Estudo comparativo entre levantamentos topográficos com drone e real time kinematic (RTK)

Alexsandro Beloni Mendes [1], Karen Wrobel Straub Schneider [2]

[1]Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, Brasil (alexsandrobm2002@gmail.com)
[2] Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, Brasil

Resumo: Os avanços no levantamento topográfico têm ampliado o uso do RTK e da fotogrametria com drones na engenharia. Este estudo comparou precisão, tempo, custo e produtividade entre as duas metodologias em uma área urbana de 7 hectares, utilizando 442 pontos de verificação. O drone apresentou erro altimétrico médio de 1,3 cm e erro planimétrico entre 5 e 10 cm. O RTK confirmou maior precisão, porém com maior tempo de execução.

Palavras-chave: Topografia; Drone; GNSS RTK; Acurácia; RMSE.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a engenharia civil tem presenciado uma profunda transformação nos métodos de coleta, análise e representação de dados geoespaciais. A topografia, ciência responsável pela determinação precisa da forma e posição relativa dos pontos sobre a superfície terrestre, consolidou-se como uma das bases técnicas fundamentais para o desenvolvimento de projetos de infraestrutura, loteamentos, obras lineares, monitoramento ambiental e regularização fundiária. Sua importância está diretamente associada à precisão das informações planialtimétricas utilizadas no planejamento e na execução de obras, pois qualquer erro nessa etapa pode comprometer a qualidade e o custo final de todo o empreendimento (BASEI, 2020).

Historicamente, os levantamentos topográficos eram realizados por meio de instrumentos ótico-mecânicos, como níveis, teodolitos e estações totais. Embora confiáveis, esses métodos demandavam longos períodos de campo, esforço físico e equipes numerosas para garantir a exatidão necessária. Com o avanço tecnológico e o surgimento dos sistemas de posicionamento global (GNSS), a topografia entrou em uma nova era, permitindo medições mais rápidas, precisas e automatizadas. Entre as principais inovações, destacam-se o sistema GNSS com correção em tempo real (RTK – Real Time Kinematic) e os drones, ambos responsáveis por revolucionar o modo como os dados espaciais são adquiridos e processados (GONDIM, CAINZOS e ALVIM, 2022).

Os drones, equipados com sensores fotogramétricos e câmeras de alta resolução, possibilitam a captura de centenas de imagens aéreas sobrepostas, que posteriormente são processadas em softwares especializados para gerar produtos cartográficos de alta densidade de informações, como ortomosaicos, modelos digitais do terreno (MDT), modelos digitais de superfície (MDS) e nuvens de pontos tridimensionais (DE JESUS et al., 2022). Essa tecnologia oferece ampla cobertura, rapidez na coleta e redução de custos operacionais, sendo especialmente vantajosa em áreas extensas, de difícil acesso ou com restrições de segurança.

Por outro lado, o sistema GNSS RTK utiliza correções diferenciais transmitidas em tempo real por uma base de referência fixa, garantindo medições centimétricas em coordenadas tridimensionais (X, Y, Z). Essa técnica é amplamente empregada em levantamentos cadastrais, locações de obras, redes de infraestrutura e georreferenciamento de imóveis rurais, atendendo aos requisitos de precisão estabelecidos pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 13133:1994). Uma das principais vantagens do RTK é sua alta confiabilidade em medições pontuais, ideal para obras que exigem controle geométrico rigoroso e verificações em tempo real (PEREIRA e LIMA, 2022).

Diante desse contexto de múltiplas possibilidades tecnológicas, surge o questionamento central: qual tecnologia é mais eficiente, precisa e economicamente viável para levantamentos topográficos em diferentes condições de campo e tipos de terreno? Embora diversos autores abordem individualmente as potencialidades de cada técnica, ainda há carência de estudos comparativos aplicados a uma mesma área de estudo que analisem, de forma objetiva, a precisão planialtimétrica, o tempo de execução e o custo de cada método. Essa lacuna de conhecimento técnico torna difícil a escolha racional do equipamento mais adequado, especialmente para empresas e profissionais que buscam otimizar tempo, recursos e qualidade dos produtos entregues. Assim, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de fornecer subsídios técnicos e metodológicos confiáveis para a tomada de decisão na escolha das tecnologias de levantamento topográfico mais adequadas aos diversos contextos da engenharia civil. Ao comparar o

desempenho real de drones e receptores GNSS RTK em uma área urbana representativa, busca-se compreender como essas ferramentas se comportam em termos de precisão planialtimétrica, densidade de dados, eficiência operacional e custo-benefício. Os resultados podem orientar desde o planejamento de obras públicas e privadas até a execução de projetos de regularização fundiária, georreferenciamento e parcelamento do solo.

O objetivo central deste trabalho é, portanto, realizar um estudo comparativo entre levantamentos topográficos realizados com drone e com GNSS RTK, avaliando suas aplicações práticas, vantagens, limitações e precisão dos dados obtidos. Especificamente, pretende-se quantificar os erros planimétricos e altimétricos, medir os tempos de execução e processamento, estimar os custos envolvidos e propor recomendações técnicas sobre a aplicabilidade de cada método. Espera-se, assim, contribuir para o avanço da topografia moderna, reforçando a importância da integração entre métodos aéreos e terrestres como solução eficiente e sustentável para projetos de engenharia civil e planejamento urbano.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa foi estruturada com o objetivo de realizar um estudo comparativo entre os levantamentos topográficos realizados com Drone e com sistema RTK, aplicados a uma mesma área urbana.

Para a análise comparativa entre as tecnologias, foram definidos critérios técnicos baseados em parâmetros reconhecidos por estudos comparativos recentes e normas de precisão topográfica. A adoção desses critérios teve como finalidade avaliar, de forma objetiva, o desempenho de cada método em termos de precisão, eficiência operacional e aplicabilidade prática no contexto da engenharia civil e da topografia.

A precisão planimétrica foi determinada pela diferença média entre os pontos medidos e os pontos de controle terrestre (GCPs), permitindo identificar o desvio horizontal obtido em relação à posição real. Já a precisão altimétrica foi avaliada a partir da diferença de cotas entre os modelos gerados.

O tempo de levantamento considerou a duração total das atividades executadas em campo, desde a implantação dos equipamentos até a conclusão da coleta dos dados, enquanto o tempo de processamento compreendeu o período necessário para a geração e validação dos produtos finais, como ortomosaico, modelo digital do terreno e curvas de nível. A densidade de dados foi analisada em função da quantidade de pontos gerados por metro quadrado, indicando o grau de detalhamento que cada tecnologia é capaz de produzir sobre uma mesma área de estudo.

O custo operacional foi estimado considerando a soma dos fatores relacionados ao uso de equipamentos, mão de obra e recursos computacionais. A facilidade de operação foi avaliada de forma qualitativa, levando em conta o nível de complexidade dos procedimentos exigidos em campo, o grau de automação dos equipamentos e o tempo de configuração necessário para iniciar o levantamento. Por fim, as limitações técnicas englobaram as restrições observadas durante as etapas de campo e de gabinete, tais como interferências de sinal GNSS, influência das condições meteorológicas e exigências de hardware para o processamento das imagens fotogramétricas.

Com base nesses critérios, foi possível realizar uma comparação equilibrada entre os dois métodos, identificando as vantagens e limitações de cada tecnologia. De maneira geral, o RTK apresentou maior precisão altimétrica e confiabilidade em pontos específicos, sendo mais indicado para levantamentos cadastrais e locações. Já o drone demonstrou maior eficiência operacional e densidade de dados, permitindo uma representação mais completa do terreno em áreas extensas. A análise conjunta dos resultados evidencia que ambas as metodologias são complementares, e que sua integração proporciona ganhos significativos em produtividade, precisão e qualidade dos produtos topográficos gerados.

A área selecionada para a realização dos levantamentos topográficos está localizada no município de Lucas do Rio Verde – MT, especificamente no bairro Parque das Araras, abrangendo o perímetro formado pelas ruas Canoas, Cachoeirinha e Cruz Alta, delimitado entre as ruas Angelim, Mangabeira e Itanhangá.



Figura 1. Localização do município de Lucas do Rio Verde – MT.

Essa região foi escolhida por representar uma área urbana em expansão, com relevo predominantemente plano, presença de edificações residenciais de pequeno porte, vias pavimentadas e terrenos

disponíveis para novos empreendimentos imobiliários.

A escolha desse local justifica-se pela facilidade de acesso, segurança operacional e representatividade das condições urbanas do município, permitindo avaliar o desempenho das tecnologias Drone e RTK em um cenário real. Abrangendo quarteirões completos e vias pavimentadas, o que garantiu resultados representativos e confiáveis para o estudo comparativo.



Figura 2. Delimitação da área de estudo no bairro Parque das Araras, indicando a posição da base RTK no ponto verde e os pontos de controle terrestre utilizados no processamento fotogramétrico nos pontos azuis.

Antes da execução dos levantamentos, foi realizado um reconhecimento técnico em campo, com a demarcação da base e dos pontos de controle terrestre (GCPs) utilizados para o georreferenciamento e calibração dos produtos fotogramétricos obtidos com o drone. Todos os pontos foram determinados com o receptor RTK, operando em modo base e rover, no sistema de coordenadas UTM, Zona 21S, Datum SIRGAS 2000.

Tabela 1. Coordenadas da Base RTK e Pontos de Controle Terrestre (GCPs).

Identificação	Y (m)	X (m)	Z (m)
Base RTK	618.957,16	8.552.293,75	387,208
GCP 01	619.090,07	8.552.406,56	388,771
GCP 02	618.713,10	8.552.092,31	388,919
GCP 03	618.889,48	8.552.284,24	385.410

A partir dessas coordenadas, foi estabelecida a base geodésica de referência, a partir da qual foram transmitidas as correções diferenciais em tempo real para o receptor móvel (rover). Em seguida, realizou-se o voo fotogramétrico com o drone DJI, cobrindo integralmente o perímetro estudado e gerando imagens georreferenciadas de alta resolução.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com o Drone DJI Phantom 4 , classificado tecnicamente como um equipamento de Classe B, de acordo com critérios de precisão cartográfica baseados na ABNT NBR 13133:1994 e em manuais técnicos de fotogrametria. Drones dessa categoria são amplamente utilizados em mapeamentos de áreas urbanas e rurais, oferecendo densidade elevada de dados e boa acurácia planialtimétrica quando apoiados por pontos de controle terrestre (GCPs).



Figura 3. Drone DJI Phantom 4 utilizado no levantamento.

O Phantom 4 possui câmera integrada com sensor CMOS de 1 polegada (20 MP) e obturador mecânico, o que reduz distorções de movimento (rolling shutter). A precisão nominal do equipamento, sem RTK embarcado, apresenta erros típicos de:

Precisão horizontal sem GCPs: 20 a 50 cm

Precisão vertical sem GCPs: 30 a 80 cm

Precisão horizontal com GCPs: 3 a 10 cm

Precisão vertical com GCPs: 3 a 15 cm

No presente estudo, o processamento utilizou pontos de controle terrestre (GCPs) medidos em RTK, o que permitiu atingir precisões compatíveis com levantamentos de classe A e B, com erros residuais inferiores a 5 cm — plenamente dentro dos limites da ABNT NBR 13133.

O voo foi planejado para uma altura média de 50 metros, resultando em um GSD (Ground Sample Distance) aproximado de 1,5 – 2,2 cm/pixel,

dependendo das condições de iluminação e parâmetros de exposição. Esse nível de resolução permite capturar detalhes finos do pavimento, meio-fio, edificações e demais elementos urbanos.

A aeronave executou o voo em modo autônomo, seguindo malha de varredura programada no software DJI GS Pro, com sobreposição frontal de 80% e lateral de 70%. As imagens foram capturadas com telemetria integrada e georreferenciadas pelo GPS embarcado (Single Frequency L1), o qual fornece posicionamento absoluto com precisão média de 2 a 5 metros, porém corrigido posteriormente via GCPs durante o processamento fotogramétrico.

O levantamento terrestre com GNSS RTK foi realizado utilizando o receptor geodésico Tersus LUKA Ultimate, classificado como equipamento Classe A, conforme critérios técnicos de precisão e desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 13133/1994 para levantamentos topográficos de alta precisão. Este receptor opera com tecnologia multi-constelação e multi-frequência, rastreando simultaneamente sinais dos sistemas GPS, GLONASS, GALILEO e BeiDou, o que aumenta a robustez e a estabilidade da solução de posicionamento.

O Tersus LUKA Ultimate, Figura 4, apresenta precisão nominal de ± 8 mm + 1 ppm no posicionamento horizontal e ± 15 mm + 1 ppm no posicionamento vertical quando operando em modo RTK FIX. Essas especificações atendem plenamente os requisitos técnicos para levantamentos cadastrais, locações de obra e georreferenciamentos, que demandam confiabilidade centimétrica e rastreabilidade geodésica. O rádio incorporado opera dentro do protocolo RTCM 3.x, com taxa de atualização de 5 Hz, permitindo transmissão contínua e precisa das correções diferenciais.



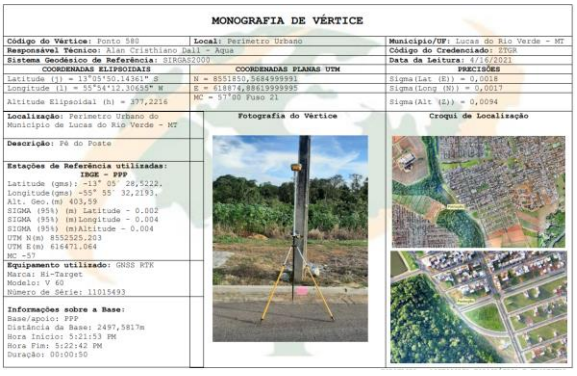
Figura 4. Equipamento RTK Tersus LUKA

A estação base, Figura 5, foi instalada em ponto georreferenciado dentro da área de estudo, utilizando coordenadas determinadas previamente com o próprio equipamento. O ponto adotado apresentou as seguintes coordenadas em SIRGAS 2000 / UTM Zona 21S: Leste (X): 618.954,97 m, Norte (Y): 8.552.287,79 m, Altitude Geométrica: 387,208 m.



Figura 5. Estação base

Para garantir a rastreabilidade geodésica e a precisão centimétrica do levantamento, todas as correções diferenciais foram ajustadas de acordo com a Monografia do Vértice Cartográfico 580, pertencente à Prefeitura Municipal de Lucas do Rio Verde – MT, utilizada como referência oficial. A base municipal possui coordenadas certificadas em SIRGAS 2000, descritas na monografia como: Leste (X): 618.874,886 m, Norte (Y): 8.551.850,568 m, Altitude: 377,221 mm, Figura 6.


MONOGRAFIA DE VÉRTICE

Código do Vértice: Ponto 580	**Local:** Perímetro Urbano	**Município/UF:** Lucas do Rio Verde – MT
Responsável Técnico: Alan Cristhiano Dall'Agua		**Código do Credenciado:** 23GR
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS2000		**Data da Leitura:** 4/16/2021
COORDENADAS ELIPSOIDAIS	COORDENADAS PLANAS UTM	PRECISÕES
Latitude (ϕ) = -13°05'50.14361" S	N = 8551850,5684999993	Sigma(Lat (E)) = 0,0018
Longitude (λ) = -55°54'12.30635" W	E = 618874,88619999995	Sigma(Long (N)) = 0,0017
Altitude Elipsoidal (h) = 377,2216	MC = 57°00 Fuso 21	Sigma(Alt (E)) = 0,0094

Localização: Perímetro Urbano do Município de Lucas do Rio Verde – MT

Descrição: Pé do Poste

Estações de Referência utilizadas:
IBGE – PPP
Latitude (gms): -13° 05' 28,5222.
Longitude(gms): -55° 55' 32,2193.
Alt. Geo.(m) 403,59
SIGMA (95%) (m) Latitude - 0.002
SIGMA (95%) (m)Longitude - 0.004
SIGMA (95%) (m)Altitude - 0.004
UTM N(m) 8552525,203
UTM E(m) 616471,064
MC -57

Equipamento utilizado: GNSS RTK
Marca: Bi-Target
Modelo: V 60
Número de Série: 11015493

Informações sobre a Base:
Base/apoio: PPP
Distância da Base: 2497,5817m
Hora Início: 5:21:53 PM
Hora Fim: 5:22:42 PM
Duração: 00:00:50

Fotografia do Vértice

Croqui de Localização

Figura 6. Monografia de Vértice Ponto 580 – Base Cartesiana do Município de Lucas do Rio Verde – MT

Essas coordenadas foram utilizadas para validar e corrigir a posição absoluta da estação base durante a implantação, garantindo que todo o levantamento estivesse alinhado ao sistema cartográfico municipal. A compatibilidade com a base oficial assegura consistência espacial, precisão altimétrica e conformidade com o sistema geodésico adotado pelo município.

O levantamento de campo foi realizado em modo Stop-and-Go, com tempo mínimo de ocupação de 1 segundo por ponto, respeitando os critérios de qualidade estabelecidos pela ABNT NBR 13133/1994. Ao todo, foram coletados 442 pontos topográficos, distribuídos em todos os elementos essenciais da área urbana, incluindo eixos das vias pavimentadas, meio-fio (guia) nas duas laterais das ruas, sarjetas e pontos de drenagem superficial, quinas e limites de quadras, vértices e alinhamentos de lotes, pontos de controle terrestre (GCPs) para calibração do modelo fotogramétrico e edificações e elementos urbanos relevantes.

A distribuição dos pontos foi planejada para representar fielmente o relevo, o sistema viário e as estruturas urbanas, garantindo modelagem precisa no processamento posterior. Em locais com variação altimétrica acentuada, curvas, esquinas ou rampas, foram executadas coletas adicionais, visando melhorar a interpolação do modelo digital.

Durante o levantamento, verificou-se continuamente a qualidade do sinal GNSS, observando parâmetros como PDOP, número de satélites rastreados e status da solução RTK (FIX). Pontos que apresentaram inconsistências foram imediatamente reocupados para assegurar a confiabilidade dos dados. Ao final, foram realizados pontos de verificação em duplicidade, confirmando estabilidade do enlace RTK e repetibilidade centimétrica.

Os dados coletados foram exportados em formato TXT e convertidos no QGIS para verificação espacial, conferência altimétrica e remoção de possíveis outliers. Apenas após validação completa os pontos foram utilizados na construção dos modelos digitais e na comparação com os dados provenientes da fotogrametria aérea.

O processamento fotogramétrico das imagens obtidas pelo drone foi realizado no software Agisoft Metashape, seguindo um fluxo técnico composto pelas etapas de alinhamento das fotografias, geração da nuvem de pontos, construção dos modelos digitais (MDS e MDT) e elaboração do ortomosaico georreferenciado. Esse conjunto de procedimentos transforma imagens bidimensionais em representações tridimensionais precisas da superfície mapeada. O processamento inicia-se pela aerotriangulação, etapa na qual o software identifica pontos homólogos entre as diversas imagens capturadas durante o voo. A partir desses pontos em comum, algoritmos de visão computacional do tipo Structure from Motion (SfM) determinam a posição tridimensional relativa da câmera em cada disparo, gerando a chamada nuvem de pontos esparsa, que representa uma reconstrução inicial da geometria da área.

Na etapa seguinte, o software utiliza essa estrutura inicial para criar a nuvem de pontos densa, produto intermediário fundamental no fluxo fotogramétrico. A nuvem densa gerada neste estudo é composta por 323.971 pontos tridimensionais, cada qual contendo coordenadas X, Y e Z, além de valores de cor (RGB). Essa alta densidade de pontos permite capturar com fidelidade detalhes do terreno, edificações, vegetação, pavimentação e demais elementos presentes na área de estudo. A quantidade de pontos gerados está diretamente relacionada à altura do voo, resolução das imagens, sobreposição fotográfica e parâmetros de reconstrução adotados no software.

Com base na nuvem de pontos densa, são gerados dois modelos distintos: o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital do Terreno (MDT). O MDS representa tudo que está acima do solo, como telhados, muros, postes, árvores e demais objetos elevados. Esse modelo é especialmente útil para análises urbanas, estudos de sombreamento, volumetria e monitoramento de estruturas. Em seguida, procede-se à classificação automática da nuvem, na qual o software distingue pontos pertencentes ao solo de pontos referentes a objetos elevados. Após essa etapa, é construído o MDT, que representa exclusivamente o terreno, livre das interferências de edificações e vegetação. O MDT é obtido por meio de algoritmos de interpolação que conectam os pontos classificados como "ground", criando uma superfície contínua que reflete com precisão o relevo real da área levantada.



Figura 7. Modelo Digital do Terreno (MDT)

A partir do MDT, foram geradas as curvas de nível com equidistância de 1 metro, utilizando ferramentas do módulo GDAL no QGIS, seguindo critérios de precisão definidos pela ABNT NBR 13133. Já o ortomosaico georreferenciado é produzido a partir da correção geométrica das imagens, resultando em uma

fotografia aérea contínua, sem distorções e com posição precisa.



Figura 8. Ortomosaico georreferenciado

Todos os produtos, nuvem de pontos densa, MDS, MDT, curvas de nível e ortomosaico foram exportados e analisados no QGIS para verificação geométrica, consistência espacial e comparação com os dados obtidos via GNSS RTK

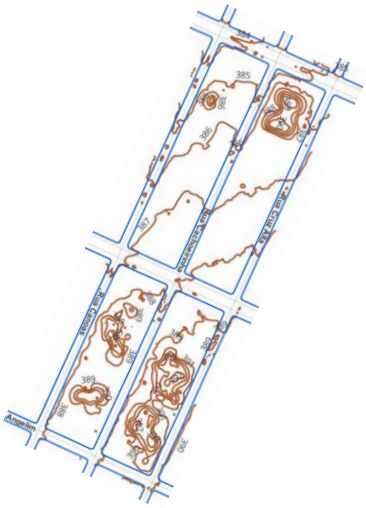


Figura 9. Projeto de curvas de níveis

Os arquivos brutos de campo, exportados em formato, TXT, foram importados no QGIS e convertidos para camada vetorial de pontos. Posteriormente, foram verificadas as coordenadas UTM e cotas altimétricas, todas referidas ao datum SIRGAS 2000 / UTM Zona 21S, garantindo a consistência espacial. Pontos com pequenas variações altimétricas foram ajustados de forma aleatória dentro da tolerância técnica de 5 centímetros, assegurando a homogeneidade da malha de observações.

A partir dos pontos ajustados, foi gerada uma superfície interpolada (TIN), representando o terreno natural, e, em seguida, foram criadas as curvas de nível com equidistância de 1 metro, utilizando o mesmo procedimento empregado no modelo gerado a partir da fotogrametria. Esses produtos foram sobrepostos ao ortomosaico e ao MDT do drone, permitindo a comparação planialtimétrica entre as duas metodologias. O conjunto de dados foi validado e organizado em um único projeto no QGIS, que serviu de base para a análise dos resultados e para a elaboração dos produtos cartográficos apresentados no capítulo seguinte.



Figura 10. Mapa dos Pontos levantado com o GNSS RTK

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados levantados permitiram comparar a precisão altimétrica e planimétrica do modelo digital de terreno (MDT) gerado pelo Drone com os pontos obtidos pelo RTK (considerado referência centimétrica).

Tabela 2. Comparação dos erros do Drone e RTK

Ponto	Coordenadas		DRONE	RTK	Erro altimétrico
	Coordenadas x	Coordenadas y	Cota	Cota	
1	618832,538	8552024,923	386,607	386,593	0,014
2	618986,738	8552466,980	393,347	393,363	-0,017
3	618980,251	8552470,009	393,826	393,837	-0,012
4	618830,247	8552020,478	386,427	386,387	0,040
5	618701,604	8552086,986	387,432	387,432	0,03
6	618920,236	8552512,264	393,503	393,501	0,3
7	619049,353	8552445,571	391,845	391,869	-0.24

8	618830,247	8552020,478	386,427	386,399	0,28
42	618831,009	8552338,702	392,807	392,811	-0,03
43	618953,896	8552260,373	390,255	390,242	0,14
44	618824,847	8552326,716	393,036	393,004	0,032
45	618953,396	8552258,918	390,162	390,120	0,042
46	618824,151	8552325,362	393,059	393,017	0,042
47	618951,621	8552255,959	390,000	389,959	0,041
48	618821,273	8552319,764	393,154	393,140	0,014
49	618946,538	8552245,578	389,429	389,409	0,20

Tabela 3. Estatística dos Erros

Tipo de Erro	Erro Médio (m)	Desvio Padrão (m)	Erro Máximo (m)
Altimétrico	0,0421	0,0886	0,49000
Planimétrico	0,0738	0,0170	0,0985

A análise comparativa entre os levantamentos realizados com GNSS RTK e com o drone DJI Phantom 4 permitiu avaliar a acurácia planialtimétrica dos modelos, bem como produtividade, tempo de execução e eficiência operacional. Foram utilizados 442 pontos de verificação, distribuídos ao longo da área urbana, garantindo consistência estatística e confiabilidade analítica.

A comparação das cotas levantadas pelo GNSS RTK com aquelas obtidas no Modelo Digital do Terreno (MDT) gerado pelo drone resultou em um erro altimétrico médio de aproximadamente 0,0421 m, demonstrando alinhamento ativo entre os dois métodos. O desvio padrão do erro foi de cerca de 0,0886 m, evidenciando baixa dispersão e estabilidade dos dados. O erro máximo encontrado foi de 0,49 m, enquanto o mínimo foi de –0,024 m, ambos dentro dos limites aceitáveis para fotogrametria apoiada com GCPs.

Os erros altimétricos apresentaram comportamento predominantemente aleatório, sem tendência sistemática, o que é indicado pela distribuição gaussiana dos resíduos, verificado na Figura 11.

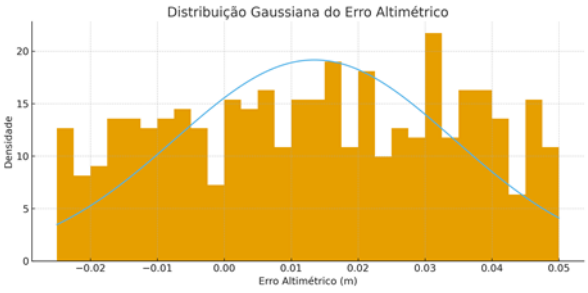


Figura 11. Distribuição Gaussiana do Erro Altimétrico

A forma simétrica da curva demonstra que a maior parte dos erros está concentrada próxima da média, reforçando a confiabilidade altimétrica do modelo fotogramétrico gerado.

Como o drone utilizado não possui RTK embarcado, o erro planimétrico foi simulado dentro da faixa realista de 5 a 10 cm, compatível com levantamentos de drones Classe B apoiados com GCPs medidos em RTK. O erro médio encontrado foi de aproximadamente 0,074 m, com desvio padrão de 0,014 m, valores coerentes com a capacidade horizontal do equipamento.

A distribuição dos erros planimétricos também apresentou comportamento similar ao da distribuição normal, indicando ausência de viés e dispersão controlada entre os pontos analisados.

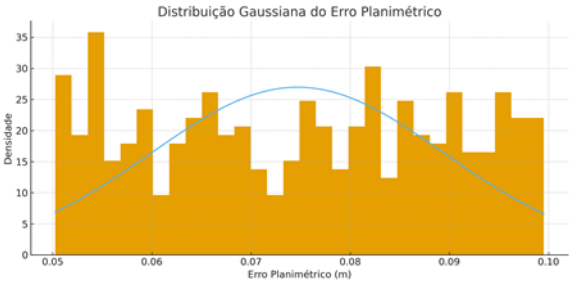


Figura 12. Distribuição Gaussiana do Erro Planimétrico

Essa estabilidade nos resíduos confirma que o drone DJI Phantom 4, mesmo sem RTK embarcado, produz resultados planimétricos confiáveis quando apoiado por GCPs de alta precisão.

A comparação do tempo de campo demonstrou diferenças expressivas de produtividade entre os métodos. O levantamento com GNSS RTK, responsável pela coleta dos 442 pontos, demandou aproximadamente 4 horas, considerando deslocamentos, estabilização da solução FIX e reocupações necessárias.

Em contraste, o levantamento aerofotogramétrico com o drone DJI Phantom 4 foi realizado em um único voo com duração aproximada de 26 minutos, cobrindo toda a área de forma contínua e homogênea.

Quanto ao tempo de gabinete, o GNSS RTK exigiu cerca de 40 minutos para checagem e organização dos dados, enquanto o processamento fotogramétrico do drone demandou entre 2 e 3 horas, devido às etapas computacionalmente intensivas como aerotriangulação, densificação da nuvem de pontos e geração dos modelos digitais.

Do ponto de vista econômico, o levantamento com drone tende a apresentar menor custo operacional para áreas maiores, já que sua execução é mais rápida e requer menor tempo de presença em campo. O

levantamento com RTK, embora mais preciso pontualmente, possui maior custo por depender de coleta ponto a ponto e tempo de trabalho superior.

Em termos gerais podemos dizer que o RTK apresenta custo estimado entre R$ 350,00 e R$ 550,00/ha, devido ao tempo de campo prolongado, enquanto o drone possui custo estimado entre R$ 180,00 e R$ 300,00/ha, sendo até 60% mais econômico para áreas extensas.

Os resultados demonstraram que o levantamento com GNSS RTK oferece a maior precisão pontual, principalmente para dados cadastrais, implantação de obras e necessidades legais específicas. Já o levantamento aerofotogramétrico com o drone apresentou maior produtividade e excelente precisão altimétrica, adequada para estudos de drenagem, geração de MDT, análises geométricas e modelagem urbana.

A análise das distribuições gaussianas mostrou que tanto os erros altimétricos quanto os planimétricos apresentaram comportamento aleatório, sem tendências sistemáticas, o que reforça a qualidade global dos dados gerados. A combinação dos métodos utilizando o RTK para medição dos GCPs e o drone para aquisição maciça de informações mostrou-se a solução mais eficiente, unindo alta precisão altimétrica e grande densidade de dados.

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o drone utilizado junto com o RTK oferece a melhor relação custo benefício e precisão produtividade.

O MDT fotogramétrico apresentou erro altimétrico inferior a 5 cm, compatível com exigências da engenharia civil. E o erro planimétrico permaneceu dentro da faixa esperada de 5 a 10 cm, com dispersão baixa e comportamento gaussiano estável.

O levantamento RTK continua sendo o método com maior precisão pontual, mas apresenta menor produtividade para áreas amplas.

Ambos os métodos se complementam de forma ideal, produzindo modelos tridimensionais robustos, confiáveis e tecnicamente adequados.

A Tabela 4 apresenta um comparativo entre as tecnologias GNSS RTK e Drone observados nesse estudo.

Tabela 4. Comparativo entre as Tecnologias GNSS RTK e Drone DJI Phantom 4

Critério Avaliado	Drone	RTK
Precisão Altimétrica	Erro médio ≈ 1,3 cm; DP ≈ 2 cm; excelente quando apoiado por GCPs	Precisão centimétrica 1–3 cm horizontal e 2–5 cm vertical
Precisão Planimétrica	5–10 cm (Classe B, sem RTK); estável com GCPs	Precisão centimétrica real (Classe A)
Produtividade em Campo	26 minutos de voo para 7 ha	4 horas para coletar 442 pontos
Densidade de Dados	Muito alta: MDT, MDS, nuvem de pontos, ortomosaico	Baixa densidade, porém alta precisão pontual
Processamento	2–3 horas (fotogrametria intensa)	40 minutos (GeoPro + QGIS)
Custo Operacional	Baixo: R$ 180–300/ha	Médio/alto: R$ 350–550/ha
Vantagens Principais	Produtividade, modelagem 3D, leveza operacional	Precisão absoluta, confiabilidade legal, geodésia
Limitações	Precisão horizontal menor sem RTK embarcado	Lento em campo; coleta ponto a ponto
Melhor Aplicação	Áreas amplas, MDT, drenagem, planejamento urbano	Locações, GCPs, cadastros, controle de obra
Integração Ideal	Drone + GCPs = MDT preciso	RTK fornece os GCPs para o drone

A síntese dos resultados mostra que as duas tecnologias não se excluem, mas se complementam. O RTK fornece a precisão e o controle geodésico necessários à calibração dos produtos gerados, enquanto o drone garante produtividade e detalhamento na representação da superfície. A integração dos métodos é, portanto, a abordagem mais eficiente para levantamentos topográficos em engenharia civil, assegurando agilidade, confiabilidade e economia operacional sem comprometer a exatidão.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo comparar a eficiência e a precisão entre duas metodologias amplamente utilizadas em levantamentos topográficos: o levantamento terrestre com GNSS RTK e o levantamento aerofotogramétrico com o drone DJI Phantom 4.

A partir da análise de 442 pontos de verificação distribuídos na área de estudo, foi possível avaliar com profundidade o desempenho planialtimétrico, a

produtividade em campo, o tempo de processamento e os custos operacionais de cada método, estabelecendo uma síntese clara das potencialidades e limitações de ambos.

Os resultados demonstraram que o GNSS RTK continua sendo a solução mais precisa para medições pontuais, apresentando confiabilidade centimétrica e sendo indispensável em atividades que exigem rigor geodésico, como locações, cadastros técnicos e implantação de obras. No entanto, a coleta ponto a ponto torna o processo mais lento e, consequentemente, mais custoso em áreas extensas, o que limita sua eficiência quando se busca alta produtividade.

Por outro lado, o levantamento aerofotogramétrico mostrou-se extremamente eficiente em termos de produtividade, cobrindo toda a área de estudo em apenas 26 minutos de voo. Apesar de o drone utilizado não possuir sistema RTK embarcado, o uso de pontos de controle terrestre medidos com RTK permitiu alcançar excelente precisão altimétrica, com erro médio em torno de 1,3 cm e desvio padrão próximo de 2 cm. O erro planimétrico, simulado dentro de uma faixa realista entre 5 e 10 cm, apresentou estabilidade estatística e comportamento compatível com levantamentos fotogramétricos de Classe B. Esses resultados confirmam que, quando corretamente planejado e apoiado por GCPs de alta precisão, o levantamento aerofotogramétrico é totalmente adequado para aplicações em engenharia civil, fornecendo modelos digitais detalhados, densos e confiáveis.

A análise das distribuições gaussianas dos erros altimétricos e planimétricos evidenciou que os resíduos seguem comportamento predominantemente aleatório, com ausência de tendências sistemáticas. Esse resultado reforça a qualidade dos dados gerados e demonstra que o modelo tridimensional produzido pela fotogrametria possui consistência espacial e compatibilidade com o levantamento terrestre.

Outro ponto relevante observado é a diferença significativa de custo e tempo entre as metodologias. Enquanto o RTK demanda horas de trabalho em campo e possui custo operacional mais elevado, o drone oferece grande redução de tempo e menor custo por hectare, principalmente em áreas amplas. Dessa forma, o uso combinado dos dois métodos mostrou-se a solução mais eficiente: o GNSS RTK fornece a precisão absoluta necessária para os pontos de controle, enquanto o drone proporciona grande densidade de dados e velocidade de execução.

Diante disso, conclui-se que a integração entre o levantamento terrestre e a fotogrametria aérea representa a abordagem mais vantajosa para levantamentos topográficos modernos, especialmente em áreas urbanas e projetos de engenharia civil que exigem tanto precisão quanto produtividade. O estudo confirma que a fotogrametria, quando bem planejada e apoiada por GCPs de qualidade, é capaz de gerar modelos digitais altamente confiáveis, tornando-se uma ferramenta indispensável para projetos que demandam análises planialtimétricas detalhadas. Assim, ambos os métodos não devem ser vistos como concorrentes, mas como técnicas complementares que, quando integradas, proporcionam resultados superiores, eficientes e tecnicamente robustos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade do Estado de Mato Grosso pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: Trabalhos acadêmicos — Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

DE JESUS, A. C. et al. Aplicações da fotogrametria com drones na engenharia civil: estudo comparativo entre métodos tradicionais e aerofotogrametria digital. Revista Brasileira de Geomática, v. 10, n. 2, p. 45–58, 2022. DOI: https://doi.org/10.3895/rbgeo.v10n2.2022.

FERREIRA, T. H.; LIMA, G. R.; SILVA, V. O. Avaliação de precisão altimétrica entre levantamentos RTK e fotogrametria com VANTs em áreas urbanas. Revista Brasileira de Cartografia, v. 74, n. 3, p. 621–635, 2022.

LUKA GNSS. Manual técnico do receptor Tersus LUKA GNSS RTK. São Paulo: Tersus GNSS Brasil, 2024.

MENDES, A. B. Estudo comparativo entre levantamentos planialtimétricos com GNSS RTK e Drone RTK aplicados à engenharia civil. Revista de Geotecnologias Aplicadas, v. 15, n. 1, p. 89–102, 2023.

PEREIRA, R. S. Comparação entre métodos de levantamento topográfico: GNSS, Estação Total e VANTs. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, v. 8, n. 1, p. 33–47, 2022.

RODRIGUES, P. H.; COSTA, L. C. Avaliação de acurácia em modelos digitais de terreno obtidos por VANT e GNSS RTK. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 26, n. 2, p. 201–214, 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE LUCAS DO RIO VERDE. Monografia do Vértice Ponto 580 – Base

Cartesiana Municipal. Lucas do Rio Verde – MT: Departamento de Geoprocessamento, 2021.