). Para o georreferenciamento dos modelos fotogramétricos, utilizam-se Pontos de Apoio em Campo (GCPs) levantados por métodos de alta precisão, como o GNSS RTK, cujos parâmetros de distribuição e qualidade são determinantes para a acurácia posicional final dos produtos gerados. A literatura recomenda o uso de no mínimo cinco GCPs bem distribuídos espacialmente, com pontos posicionados nas bordas e no centro da área de interesse, de modo a garantir controle geométrico homogêneo em toda a extensão do modelo (Tkáč; Mésároš, 2019). Porém, no presente trabalho, utilizou-se um drone equipado com tecnologia RTK (*Real-Time Kinematic*).

Entre os métodos topográficos tradicionais de alta precisão, destacam-se o nivelamento geométrico na altimetria e o posicionamento pelo Sistema Global de Navegação por Satélite (ingl. *Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) em modo RTK (*Real-Time Kinematic*). O nivelamento geométrico por visadas extremas é amplamente reconhecido pela elevada acurácia na determinação de cotas altimétricas, sendo frequentemente adotado como referência em

trabalhos de engenharia que exigem rigor posicional (ABNT, 1994; Veiga; Zanetti; Faggion, 2012). O GNSS RTK, por sua vez, permite a obtenção de coordenadas planimétricas e altimétricas em tempo real com precisão centimétrica, constituindo um método versátil e consolidado no campo topográfico (Monico, 2008; Tkáč; Mésároš, 2019).

Apesar das vantagens operacionais dos UAS, ainda persistem questionamentos acerca da confiabilidade e da acurácia posicional dos produtos gerados pelo fluxo UAS-SfM quando comparados a métodos de referência consolidados. Conforme apontam Fan e Saadeghvaziri (2019), a geometria de aquisição, a qualidade dos Pontos de Apoio em Campo (GCPs) e os parâmetros do ajuste fotogramétrico representam os principais fatores técnicos que limitam a acurácia posicional dos produtos UAS-SfM. A acurácia final dos produtos fotogramétricos depende diretamente da distribuição espacial e da qualidade das coordenadas dos GCPs levantados em campo, bem como da estratégia de ajuste de bloco (*bundle adjustment*) adotada (Tkáč; Mésároš, 2019), o que torna indispensável a avaliação rigorosa do desempenho posicional do fluxo UAS-SfM antes de qualquer recomendação técnica para contextos de maior exigência.

Diante desse cenário, embora estudos internacionais e nacionais já tenham abordado essa temática, há carência de investigações conduzidas em condições controladas que confrontem simultaneamente as componentes planimétrica e altimétrica do fluxo UAS-SfM com o GNSS RTK e o nivelamento geométrico, com tratamento estatístico rigoroso. O presente trabalho busca contribuir para o preenchimento dessa lacuna, fornecendo dados experimentais sistematizados e análises quantitativas que subsidiem a escolha metodológica mais adequada para diferentes contextos de levantamento topográfico na engenharia civil.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar e comparar a precisão posicional de levantamentos obtidos por meio do fluxo UAS-SfM (Sistema Aéreo Não Tripulado com processamento fotogramétrico baseado em *Structure-from-Motion*), GNSS em modo RTK e nivelamento geométrico por visadas extremas, executados sobre uma malha regular de 30 pontos no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. São objetivos específicos: (i) quantificar as discrepâncias planimétricas entre os produtos fotogramétricos do fluxo UAS-SfM e as coordenadas de referência do GNSS RTK; (ii) quantificar as discrepâncias altimétricas entre os três métodos em relação ao nivelamento geométrico como referência; (iii) identificar e caracterizar a natureza sistemática ou aleatória dos erros observados por meio de

testes estatísticos paramétricos e não paramétricos; e (iv) estabelecer uma hierarquia técnica de aplicabilidade entre os métodos avaliados, em função da acurácia posicional alcançada.

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico dos três métodos de levantamento e dos procedimentos estatísticos adotados. O Capítulo 3 descreve a metodologia de campo e de processamento dos dados. O Capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões das discrepâncias obtidas. O Capítulo 5 reúne as conclusões e as recomendações para estudos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento de geotecnologias nas últimas décadas tem ampliado significativamente o arsenal de ferramentas disponíveis para a realização de levantamentos topográficos na engenharia civil. Entre os avanços mais relevantes, destacam-se a consolidação do posicionamento por GNSS em modo RTK, a modernização dos instrumentos de nivelamento geométrico e, mais recentemente, a incorporação dos Sistemas Aéreos Não Tripulados (UAS) e do fluxo fotogramétrico UAS-SfM como plataformas de coleta e processamento de dados espaciais.

A compreensão dos fundamentos, das capacidades e das limitações de cada um desses métodos é condição indispensável para a análise comparativa proposta neste trabalho (Tkáč; Mésároš, 2019; Fan; Saadeghvaziri, 2019).

2.1 SISTEMA AÉREO NÃO TRIPULADO (UAS)

2.1.1 Definição e classificação

Os Sistemas Aéreos Não Tripulados (UAS, do inglês *Unmanned Aircraft System*) compreendem o sistema completo formado pela aeronave (UAV), a estação de controle em solo e o enlace de comunicação entre eles. Os UAVs, popularmente conhecidos como drones, são veículos aéreos que operam sem piloto a bordo, podendo ser controlados remotamente ou de forma autônoma por sistemas de programação de rotas (Fan; Saadeghvaziri, 2019). Seu tamanho varia de poucos centímetros a dezenas de metros, e a altitude de operação pode ir de alguns metros até mais de 3.000 metros, sendo que, para aplicações civis, a altitude é limitada a 120 metros pelas regulamentações vigentes (Fan; Saadeghvaziri, 2019).

Segundo Tkáč e Mésároš (2019), os UAVs podem ser classificados em quatro grandes categorias com base em sua plataforma aérea: (i) drones de asa fixa (*fixed-wing*), (ii) drones multirrotores, (iii) drones de rotor único (helicópteros) e (iv) drones híbridos VTOL (ingl. *Vertical Take-Off and Landing*). Cada categoria apresenta características distintas de autonomia de voo, capacidade de carga, facilidade operacional e adequação a diferentes tipos de levantamento topográfico.

Os drones multirrotores são os mais utilizados em aplicações de fotogrametria e mapeamento de curta distância, em razão de sua capacidade de pairar em um ponto fixo, facilidade de operação e flexibilidade de manobra. Em contrapartida, apresentam limitações de autonomia normalmente entre 20 e 30 minutos por bateria e não são indicados para cobertura de grandes áreas (Tkáč; Mésároš, 2019). Os drones de asa fixa, por sua vez, são mais eficientes energeticamente e permitem cobrir extensas áreas em menor tempo, porém exigem espaço para decolagem e pouso e não possuem capacidade de voo estacionário, o que os torna menos adequados para mapeamentos detalhados de estruturas (Tkáč; Mésároš, 2019).

2.1.2 Princípios da fotogrametria aérea e geração de produtos

A utilização de UAS para levantamentos topográficos é fundamentada nos princípios da fotogrametria aérea, que consiste na obtenção de informações métricas de objetos e superfícies a partir de imagens fotográficas capturadas de posições conhecidas no espaço. O processamento dessas imagens é realizado por algoritmos de reconstrução tridimensional baseados na técnica SfM (*Structure-from-Motion*) que reconhece automaticamente pontos homólogos entre imagens sobrepostas e estima simultaneamente a posição e orientação de cada câmera e a geometria tridimensional da cena. A partir de uma nuvem de pontos esparsa inicial, o SfM realiza a densificação para gerar uma nuvem de pontos densa, da qual são derivados o Modelo Digital de Superfície (MDS), o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o ortomosaico georreferenciado (Tkáč; Mésároš, 2019; Fan; Saadeghvaziri, 2019).

Para garantir a qualidade geométrica dos produtos fotogramétricos, é fundamental o uso de Pontos de Apoio em Campo (*Ground Control Points* - GCP), que são pontos de coordenadas tridimensionais conhecidas, levantados por método de referência como o GNSS RTK e distribuídos estrategicamente na área de levantamento. Os GCPs são utilizados no ajuste e georreferenciamento do modelo fotogramétrico, corrigindo erros sistemáticos de translação, rotação e escala acumulados durante o processamento SfM. A literatura recomenda o uso de no

mínimo cinco GCPs bem distribuídos espacialmente, com pontos posicionados nas bordas e no centro da área de interesse, de modo a garantir controle geométrico homogêneo em toda a extensão do modelo (Fan; Saadeghvaziri, 2019). A acurácia posicional final dos produtos está diretamente relacionada à qualidade das coordenadas dos GCPs, à sua distribuição espacial, à altura de voo, à resolução da câmera embarcada e às condições de sobreposição frontal e lateral das imagens adquiridas (Tkáč; Mésároš, 2019). Cabe ressaltar que drones que possuem o sistema RTK embarcado, pode não precisar dos GCPs para se obter os produtos fotogramétricos georreferenciados.

2.1.3 Vantagens e limitações operacionais

As principais vantagens dos UAS no contexto de levantamentos topográficos são a capacidade de cobrir grandes áreas em curto espaço de tempo, a geração de produtos cartográficos de alta resolução, a redução de custos operacionais e a possibilidade de acesso a áreas de difícil alcance ou de risco para operadores humanos (Tkáč; Mésároš, 2019). Estudos indicam que drones são capazes de mapear extensas áreas em 15 a 30 minutos, com economia de até 20 vezes em relação aos métodos convencionais de produção de mapas topográficos (Tkáč; Mésároš, 2019).

Por outro lado, as limitações dos UAS incluem a restrição de autonomia de voo, a suscetibilidade a condições climáticas adversas, como vento forte, chuva e névoa, a necessidade de regulamentação para operação no espaço aéreo e os desafios relacionados ao processamento de grandes volumes de dados. A nitidez e resolução das imagens obtidas constituem outro fator crítico que pode comprometer a acurácia dos produtos gerados, especialmente em terrenos com vegetação densa ou superfícies refletivas (Fan; Saadeghvaziri, 2019).

2.2 POSICIONAMENTO POR GNSS EM MODO RTK

2.2.1 Princípios do posicionamento por satélite

O Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) engloba os diferentes sistemas de posicionamento por satélite disponíveis atualmente, entre os quais se destacam o NAVSTAR-GPS (Estados Unidos), o GLONASS (Rússia), o Galileo (União Europeia) e o BeiDou (China). O princípio básico do GNSS consiste na determinação das coordenadas de um ponto a partir da

medição simultânea da distância entre o receptor e pelo menos quatro satélites em órbita, por meio do processamento de sinais de rádio transmitidos continuamente (Monico, 2008).

O modo RTK (*Real-Time Kinematic*) é uma técnica de posicionamento relativo em tempo real que utiliza uma estação de referência (base) com coordenadas conhecidas e um receptor móvel (*rover*). A base transmite correções diferenciais ao *rover* em tempo real, permitindo a determinação de coordenadas com precisão centimétrica, tipicamente entre 1 cm e 3 cm na planimetria e entre 2 cm e 5 cm na altimetria (Monico, 2008).

Um aspecto fundamental para a correta interpretação dos dados altimétricos obtidos por GNSS é a distinção entre altitude elipsoidal (h) e altitude ortométrica (H). O GNSS determina a posição do receptor em relação ao sistema de referência WGS84, no caso do Brasil, o sistema oficial é o SIRGAS2000 que é equivalente ao WGS84 e está baseado no elipsoide GRS80, fornecendo altitudes elipsoidais. O nivelamento geométrico, por sua vez, determina as altitudes ou cotas dependendo da referência utilizada, se o ponto conhecido fornecer altitude ortométrica, então as altitudes levantadas estarão referenciadas à superfície equipotencial do campo gravitacional terrestre denominada geoide, que representa aproximadamente o nível médio dos mares. Ou seja, as componentes altimétricas obtidas pelo nivelamento geométrico terão a mesma natureza que o ponto de referência inicial.

2.2.2 Vantagens e limitações

Entre as vantagens do GNSS RTK, destacam-se a alta velocidade de coleta de dados, a obtenção simultânea de coordenadas planimétricas e altimétricas, a dispensa de intervisibilidade entre pontos e a precisão centimétrica em tempo real. Em comparação com o levantamento topográfico por estações totais e com níveis no nivelamento geométrico, o GNSS RTK apresenta maior produtividade em campo, especialmente em áreas extensas ou com difícil acesso. As principais limitações do método estão relacionadas à necessidade de visibilidade do céu para recepção dos sinais dos satélites, ao efeito multicaminho e às variações na geometria da constelação de satélites disponíveis (MONICO, 2008).

2.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO POR VISADAS EXTREMAS

O nivelamento geométrico é o método topográfico de maior acurácia para a determinação de altitudes ortométricas, sendo amplamente adotado como referência em trabalhos de engenharia que demandam elevado rigor altimétrico (ABNT, 1994). O método

baseia-se na medição de diferenças de nível entre pontos consecutivos por meio de leituras em miras verticais graduadas, utilizando um nível óptico ou digital dotado de linha de visada horizontal. A altitude de um ponto é obtida pela expressão:

$$H_2 = H_1 + r - v$$

Em que H_1 é a altitude do ponto de partida (ré), H_2 é a altitude do ponto a determinar (vante), r é a leitura de ré na mira e v é a leitura de vante na mira. A diferença de nível entre dois pontos é dada por (GEMAEL, 1994):

$$\Delta H = r - v$$

A técnica de visadas extremas consiste em estacionar o nível em uma posição fixa e realizar a varredura dos pontos cujas cotas se deseja determinar, medindo a altura do instrumento (h_i) a partir de uma visada de ré inicial sobre um ponto de cota conhecida. O desnível entre os pontos é obtido pela expressão:

$$H_B = H_{RN} + L_{ré} - L_m$$

Sendo H_{RN} a altitude da referência de nível, $L_{ré}$ a leitura sobre a mira na referência e L_m a leitura sobre a mira no ponto vante (Veiga; Zanetti; Faggion, 2012). A grande vantagem desse método é o elevado rendimento operacional, pois com uma única instalação do equipamento é possível determinar as cotas de múltiplos pontos. Como inconveniente, o método não elimina os erros de curvatura terrestre, refração atmosférica e colimação do nível, diferentemente do método das visadas iguais. Adicionalmente, a necessidade de medir a altura do instrumento pode introduzir erros da ordem de 0,5 cm ou superiores, sendo esta limitação contornada pela adoção de uma visada de ré inicial sobre ponto de cota conhecida, o que permite determinar a altura do instrumento diretamente no referencial altimétrico utilizado (Veiga; Zanetti; Faggion, 2012).

Em razão dessas características, o nivelamento geométrico por visadas extremas é reconhecido pela ABNT NBR 13133 (1994) como método de referência para levantamentos topográficos que exigem rigor posicional na componente altimétrica. No presente trabalho, esse método foi adotado como referência para a avaliação das discrepâncias altimétricas obtidas pelo

GNSS RTK e pelo UAS, em virtude de sua reconhecida superioridade em termos de acurácia na determinação de cotas altimétricas.

2.4 TESTES ESTATÍSTICOS

2.4.1 Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)

Antes da aplicação de qualquer teste estatístico paramétrico, é metodologicamente necessário verificar se os dados analisados seguem distribuição normal, pois essa é uma premissa fundamental para a validade de testes como o t de Student. Para esse fim, o teste de Shapiro-Wilk é amplamente recomendado na literatura, sendo especialmente indicado para amostras de tamanho reduzido ($n \leq 50$), contexto no qual outros testes, como o de Kolmogorov-Smirnov, tendem a apresentar menor poder estatístico (Shapiro; Wilk, 1965).

O teste é aplicado sobre as diferenças (D) calculadas entre os pares de valores dos métodos comparados e não sobre os dados brutos e avalia duas hipóteses: a hipótese nula (H_0), de que os dados seguem distribuição normal, e a hipótese alternativa (H_1), de que os dados não seguem distribuição normal. O critério de decisão adota nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$): se o p-valor obtido for superior a 0,05, não há evidências para rejeitar H_0 e a normalidade é assumida, permitindo a aplicação de testes paramétricos. Caso contrário, recorre-se ao teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas como alternativa equivalente ao teste t (Shapiro; Wilk, 1965).

2.4.2 Teste t de Student pareado

O teste t de Student para amostras pareadas é um teste paramétrico utilizado para verificar se existe diferença sistemática estatisticamente significativa, denominada viés entre dois conjuntos de medições realizadas sobre os mesmos elementos amostrais. No contexto de estudos de acurácia posicional, o teste é aplicado sobre as discrepâncias d_i entre os valores obtidos pelo método avaliado e os valores de referência em cada ponto homólogo da malha, calculadas por (Gemael, 1994):

$$d_i = Cota_Referência_{,i} - Cota_Método_{,i}$$

A estatística do teste é dada pela razão entre a média das discrepâncias e o erro padrão da média:

$$t = \bar{d} / (sD / \sqrt{n})$$

Onde $\bar{d}$ é a média das diferenças entre os pares, s_D é o desvio padrão das diferenças e n é o número de pares analisados. A hipótese nula ($H_0: \bar{d} = 0$) estabelece que não há diferença sistemática entre os métodos. O valor calculado de t é comparado ao valor crítico da distribuição t de Student com $(n - 1)$ graus de liberdade para o nível de significância $\alpha = 0,05$. Se o p -valor for inferior a 0,05, rejeita-se H_0 , indicando a existência de viés sistemático entre os métodos comparados (Gemaël, 1994).

2.4.3 Teste de Wilcoxon para amostras pareadas

O teste de Wilcoxon para amostras pareadas é um teste não paramétrico utilizado como alternativa ao teste t de Student quando a hipótese de normalidade da distribuição das diferenças é rejeitada. O teste avalia se a mediana das diferenças entre pares de observações é significativamente diferente de zero, sem pressupor qualquer distribuição teórica específica para os dados (Shapiro; Wilk, 1965).

O procedimento consiste em calcular as diferenças absolutas entre cada par de observações, ordená-las em postos (ranks) e atribuir o sinal da diferença original a cada posto. A estatística do teste W corresponde à menor das somas de postos com mesmo sinal. As hipóteses avaliadas são: hipótese nula (H_0 : mediana das diferenças = 0), indicando ausência de viés sistemático entre os métodos; e hipótese alternativa (H_1 : mediana das diferenças $\neq 0$), indicando a existência de viés. O critério de decisão adota nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$): se o p -valor obtido for inferior a 0,05, rejeita-se H_0 , confirmando a presença de diferença sistemática estatisticamente significativa entre os métodos comparados (Shapiro; Wilk, 1965).

2.4.4 RMSE

O Erro Quadrático Médio, internacionalmente denominado RMSE (ingl. *Root Mean Square Error*), é a métrica mais amplamente empregada para quantificar a magnitude global dos erros em estudos de acurácia posicional. Por elevar ao quadrado cada discrepância antes de calcular a média, o RMSE pondera com maior peso os erros de maior magnitude, sendo mais

sensível à presença de valores discrepantes do que o Erro Médio simples. Sua fórmula é dada por (Gemael, 1994):

$$RMSE = \sqrt{[(1/n) \cdot \sum_i (d_i)^2]}$$

O RMSE é complementado pelo Erro Médio (EM) e pelo Desvio Padrão (DP), que juntos oferecem uma visão completa da qualidade posicional de um método. O EM quantifica a tendência sistemática dos erros, identificando a presença de viés; o DP mede a dispersão dos erros em torno da média, representando a componente aleatória; e o RMSE integra ambas as componentes em um único indicador. Quando $EM \approx 0$ e $RMSE \approx DP$, os erros são predominantemente aleatórios e o método não apresenta tendência sistemática relevante (Gemael, 1994).

3. METODOLOGIA

A sequência metodológica adotada neste trabalho consiste em analisar as componentes planimétricas obtidas com o GNSS RTK e o UAS, utilizando-se o GNSS RTK como referência e comparando com dois levantamentos com UAS, e também, a componente altimétrica, sendo o levantamento por meio do nivelamento geométrico por visadas extremas utilizado como referência para comparar com os levantamentos obtidos por GNSS RTK e mais dois levantamentos obtidos com o UAS.

Com os dados em mãos: (i) calcular as discrepâncias d_i entre cada método para as componentes planimétricas e altimétricas; (ii) verificar a normalidade das diferenças pelo teste de Shapiro-Wilk; (iii) aplicar o teste t de Student pareado quando confirmada a normalidade, ou o teste de Wilcoxon em caso contrário; e (iv) calcular o RMSE, o Erro Médio e o Desvio Padrão para cada método. Essa abordagem garante rigor estatístico na interpretação dos resultados e é consistente com as boas práticas metodológicas para estudos de comparação de técnicas de medição em topografia e geodésia.

A área de estudo está localizada próximo ao prédio da reitoria no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A pesquisa foi desenvolvida a partir de levantamentos executados sobre uma malha quadriculada regular previamente implantada. A área consiste em um gramado onde a malha foi materializada por piquetes com o auxílio de um teodolito eletrônico, balizas e trena conforme observa-se na Figura 1.

Figura 1: Materialização da malha regular quadriculada



Fonte: Autor (2026)

Posteriormente foram criados alvos com fita adesiva branca de forma a evidenciar cada ponto e torná-los foto identificáveis, com um total de 30 pontos com distâncias entre si de 4 metros, a malha pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Malha regular quadriculada



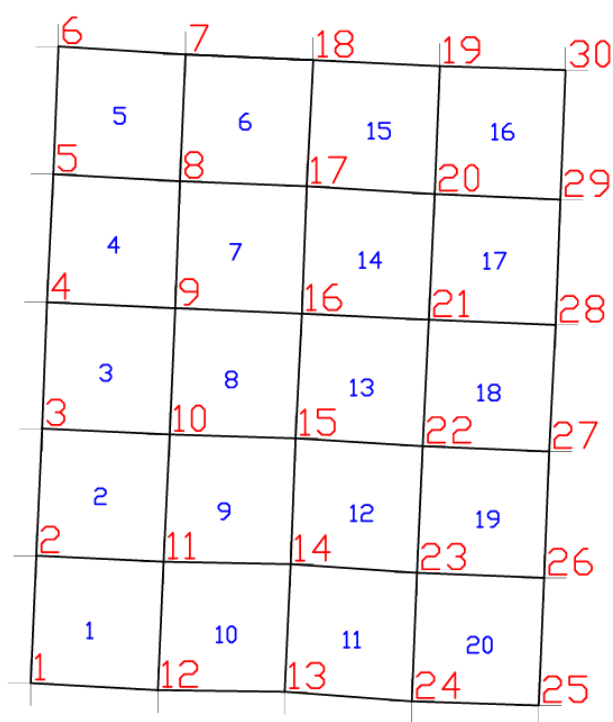
Fonte: Autor (2026)

Uma vez estabelecida a malha, foram coletadas as coordenadas planimétricas por GNSS RTK e UAS, obtidas no sistema de coordenadas na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). Para a análise de comparação das discrepâncias encontradas entre os métodos, utilizou-se como coordenadas de referência as obtidas pelo GNSS RTK, que foram comparadas com dois levantamentos UAS denominados Missão 1 e Missão 2.

Para as coordenadas altimétricas, as análises foram realizadas utilizando-se as altitudes obtidas por nivelamento geométrico de visadas extremas como referência, assim, obtiveram-se as discrepâncias em relação às altitudes obtidas com GNSS RTK e os duas missões obtidos por UAS. Todas as coordenadas estão referenciadas ao sistema geodésico de referência SIRGAS2000.

Na Figura 3 observa-se um esquema que representa a malha implantada e a numeração de identificação dos pontos.

Figura 3: Malha regular quadriculada



Fonte: Autor (2026)

3.1 COLETA DE DADOS

Os levantamentos foram realizados sequencialmente sobre a malha implantada em campo. Inicialmente, procedeu-se ao nivelamento geométrico por visadas extremas em todos

os 30 pontos, com a finalidade de determinar as altitudes de referência para a análise comparativa. Na sequência, foram coletadas as coordenadas planimétricas e altimétricas por meio de GNSS em modo RTK, com receptores configurados em base fixa em satélite.

Por fim, foram executadas duas missões com um veículo aéreo não tripulado (UAV), com planejamento prévio de trajetória, parâmetros adequados de sobreposição frontal e lateral das imagens.

3.1.1 Nivelamento Geométrico por visadas extremas

O levantamento altimétrico de referência foi realizado por meio do nivelamento geométrico por visadas extremas, aplicado em todos os 30 pontos da malha. Esse método foi adotado como base de comparação em razão de sua elevada precisão na determinação de altitudes, sendo amplamente reconhecido na literatura como referência para análises de acurácia em levantamentos topográficos na altimetria.

A execução consistiu na obtenção de leituras de ré e vante em miras graduadas posicionadas sobre os pontos da malha, com equipamento devidamente nivelado e ajustado. O procedimento foi conduzido de modo a minimizar erros aleatórios, com atenção à horizontalidade da linha de visada e à verticalidade das miras. As altitudes obtidas foram adotadas como valores de referência para a avaliação comparativa com os dados provenientes do UAS, e são apresentadas na seção de Resultados.

3.1.2 Levantamento GNSS RTK

O levantamento planialtimétrico foi realizado com o receptor GNSS Stonex S850 RTK, operando em modo RTK, técnica que possibilita a obtenção de coordenadas tridimensionais com acurácia centimétrica em tempo real, por meio da correção diferencial dos sinais de satélite transmitidos de uma base com coordenadas conhecidas a um receptor móvel (rover). Os pontos foram coletados apenas quando o instrumento acusava solução fixa das ambiguidades.

Os 30 pontos da malha foram levantados de forma sistemática, registrando-se as coordenadas X (Leste), Y (Norte) e Z (altitude) no sistema UTM/SIRGAS2000. As coordenadas planimétricas obtidas foram adotadas como referência para o cálculo das discrepâncias em relação aos produtos do UAS, enquanto as coordenadas altimétricas foram confrontadas com os valores do nivelamento geométrico. Os dados coletados são apresentados na seção de Resultados.

3.1.3 Levantamento UAS-SfM

O levantamento UAS-SfM foi realizado com o sistema DJI Phantom 4 RTK, com o objetivo de obter dados planialtimétricos por meio do fluxo fotogramétrico UAS-SfM com o processamento dos dados realizados no software livre de código aberto WebODM (*Web OpenDroneMap*). Foram executadas duas missões independentes: a Missão 1 com altura de voo de 25 m e a Missão 2 com altura de voo de 35 m, ambas com sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 65%, câmera em modo nadir, e processamento fotogramétrico pelo *software* WebODM. Foram executadas duas missões independentes sobre a área da malha, denominados Missão 1 e Missão 2, com o intuito de garantir redundância e verificar a consistência dos dados coletados.

O plano de voo foi definido pelo *software* DJI Pilot, com parâmetros de altura de voo, sobreposição longitudinal e lateral das imagens e velocidade da aeronave ajustados para assegurar a adequada reconstrução tridimensional da superfície. Durante as missões, foram capturadas imagens com elevada sobreposição, a partir das quais foram gerados a nuvem de pontos densa, o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o ortomosaico georreferenciado. Para assegurar a acurácia posicional. As coordenadas extraídas dos 30 pontos da malha, separadas por Missão, são apresentadas na seção de Resultados.

Dessa forma, o fluxo UAS-SfM possibilitou a obtenção de um conjunto de dados espaciais com elevada densidade e detalhamento, sendo posteriormente utilizado na análise comparativa da precisão posicional entre os métodos avaliados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da comparação das coordenadas levantadas pelos três métodos avaliados: GNSS RTK, fluxo UAS-SfM em duas missões independentes e nivelamento geométrico por visadas extremas. A análise é dividida em duas etapas: (i) discrepâncias planimétricas entre UAS-SfM e GNSS RTK; e (ii) discrepâncias altimétricas entre RTK, UAS-SfM Missão 1 e UAS-SfM Missão 2 em relação ao nivelamento geométrico.

4.1 DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS: UAS × GNSS RTK

As discrepâncias planimétricas foram calculadas para cada ponto da malha como a diferença entre as coordenadas obtidas pelo UAS (Missão 1 e Missão 2) e as coordenadas de referência do GNSS RTK:

$$\Delta N = N_{\text{UAS}} - N_{\text{RTK}}$$

$$\Delta E = E_{\text{UAS}} - E_{\text{RTK}}$$

Os resultados são observados na Tabela 1.

Tabela 1: Coordenadas planimétricas e suas discrepâncias (metros)

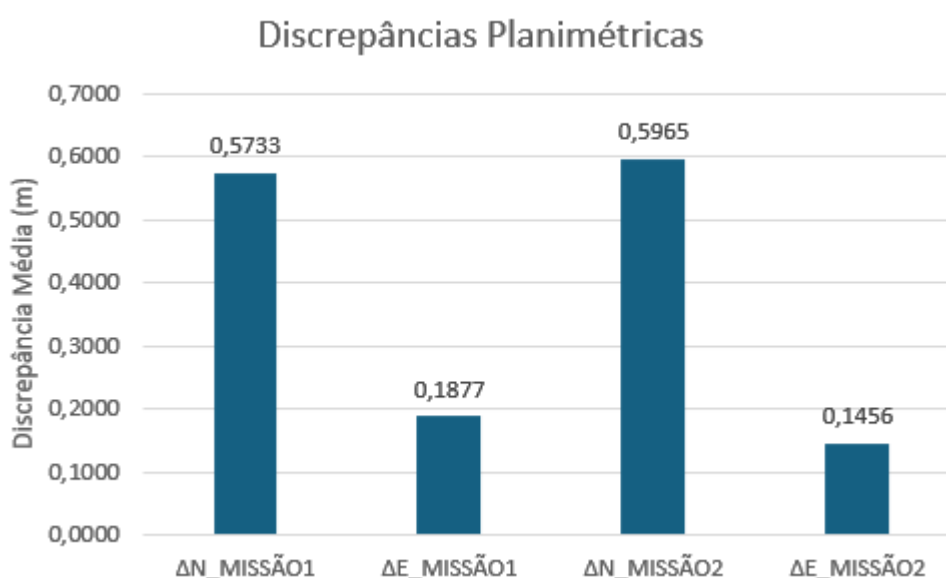
PONTO	N_RTK	E_RTK	$N_{UAS_{miss\tilde{a}o1}}$	$E_{UAS_{miss\tilde{a}o1}}$	$N_{UAS_{miss\tilde{a}o2}}$	$E_{UAS_{miss\tilde{a}o2}}$	$\Delta N_{miss\tilde{a}o1}$	$\Delta E_{miss\tilde{a}o1}$	$\Delta N_{miss\tilde{a}o2}$	$\Delta E_{miss\tilde{a}o2}$
1	7905863,024	788510,454	7905863,581	788510,610	7905863,572	788510,649	+0,557	+0,156	+0,548	+0,195
2	7905867,021	788510,632	7905867,596	788510,793	7905867,564	788510,814	+0,575	+0,161	+0,543	+0,182
3	7905871,010	788510,813	7905871,593	788510,996	7905871,632	788510,946	+0,583	+0,183	+0,622	+0,133
4	7905874,972	788510,967	7905875,542	788511,140	7905875,587	788511,108	+0,570	+0,173	+0,615	+0,141
5	7905878,992	788511,168	7905879,577	788511,349	7905879,539	788511,359	+0,585	+0,181	+0,547	+0,191
6	7905882,999	788511,328	7905883,557	788511,536	7905883,567	788511,359	+0,558	+0,208	+0,568	+0,031
7	7905882,754	788515,325	7905883,341	788515,518	7905883,381	788515,449	+0,587	+0,193	+0,627	+0,124
8	7905878,771	788515,152	7905879,353	788515,346	7905879,326	788515,334	+0,582	+0,194	+0,555	+0,182
9	7905874,788	788515,000	7905875,377	788515,189	7905875,427	788515,124	+0,589	+0,189	+0,639	+0,124
10	7905870,827	788514,829	7905871,418	788515,011	7905871,451	788514,964	+0,591	+0,182	+0,624	+0,135
11	7905866,830	788514,632	7905867,390	788514,792	7905867,406	788514,815	+0,560	+0,160	+0,576	+0,183
12	7905862,801	788514,457	7905863,353	788514,596	7905863,363	788514,629	+0,552	+0,139	+0,562	+0,172
13	7905862,753	788518,446	7905863,305	788518,601	7905863,296	788518,653	+0,552	+0,155	+0,543	+0,207
14	7905866,757	788518,787	7905867,335	788518,990	7905867,321	788518,918	+0,578	+0,203	+0,564	+0,131
15	7905870,704	788518,787	7905871,283	788518,990	7905871,326	788518,918	+0,579	+0,203	+0,622	+0,131
16	7905874,618	788518,984	7905875,219	788519,181	7905875,236	788519,106	+0,601	+0,197	+0,618	+0,122
17	7905878,614	788519,141	7905879,202	788519,358	7905879,242	788519,283	+0,588	+0,217	+0,628	+0,142
18	7905882,574	788519,345	7905883,177	788519,536	7905883,213	788519,465	+0,603	+0,191	+0,639	+0,120
19	7905882,385	788523,326	7905882,946	788523,528	7905882,993	788523,448	+0,561	+0,202	+0,608	+0,122
20	7905878,369	788523,164	7905878,953	788523,359	7905879,013	788523,267	+0,584	+0,195	+0,644	+0,103

21	7905874,425	788522,981	7905875,007	788523,160	7905875,061	788523,107	+0,582	+0,179	+0,636	+0,126
22	7905870,459	788522,787	7905871,036	788522,982	7905871,077	788522,937	+0,577	+0,195	+0,618	+0,150
23	7905866,487	788522,610	7905867,044	788522,762	7905867,176	788522,680	+0,557	+0,152	+0,689	+0,070
24	7905862,449	788522,442	7905863,003	788522,630	7905863,026	788522,627	+0,554	+0,188	+0,577	+0,185
25	7905862,323	788526,438	7905862,859	788526,603	7905862,866	788526,666	+0,536	+0,165	+0,543	+0,228
26	7905866,326	788526,606	7905866,889	788526,779	7905866,828	788526,781	+0,563	+0,173	+0,502	+0,175
27	7905870,292	788526,764	7905870,870	788526,982	7905870,903	788526,908	+0,578	+0,218	+0,611	+0,144
28	7905874,263	788526,971	7905874,833	788527,203	7905874,879	788527,106	+0,570	+0,232	+0,616	+0,135
29	7905878,196	788527,116	7905878,766	788527,330	7905878,780	788527,258	+0,570	+0,214	+0,584	+0,142
30	7905882,263	788527,283	7905882,841	788527,517	7905882,891	788527,426	+0,578	+0,234	+0,628	+0,143

Fonte: Autor (2026)

Os dados evidenciam padrão sistemático: todos os pontos apresentam ΔE e ΔN positivos em ambas as missões, indicando deslocamentos consistentes do UAS em relação ao RTK. Os valores de ΔE são homogêneos em toda a série (entre +0,031 m e +0,234 m), sem valores discrepantes. A componente N apresenta deslocamento pronunciado e quase constante em torno de +0,57 m (Missão 1) e +0,60 m (Missão 2), sugerindo deslocamento sistemático no georreferenciamento na direção Norte-Sul da malha. A Figura 3 apresenta as médias das discrepâncias planimétricas por componente e Missão, permitindo visualizar de forma clara a disparidade entre as componentes N e E e a consistência dos erros entre os dois levantamentos.

Figura 3: Discrepâncias Planimétricas



Fonte: Autor (2026)

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado sobre as séries de discrepâncias ΔE e ΔN de cada Missão ($\alpha = 0,05$). Para a Missão 1, tanto a componente ΔN ($p = 0,5913$) quanto a componente ΔE ($p = 0,9161$) seguem distribuição normal. Para a Missão 2, tanto ΔE ($p = 0,1015$) quanto ΔN ($p = 0,1144$) seguem distribuição normal. Em todas as quatro séries, a hipótese de normalidade não foi rejeitada, permitindo a aplicação do teste t de Student pareado para todas as componentes.

4.1.2 Teste t de Student Pareado e Teste de Wilcoxon — Componente Planimétrica

Para todas as componentes, que apresentaram distribuição normal no teste de Shapiro-Wilk, o teste t de Student pareado foi aplicado sob $H_0: \bar{d} = 0$ (ausência de viés sistemático). Os resultados estão consolidados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado do Teste t de Student pareado — Planimetria (UAS × RTK)

Componente	Erro Médio	Desvio Padrão	RMSE	Teste aplicado	Estat. t	p-valor	Conclusão
$\Delta N_{\text{MISSÃO1}}$	+0,5733 m	0,0154 m	0,5735 m	t de Student	t = 200,292	< 0,001	Rejeita H_0
$\Delta E_{\text{MISSÃO1}}$	+0,1877 m	0,0233 m	0,1892 m	t de Student	t = 43,431	< 0,001	Rejeita H_0
$\Delta N_{\text{MISSÃO2}}$	+0,5965 m	0,0412 m	0,5980 m	t de Student	t = 77,910	< 0,001	Rejeita H_0
$\Delta E_{\text{MISSÃO2}}$	+0,1456 m	0,0395 m	0,1509 m	t de Student	t = 19,844	< 0,001	Rejeita H_0

Fonte: Autor (2026)

Em todas as componentes e missões, os p-valores são muito inferiores a 0,05, confirmando viés sistemático significativo entre o UAS e o GNSS RTK. A componente N concentra o maior erro: Erro Médio de +0,5733 m (Missão 1) e +0,5965 m (Missão 2), com Desvio Padrão muito reduzido, o que indica erro essencialmente sistemático e não aleatório. Para a componente E, o Erro Médio é de +0,1877 m (Missão 1) e +0,1456 m (Missão 2). O RMSE 2D (planimétrico bidimensional combinado) foi de 0,6039 m para a Missão 1 e 0,6167 m para a Missão 2.

4.2 DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS: GNSS RTK E UAS × NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

As discrepâncias altimétricas foram calculadas para cada ponto da malha como a diferença entre as altitudes obtidas por cada método avaliado — GNSS RTK, UAS Missão 1 e UAS Missão 2 — e as altitudes de referência determinadas pelo nivelamento geométrico por visadas extremas, conforme a expressão:

$$\Delta H = H_{\text{método}} - H_{\text{nivelamento}}$$

Os resultados ponto a ponto estão apresentados na Tabela 3, permitindo a visualização direta das discrepâncias e das altitudes de cada método.

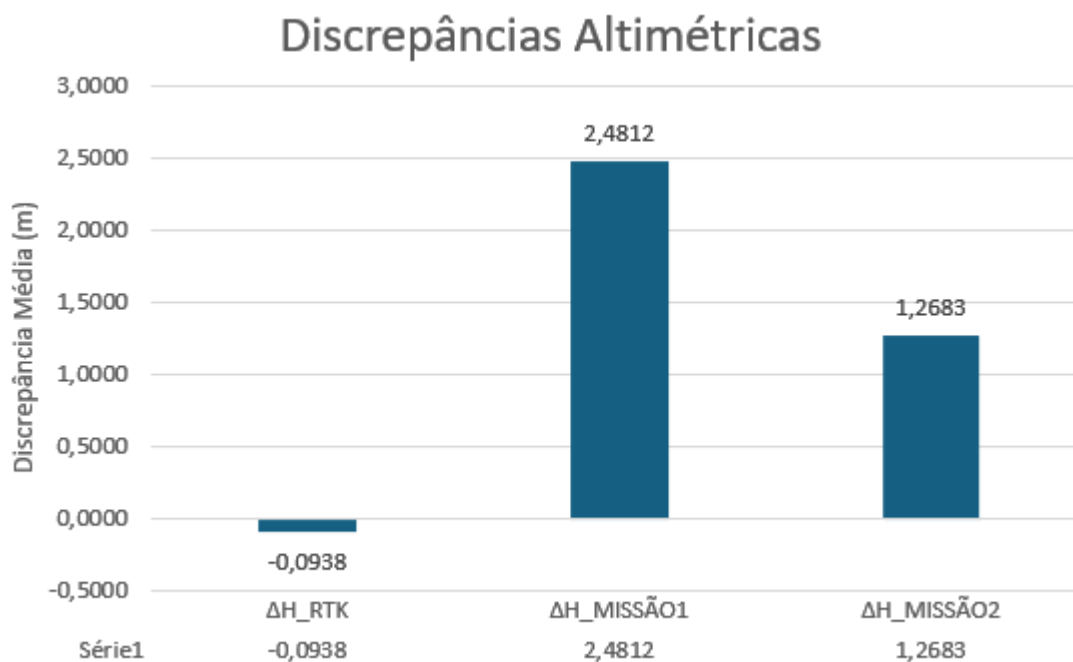
Tabela 3: Coordenadas altimétricas e suas discrepâncias (metros)

PONTO	H_{NIV}	H_{RTK}	$H_{missão1}$	$H_{missão2}$	ΔH_{RTK}	$\Delta H_{missão1}$	$\Delta H_{missão2}$
1	847,974	847,875	850,403	849,232	-0,099	+2,429	+1,258
2	847,886	847,787	850,317	849,132	-0,099	+2,431	+1,246
3	847,045	846,952	849,510	848,273	-0,093	+2,465	+1,228
4	846,292	846,203	848,793	847,568	-0,089	+2,501	+1,276
5	845,996	845,902	848,500	847,329	-0,094	+2,504	+1,333
6	846,003	845,911	848,501	847,296	-0,092	+2,498	+1,293
7	845,797	845,707	848,310	847,090	-0,090	+2,513	+1,293
8	845,795	845,701	848,312	847,055	-0,094	+2,517	+1,260
9	846,324	846,229	848,818	847,585	-0,095	+2,494	+1,261
10	847,151	847,049	849,636	848,390	-0,102	+2,485	+1,239
11	847,851	847,757	850,299	849,092	-0,094	+2,448	+1,241
12	847,924	847,821	850,359	849,152	-0,103	+2,435	+1,228
13	847,806	847,708	850,251	849,040	-0,098	+2,445	+1,234
14	847,820	847,723	850,250	849,072	-0,097	+2,430	+1,252
15	847,250	847,143	849,710	848,472	-0,107	+2,460	+1,222
16	846,502	846,382	848,972	847,741	-0,120	+2,470	+1,239
17	845,777	845,673	848,279	847,050	-0,104	+2,502	+1,273
18	845,740	845,653	848,257	847,063	-0,087	+2,517	+1,323
19	845,745	845,652	848,266	847,084	-0,093	+2,521	+1,339
20	845,945	845,855	848,482	847,271	-0,090	+2,537	+1,326
21	846,596	846,513	849,106	847,864	-0,083	+2,510	+1,268
22	847,336	847,237	849,811	848,596	-0,099	+2,475	+1,260
23	847,792	847,697	850,249	849,041	-0,095	+2,457	+1,249
24	847,715	847,622	850,162	848,935	-0,093	+2,447	+1,220
25	847,592	847,508	850,096	848,847	-0,084	+2,504	+1,255
26	847,728	847,650	850,166	848,999	-0,078	+2,438	+1,271
27	847,349	847,275	849,820	848,605	-0,074	+2,471	+1,256
28	846,738	846,657	849,250	848,007	-0,081	+2,512	+1,269
29	846,107	846,022	848,607	847,448	-0,085	+2,500	+1,341
30	845,834	845,732	848,355	847,129	-0,102	+2,521	+1,295

Fonte: Autor (2026)

A Figura 4 apresenta as médias das discrepâncias altimétricas dos três métodos em relação ao nivelamento geométrico, evidenciando de forma visual a hierarquia de desempenho entre eles.

Figura 4: Discrepância Altimétricas



Fonte: Autor (2026)

Os dados revelam padrões distintos: o GNSS RTK apresenta discrepâncias negativas e homogêneas (entre $-0,074$ m e $-0,120$ m), com média de $-0,0938$ m, indicando subestimativa sistemática das altitudes em relação ao nivelamento, atribuível à diferença entre os referenciais altimétricos elipsoidal e geoidal. O UAS Missão 1 apresenta superestimativa expressiva, com média de $+2,4812$ m, enquanto o UAS Missão 2, embora também positiva, exibe média de $+1,2683$ m, representando desempenho altimétrico significativamente melhor que a Missão 1.

4.2.1 Teste de Normalidade (Shapiro-Wilk) — Componente Altimétrica

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado sobre as séries de discrepâncias altimétricas (ΔH) de cada método em relação ao nivelamento geométrico ($n = 30$, $\alpha = 0,05$). Para o GNSS RTK, o teste indicou distribuição normal ($W = 0,9741$; $p = 0,6577$), permitindo a aplicação do teste t de Student pareado. Para o UAS Missão 1, o teste rejeitou a hipótese de normalidade ($W = 0,9263$; $p = 0,0392$), indicando a necessidade de aplicação do teste de Wilcoxon para amostras pareadas. Para o UAS Missão 2, o teste igualmente rejeitou a hipótese de normalidade ($W = 0,9118$; $p = 0,0166$), confirmando o uso do teste de Wilcoxon, conforme critério metodológico

estabelecido no referencial teórico. Os resultados estatísticos completos estão consolidados na Tabela 4.

O teste confirmou viés altimétrico estatisticamente significativo para todos os métodos ($p < 0,001$). O GNSS RTK obteve o menor RMSE altimétrico (0,0942 m), confirmando sua superioridade na componente Z, coerente com a precisão centimétrica esperada para o método. O UAS Missão 2 apresentou RMSE de 1,2687 m, substancialmente menor que o Missão 1 (2,4814 m), indicando melhor desempenho altimétrico na segunda missão, possivelmente associado a condições operacionais mais estáveis. Em ambas as missões, os erros altimétricos do UAS ultrapassam 1 metro, restringindo seu uso a aplicações que tolerem precisão métrica na componente Z, salvo com uso de maior densidade de GCPs ou correção pós-processamento.

4.2.2 Teste t de Student Pareado e Teste de Wilcoxon — Componente Altimétrica

Para o GNSS RTK, que apresentou distribuição normal no teste de Shapiro-Wilk, foi aplicado o teste t de Student pareado sob $H_0: \bar{d} = 0$ (ausência de viés sistemático). Para o UAS Missão 1 e o UAS Missão 2, que não seguiram distribuição normal ($p = 0,0392$ e $p = 0,0166$, respectivamente), foi aplicado o teste de Wilcoxon para amostras pareadas sob H_0 : mediana das diferenças = 0. Os resultados estão consolidados na Tabela 4:

Tabela 4: Discrepâncias Altimétricas em relação ao Nivelamento Geométrico

Método	Erro Médio	Desvio Padrão	RMSE	Estat. t	p-valor	Conclusão
GNSS RTK	-0,0938 m	0,0093 m	0,0942 m	-55,392	< 0,001	Rejeita H_0
UAS Missão 1	+2,4812 m	0,0329 m	2,4814 m	W = 0,0	< 0,001	Rejeita H_0
UAS Missão 2	+1,2683 m	0,0352 m	1,2687 m	W = 0,0	< 0,001	Rejeita H_0

Fonte: Autor (2026)

Em todos os métodos avaliados, os p-valores foram muito inferiores a 0,05, confirmando a existência de viés altimétrico sistemático estatisticamente significativo em relação ao nivelamento geométrico. O GNSS RTK apresentou o menor RMSE altimétrico da série (0,0942 m), com viés negativo de -0,0938 m atribuível à diferença entre os referenciais altimétricos elipsoidal e ortométrico, conforme discutido na seção 2.2.1. Apesar de estatisticamente significativo, esse viés é de magnitude reduzida e compatível com a precisão centimétrica esperada para o método. O UAS Missão 1 apresentou o maior viés altimétrico (Erro Médio = +2,4812 m; RMSE = 2,4814 m), com Desvio Padrão de apenas 0,0329 m, o que indica erro predominantemente sistemático. O UAS Missão 2 obteve desempenho altimétrico

substancialmente melhor que a Missão 1, com Erro Médio de +1,2683 m e RMSE de 1,2687 m. O Desvio Padrão reduzido em ambas as missões (0,0329 m e 0,0352 m, respectivamente) reforça que os erros altimétricos do UAS são de natureza essencialmente sistemática, possivelmente relacionados à configuração dos GCPs ou ao processamento fotogramétrico, e não à variabilidade aleatória das medições.

4.3 COMPARATIVO E DISCUSSÃO

A análise integrada dos resultados planimétricos e altimétricos permite uma avaliação abrangente do desempenho posicional dos três métodos investigados, evidenciando padrões distintos de comportamento e implicações práticas relevantes para a escolha metodológica em levantamentos topográficos.

No que concerne à componente planimétrica, os resultados demonstram que o UAS apresenta viés sistemático consistente em relação ao GNSS RTK, com deslocamentos positivos em ambas as direções para as duas missões realizadas. A componente N concentra o maior erro, com Erro Médio de +0,5733 m na Missão 1 e +0,5965 m na Missão 2, enquanto a componente E registrou +0,1877 m e +0,1456 m, respectivamente. O caráter predominantemente sistemático desses erros é evidenciado pelos reduzidos Desvios Padrão da ordem de 0,015 m a 0,042 m, em contraste com os Erros Médios de magnitude muito superior, o que indica que as discrepâncias não decorrem de variabilidade aleatória das medições, mas de um deslocamento constante entre os referenciais dos dois métodos. O RMSE 2D resultante foi de 0,6039 m para a Missão 1 e 0,6167 m para a Missão 2, valores que, embora expressivos em termos absolutos, revelam elevada repetibilidade entre as missões, com diferença de apenas 0,013 m entre os RMSE 2D, o que atesta a consistência interna do sistema de aquisição por UAS.

A assimetria entre as componentes N e E merece atenção interpretativa. O deslocamento na direção Norte-Sul foi aproximadamente três vezes superior ao registrado na direção Leste-Oeste, que houve alguma influência sistemática do plano de voo, como orientação das linhas de voo alinhadas predominantemente com um dos eixos sobre a geometria de reconstrução do modelo. Essa interpretação é consistente com as recomendações da literatura, que ressalta a importância do método de georreferenciamento e da geometria do plano de voo sobre a qualidade do georreferenciamento (Tkáč; Mésároš, 2019).

Na componente altimétrica, os três métodos apresentaram comportamentos distintos e hierarquicamente diferenciados. O GNSS RTK demonstrou a maior acurácia altimétrica entre

os métodos avaliados, com RMSE de 0,0942 m e Desvio Padrão de apenas 0,0093 m, confirmando a precisão centimétrica esperada para a técnica (Monico, 2008).

O UAS apresentou erros altimétricos de magnitude expressiva em ambas as missões, porém com padrão de comportamento distinto entre eles. A Missão 1 registrou Erro Médio de +2,4812 m e RMSE de 2,4814 m, com amplitude de discrepâncias de apenas 0,108 m entre os 30 pontos o que novamente revela caráter essencialmente sistemático, com Desvio Padrão de 0,0329 m correspondendo a apenas 1,3% do RMSE. A Missão 2, por sua vez, apresentou desempenho altimétrico substancialmente superior a Missão 1, com Erro Médio de +1,2683 m e RMSE de 1,2687 m, redução de aproximadamente 1,213 m em relação a primeira missão. A diferença de desempenho altimétrico entre as duas missões é relevante e merece interpretação cuidadosa: a variação nos resultados sugere influência de fatores operacionais ou de processamento, como condições de iluminação, velocidade do vento, configuração do processamento fotogramétrico ou parâmetros de ajuste do modelo. Em ambos os casos, os erros altimétricos do UAS, superiores a 1 metro, inviabilizam seu emprego direto em projetos que demandem precisão centimétrica ou decimétrica na componente Z, tais como projetos de terraplanagem, controle de volumes de corte e aterro, ou levantamentos cadastrais de alta precisão.

Do ponto de vista da aplicabilidade prática, os resultados permitem estabelecer uma hierarquia técnica entre os métodos avaliados. O nivelamento geométrico por visadas extremas constitui a referência de maior acurácia altimétrica, sendo recomendado para aplicações que exijam o mais elevado rigor posicional na componente Z. O GNSS RTK apresenta desempenho planialtimétrico compatível com a grande maioria das demandas de levantamentos topográficos de engenharia civil desde que aplicada a correção geoidal adequada para aplicações altimétricas, com vantagens operacionais significativas em termos de velocidade de coleta e dispensa de intervisibilidade entre pontos. O UAS, por sua vez, demonstra potencial inequívoco para levantamentos de reconhecimento, mapeamento de grandes áreas, geração de modelos digitais de superfície e obtenção de ortomosaicos georreferenciados, contextos nos quais sua elevada eficiência operacional e capacidade de cobertura areal compensam as limitações de acurácia posicional identificadas. Esses resultados são consistentes com o posicionamento da literatura especializada, que aponta os sistemas UAS-SfM como ferramentas eficazes para levantamentos em larga escala, mas com restrições para aplicações de alta precisão posicional (Fan; Saadeghvaziri, 2019; Tkáč; Mésároš, 2019).

Por fim, cabe destacar que a natureza predominantemente sistemática dos erros observados, tanto planimétricos quanto altimétricos, nos levantamentos por UAS representa, ao

mesmo tempo, uma limitação e uma oportunidade. Uma vez identificada e quantificada a magnitude e a direção do deslocamento sistemático, como demonstrado neste estudo, torna-se possível a aplicação de correções a posteriori que reduzam substancialmente as discrepâncias nos produtos fotogramétricos. Essa característica distingue favoravelmente os erros sistemáticos dos erros aleatórios, que por definição não são passíveis de correção determinística. Sugere-se para estudos futuros, investigar estratégias de otimização da distribuição e do número de GCPs, bem como a aplicação de pontos de checagem e técnicas de processamento como alternativas para a redução dos vieses sistemáticos identificados e a ampliação da aplicabilidade dos UAS em contextos de maior exigência posicional.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e comparar a precisão posicional de levantamentos obtidos pelo fluxo UAS-SfM (Sistema Aéreo Não Tripulado com fotogrametria Structure from Motion), GNSS em modo RTK e nivelamento geométrico por visadas extremas, executados sobre uma malha regular de 30 pontos no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. Os resultados obtidos permitem responder a cada um dos objetivos específicos propostos e oferecem subsídios concretos para a escolha metodológica em diferentes contextos de aplicação da engenharia civil.

Em relação à componente planimétrica, confirmou-se a existência de viés sistemático significativo entre os produtos fotogramétricos do fluxo UAS-SfM e as coordenadas de referência do GNSS RTK em ambas as missões realizadas. A componente Norte concentrou os maiores erros, com Erro Médio de +0,5733 m (Missão 1) e +0,5965 m (Missão 2), enquanto a componente Leste registrou +0,1877 m e +0,1456 m, respectivamente. O RMSE 2D foi de 0,6039 m para a Missão 1 e 0,6167 m para a Missão 2. A natureza essencialmente sistemática desses erros — evidenciada pelos Desvios Padrão inferiores a 0,042 m em todas as componentes, contra Erros Médios até 38 vezes maiores e a elevada repetibilidade entre as duas missões (diferença de apenas 0,013 m entre os RMSE 2D) apontam que as discrepâncias decorrem de deslocamento constante no georreferenciamento, possivelmente associado à distribuição ou à acurácia dos GCPs, e não a falhas aleatórias do sistema de aquisição. A aplicação do teste t de Student pareado confirmou viés sistemático estatisticamente significativo em todas as quatro componentes avaliadas ($p < 0,001$).

Quanto à componente altimétrica, os três métodos apresentaram hierarquia de acurácia bem definida. O GNSS RTK demonstrou o melhor desempenho entre os métodos avaliados,

com RMSE de 0,0942 m e Desvio Padrão de 0,0093 m, compatível com a precisão centimétrica esperada para a técnica. O viés negativo de $-0,0938$ m observado em relação ao nivelamento geométrico é explicado pela diferença entre os referenciais altimétricos: o GNSS fornece altitudes elipsoidais, enquanto o nivelamento determina altitudes ortométricas, referenciadas ao geóide. Essa diferença, denominada ondulação geoidal, não foi corrigida no presente estudo, e sua magnitude é coerente com os valores esperados para a região de Uberlândia-MG (IBGE, 2011). O UAS-SfM Missão 1 apresentou o maior erro altimétrico (RMSE = 2,4814 m), ao passo que a Missão 2 obteve desempenho substancialmente melhor (RMSE = 1,2687 m). A diferença de 1,213 m entre as missões, executadas com os mesmos GCPs, sugere influência de fatores do pipeline fotogramétrico, como parâmetros do bundle adjustment ou da auto-calibração da câmera. Os erros altimétricos expressivos e de natureza sistemática são compatíveis com o efeito doming. Em ambos os casos, os erros do UAS-SfM inviabilizam seu uso direto em projetos que exijam precisão centimétrica ou decimétrica na componente Z. O teste de Wilcoxon para amostras pareadas, aplicada as missões com distribuição não normal, confirmou viés altimétrico estatisticamente significativo em ambos os casos ($p < 0,001$).

Do ponto de vista da aplicabilidade, os resultados permitem estabelecer uma hierarquia técnica clara. O nivelamento geométrico por visadas extremas é o método de maior acurácia altimétrica e deve ser empregado quando o rigor na componente Z for determinante. O GNSS RTK é indicado para a grande maioria dos levantamentos topográficos de engenharia civil, com vantagens operacionais expressivas em termos de produtividade e flexibilidade, desde que aplicada correção geoidal para usos que requeiram altitudes ortométricas precisas. O fluxo UAS-SfM é adequado para levantamentos de reconhecimento, mapeamento de grandes áreas, geração de modelos digitais de superfície e obtenção de ortomosaicos georreferenciados, contextos nos quais a eficiência operacional e a capacidade de cobertura areal superam as limitações de acurácia posicional identificadas. Esses resultados estão alinhados com o posicionamento da literatura especializada (FAN; SAADEGHVAZIRI, 2019; TKÁČ; MÉSÁROŠ, 2019).

Como limitações do presente estudo, destacam-se a redução da área de levantamento a uma malha de dimensões restritas, o número reduzido de GCPs utilizados, a ausência de correção geoidal nas altitudes GNSS e a não adoção de checkpoints independentes para validação isenta dos produtos fotogramétricos. Essas limitações não comprometem as conclusões obtidas, mas indicam que os valores de RMSE encontrados devem ser interpretados no contexto experimental específico em que foram coletados. Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se: (i) avaliar o efeito do número e da distribuição espacial de GCPs

sobre a acurácia dos produtos UAS-SfM, incluindo a separação entre GCPs de ajuste e checkpoints de validação; (ii) investigar o emprego de imagens oblíquas em combinação com nadir para mitigação do efeito *doming*; (iii) investigar o emprego de GCPs como alternativa ao georreferenciamento por tecnologia RTK embarcada na própria aeronave; e (iv) ampliar a área de estudo e a quantidade de pontos de controle para análises mais abrangentes.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

FAN, Jin; SAADEGHVAZIRI, M. Ala. Applications of drones in infrastructures: challenges and opportunities. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, Newark, v. 10, n. 4, p. 1–16, 2019.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

TKÁČ, Matúš; MÉŠÁROŠ, Peter. Utilizing drone technology in the civil engineering. **SSP – Journal of Civil Engineering**, Košice, v. 14, n. 1, p. 27–37, 2019. DOI: 10.1515/sspjce-2019-0003.

WILCOXON, Frank. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, New York, v. 1, n. 6, p. 80–83, dez. 1945.

VEIGA, Luis A. K.; ZANETTI, Maria A. Z.; FAGGION, Pedro L. **Fundamentos de Topografia**. Curitiba: UFPR, 2012.