



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA – CENTRAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM GEOPROCESSAMENTO**

ISAAC KYERNE GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE PRODUTOS
AEROFOTOGRAMÉTRICOS GERADOS COM E SEM PONTOS DE CONTROLE
EM LEVANTAMENTOS COM AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS**

TERESINA

2025

ISAAC KYERNE GOMES DA SILVA

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE PRODUTOS
AEROFOTOGRAMÉTRICOS GERADOS COM E SEM PONTOS DE CONTROLE
EM LEVANTAMENTOS COM AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Tecnologia em Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina - Central.

Orientadora: Prof.^a. Ma. Amanda Bezerra Matias.

TERESINA

2025

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE PRODUTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS GERADOS COM E SEM PONTOS DE CONTROLE EM LEVANTAMENTOS COM AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Isaac Kyerne Gomes da Silva¹
Amanda Bezerra Matias²

RESUMO

O uso de aeronaves remotamente pilotadas tem se consolidado como uma alternativa eficiente para a obtenção de dados geoespaciais de alta resolução, especialmente em levantamentos de pequena e média escala. Entretanto, a qualidade geométrica dos produtos gerados, como ortofotos e modelos digitais de superfície, está diretamente relacionada à estratégia de georreferenciamento adotada, em especial ao uso de pontos de controle em campo. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a acurácia posicional de produtos aerofotogramétricos obtidos a partir de diferentes cenários de processamento, comparando o uso de pontos de controle e pontos de verificação, a utilização de todos os pontos como controle e o processamento sem qualquer ponto de controle, incluindo a análise do efeito da transformação altimétrica por meio de modelo geoidal. O levantamento foi realizado na área externa do Campus da Reitoria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), em Teresina-PI, abrangendo uma área de 41.935,4 m², com uma aeronave remotamente pilotada equipada com receptor GNSS embarcado, e o processamento das imagens foi conduzido em ambiente fotogramétrico comercial. A avaliação da acurácia foi baseada no erro médio quadrático (RMSE) para as componentes planimétricas, altimétrica e tridimensional. Os resultados indicaram que os cenários com pontos de controle apresentaram acurácia centimétrica na componente horizontal e melhor desempenho tridimensional. Por outro lado, os cenários sem pontos de controle apresentaram redução significativa da acurácia, especialmente na componente vertical, embora a aplicação de transformação altimétrica tenha proporcionado melhorias substanciais. Conclui-se que a escolha da estratégia de controle geodésico deve considerar a finalidade de uso dos produtos, equilibrando requisitos de acurácia, tempo de campo, esforço de processamento e custos operacionais.

Palavras-chave: aerofotogrametria; pontos de controle; acurácia posicional; drones; georreferenciamento.

ABSTRACT

The use of remotely piloted aircraft has become an efficient alternative for acquiring high-resolution geospatial data, particularly for small-and medium-scale surveys. However, the geometric quality of derived products, such as orthophotos and digital surface models, is strongly influenced by the georeferencing strategy adopted, especially the use of ground control points. In this context, this study aimed to evaluate the positional accuracy of aerophotogrammetric products generated under different processing scenarios, comparing the use of ground control points and check points, the use of all points as control, and processing without any ground control points,

¹ Graduando em Tecnologia em Geoprocessamento. IFPI. isaackyernegeo@gmail.com.

² Prof.^a Ma. de Geoprocessamento. IFPI. amanda.matias@ifpi.edu.br.

including the assessment of the effect of altimetric transformation using a geoid model. The survey was conducted at the external area of the Rectory Campus of the Federal Institute of Education, Science and Technology of Piauí (IFPI), in Teresina, Piauí, Brazil, covering an area of 41,935.4 m², using a remotely piloted aircraft equipped with an onboard GNSS receiver, and image processing was performed using commercial photogrammetric software. Positional accuracy assessment was based on the root mean square error (RMSE) for horizontal, vertical, and three-dimensional components. The results showed that scenarios using ground control points achieved centimeter-level horizontal accuracy and better three-dimensional performance. In contrast, scenarios without ground control points exhibited a significant reduction in accuracy, particularly in the vertical component, although altimetric transformation provided substantial improvements. The findings indicate that the choice of geodetic control strategy should be guided by the intended application of the products, balancing accuracy requirements, fieldwork time, processing effort, and operational costs.

Keywords: aerophotogrammetry; ground control points; positional accuracy; unmanned aerial vehicles; georeferencing.

Data de aprovação: 23/12/2025

1 INTRODUÇÃO

O uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) tem transformado de forma significativa a aquisição de dados geoespaciais, consolidando-se como uma tecnologia acessível, versátil e eficiente para levantamentos em diferentes escalas. A possibilidade de obtenção de imagens com alta resolução espacial e temporal, aliada à flexibilidade operacional e à redução de custos quando comparada a métodos aerofotogramétricos tradicionais, tem ampliado sua aplicação em áreas como mapeamento urbano, topografia, agricultura de precisão, planejamento territorial e monitoramento ambiental (Nex; Remondino, 2014; Toth; Józków, 2016).

Apesar dessas vantagens, a qualidade geométrica dos produtos derivados, como ortofotos, modelos digitais de superfície (MDS) e nuvens de pontos, depende diretamente da precisão do posicionamento das imagens e da robustez do processamento fotogramétrico. Essa precisão é influenciada por um conjunto de fatores interdependentes, incluindo as características da aeronave e do sensor embarcado, a calibração da câmera, a estabilidade do voo, o planejamento da missão e, sobretudo, a estratégia de georreferenciamento adotada (Remondino; Fraser, 2006; Toth; Józków, 2016).

Tradicionalmente, a obtenção de produtos cartográficos com elevada acurácia posicional baseia-se na utilização de Pontos de Controle Terrestres (*Ground Control Points* – GCPs), cujas coordenadas são determinadas por técnicas geodésicas de alta precisão. Esses pontos permitem vincular o modelo fotogramétrico a um sistema de referência espacial, reduzindo erros sistemáticos e distorções geométricas. Diversos estudos evidenciam que tanto a quantidade quanto a distribuição espacial dos GCPs exercem influência direta sobre os erros planimétricos e altimétricos dos produtos gerados (Eisenbeiss, 2009; Dandois; Ellis, 2013; Nex; Remondino, 2014).

Nex e Remondino (2014), em uma revisão abrangente sobre fotogrametria com drones, destacaram que a presença e a correta distribuição dos GCPs são fatores determinantes para a melhoria da acurácia posicional dos modelos fotogramétricos. Eisenbeiss (2009) demonstrou que, em ambientes urbanos, a utilização de pelo menos cinco GCPs adequadamente distribuídos é suficiente para manter erros planimétricos inferiores a 5 cm, mesmo em cenários urbanos complexos. Em contrapartida, Dandois e Ellis (2013) evidenciaram que a redução excessiva do número de pontos de controle pode ocasionar um aumento expressivo do erro altimétrico, especialmente em áreas com cobertura vegetal, onde a utilização de menos de três GCPs pode duplicar o Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* – RMSE vertical).

Estudos adicionais indicam que estratégias específicas de implantação dos GCPs podem contribuir significativamente para a melhoria da acurácia. Moreira et al. (2018) verificaram que a disposição de pontos de controle em extremos altimétricos do terreno contribui para a redução de distorções nas bordas dos ortomosaicos em até 30%, sobretudo em áreas com relevo acidentado. Carvalho et al. (2022), por sua vez, propuseram um método de ajuste que combina GNSS cinemático e GCPs, alcançando redução média de 15% no erro global de georreferenciamento.

Em termos de ferramentas de processamento, Silva (2020) comparou o desempenho de softwares comerciais e soluções *open source*, observando que plataformas comerciais tendem a apresentar melhor desempenho em áreas com cobertura heterogênea do solo.

Entretanto, a coleta de pontos de controle em campo representa uma etapa onerosa do levantamento aerofotogramétrico, demandando tempo, equipamentos GNSS de alta precisão e mão de obra especializada. Além disso, o uso de GCPs implica esforço adicional na fase de processamento, especialmente na etapa de

identificação e pontaria manual dos alvos nas imagens. Esses fatores têm motivado o interesse por alternativas baseadas no georreferenciamento direto, viabilizado por ARPs equipadas com receptores GNSS embarcados e técnicas de correção diferencial, como o posicionamento cinemático em tempo real (*Real-Time Kinematic* – RTK) e o posicionamento cinemático pós-processado (*Post-Processed Kinematic* – PPK).

Embora o georreferenciamento direto possa reduzir significativamente o tempo e o custo operacional, sua eficácia depende de diversos condicionantes, como a qualidade do posicionamento GNSS, a geometria do bloco de imagens e o tratamento adequado das componentes planimétrica e altimétrica. Em especial, Toth e Józkó (2016) destacam que a ausência de pontos de controle tende a impactar mais severamente a acurácia vertical, podendo comprometer aplicações que demandam maior rigor geométrico.

Nesse contexto, torna-se relevante avaliar de forma sistemática até que ponto a redução ou eliminação de pontos de controle em campo compromete a qualidade geométrica dos produtos fotogramétricos, e em quais situações essa perda de acurácia pode ser aceitável em função da finalidade de uso. Conforme preconizado por normas e diretrizes internacionais, como as da Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* – ASPRS), a qualidade de um produto geoespacial deve ser analisada com base no princípio da adequação ao uso, e não apenas em critérios absolutos de precisão (ASPRS, 2024).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar a acurácia posicional de produtos aerofotogramétricos gerados a partir de diferentes estratégias de controle geodésico, comparando cenários com uso de pontos de controle e pontos de verificação, uso de todos os pontos como pontos de controle e processamento sem qualquer ponto de controle, incluindo a análise do efeito da transformação altimétrica por meio de modelo geoidal. A análise busca subsidiar a definição de protocolos técnicos mais eficientes para levantamentos com ARP, considerando a relação entre acurácia geométrica, tempo de campo, esforço de processamento e custos operacionais, especialmente em ambientes urbanos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ORIENTAÇÕES ÁREA DE ESTUDO E LEVANTAMENTO DOS DADOS

A área de estudo selecionada para esta pesquisa foi a área externa do Campus da Reitoria do IFPI, situada no bairro Santa Isabel, próximo à Ladeira do Uruguai, localizado na Avenida Presidente Jânio, na cidade de Teresina, capital do estado do Piauí (Figura 1). O edifício principal da reitoria do IFPI está passando por uma ampliação de sua estrutura, existindo movimentação de terra e modificações que proporcionou um cenário ideal para avaliação do impacto dos pontos de controle.

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: Dos autores.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado abrangendo uma área total de 41 935,4 m² (Figura 1). Para a aquisição das imagens foi utilizado um drone quadricóptero DJI Mavic 3 Enterprise, equipado com câmera RGB integrada e receptor GNSS embarcado.

O plano de voo foi realizado utilizando o aplicativo próprio da DJI e foi configurado para uma altitude de 60 m acima do nível do terreno, com linhas paralelas de varredura, garantindo sobreposição frontal de 80% e sobreposição lateral de 70%.

A velocidade de cruzeiro da aeronave foi ajustada para 9 m/s. O voo resultou na aquisição de 147 imagens, com tempo total de voo de 4 minutos e 22 segundos, conforme informações fornecidas pelo software de planejamento de voo embarcado no drone.

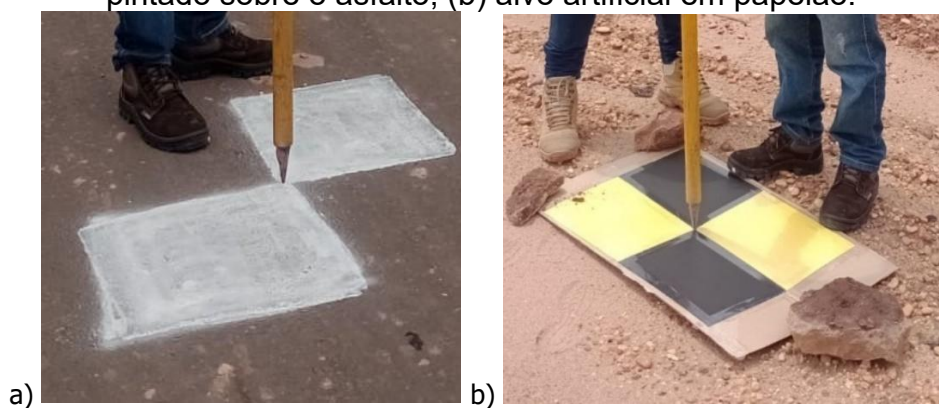
2.2 LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE EM CAMPO

Antes da execução do voo, foram definidos e implantados pontos de apoio em campo, os quais foram utilizados como pontos de controle (GCP – *Ground Control Points*) e pontos de verificação (*Check Points*) para avaliação da acurácia posicional dos produtos gerados.

Ao todo, foram coletados nove pontos, cujas coordenadas foram obtidas por posicionamento por satélite com receptor GNSS da marca ComNav T300, um equipamento de alta precisão (7-10 mm), método de posicionamento – RTK, com tempo médio de rastreamento de 10 segundos a precisão estimada na horizontal de 10mm e vertical de 20mm.

A Figura 2 ilustra exemplos dos alvos utilizados durante o levantamento de campo, onde foram utilizados dois tipos de alvos para materialização dos pontos em campo: Alvos pintados diretamente sobre o asfalto ou calçamento, utilizando tinta branca; e Alvos artificiais confeccionados em papelão, com padrão de alto contraste, facilitando sua identificação nas imagens aéreas.

Figura 1 – Exemplos de materialização dos pontos de apoio em campo: (a) alvo pintado sobre o asfalto; (b) alvo artificial em papelão.



Fonte: Dos autores.

Na Tabela 1 temos a relação dos nove pontos levantados, indicando o tipo de alvo utilizado e suas coordenadas com base no sistema de referência geodésico SIRGAS 2000, utilizando coordenadas UTM Zona 23.

Tabela 1 – Relação dos pontos de apoio utilizados no levantamento aerofotogramétrico.

Nome do ponto	Tipo de alvo	E (X) m	N (Y) m	Z m
Ponto 01	Tinta	749269,168	9438457,892	105,405
Ponto 02	Tinta	749160,024	9438438,258	102,497
Ponto 03	Tinta	749032,644	9438407,526	94,810
Ponto 04	Tinta	749017,385	9438520,473	98,091
Ponto 05	Tinta	749148,684	9438511,672	104,536
Ponto 06	Tinta	749287,895	9438501,033	108,571
Controle 1	Alvo em papelão	749163,543	9438478,240	104,587
Controle 2	Alvo em papelão	749055,378	9438467,122	99,430
Controle 3	Alvo em papelão	749072,269	9438430,128	96,000

Fonte: Dos autores.

As coordenadas dos pontos levantados foram armazenadas em um arquivo de texto para ser importada ao software de processamento.

2.3 PROCESSAMENTO FOTOGRAFAMÉTRICO DAS IMAGENS

O processamento das imagens foi realizado no software *Agisoft Metashape Professional* (Agisoft LLC), utilizando licença de avaliação. Foram realizados quatro tipos distintos de processamento, com o objetivo de avaliar a influência do uso de pontos de controle e da transformação altimétrica na qualidade dos produtos gerados.

Os processamentos foram definidos da seguinte forma:

- **Processamento A:** utilização de 6 pontos de controle e 3 pontos de verificação, conforme os nomes da Tabela 1;
- **Processamento B:** utilização de todos os nove pontos como pontos de controle, sem pontos independentes de verificação;
- **Processamento C:** processamento sem utilização de pontos de controle e sem transformação das altitudes, permanecendo as altitudes geométricas provenientes do GNSS embarcado;

- **Processamento D:** processamento sem pontos de controle, porém com transformação das altitudes geométricas em altitudes ortométricas, conforme modelo geoidal oficial.

Para todos os processamentos, as coordenadas das imagens foram convertidas do sistema WGS 84 para o sistema SIRGAS 2000 / UTM Zona 23 Sul.

No Processamento D, foi realizada a conversão das altitudes geométricas (h) obtidas pelo receptor GNSS embarcado para altitudes ortométricas/normais (H^N), utilizando o modelo geoidal hgeoHNOR2020, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O modelo fornece a separação geoidal (η) entre o elipsoide de referência do SIRGAS2000 e a superfície de referência vertical da realização REALT-2018 do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). A conversão foi realizada conforme a Equação 1:

$$H^N_{\text{mod}} = h - \eta \quad \text{Equação (1)}$$

Inicialmente, as coordenadas das imagens foram exportadas em formato de arquivo texto. Em seguida, os valores de separação geoidal foram obtidos a partir do modelo hgeoHNOR2020, e as altitudes corrigidas foram reimportadas no Metashape para a continuidade do processamento.

Em todos os cenários foram adotadas as mesmas etapas e parâmetros de processamento, visando garantir a comparabilidade entre os resultados.

A sequência de processamento foi:

1. Importação das imagens.
2. Definição do sistema de referência espacial.
3. Importação dos pontos de controle (apenas nos Processamentos A e B).
4. Alinhamento inicial das imagens, com precisão Alta, ativando as opções *excluir pontos de amarração fixos* e *Ajuste adaptativo do modelo da câmera*.
5. Filtragem da nuvem de pontos esparsa por meio da ferramenta Seleção Gradual, no qual em cada critério, os pontos selecionados foram excluídos. Critérios adotados:
 - Erro de reprojeção: remoção de até 10% dos pontos;
 - Incerteza na reconstrução: nível 15.
 - Precisão da projeção: nível 10;

6. Otimização do alinhamento das câmeras ajustando os parâmetros f , k_1 , k_2 , k_3 , c_x , c_y , p_1 , p_2 , b_1 e b_2 .
7. Geração da nuvem de pontos densa, utilizando qualidade Alta e Filtragem de profundidade Moderada.
8. Geração do Modelo Digital de Superfície (MDS), a partir da nuvem de pontos densa;
9. Geração do ortomosaico, utilizando o MDS como superfície de referência.

A resolução média do MDS foi de 0,0359 m, enquanto o ortomosaico foi gerado com resolução de 0,02 m. Para os objetivos deste estudo, foi mantida a mesma resolução espacial em todos os produtos, garantindo a comparabilidade entre os processamentos.

2.4 ANÁLISE DOS PRODUTOS E EXTRAÇÃO DAS COORDENADAS

Após a geração dos produtos, as análises foram realizadas no software QGIS. Inicialmente, foi criado um arquivo vetorial do tipo ponto, no formato *shapefile*, contendo os campos de atributos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura da tabela de atributos da camada de pontos.

Campo	Descrição
id	Identificador único
nome	Código do ponto
cod_proces	Código do processamento (A, B, C ou D)
x	Coordenada X
y	Coordenada Y
z	Coordenada Z

Fonte: Dos autores.

Com base nessa camada, foi realizada a vetorização do centro de cada alvo, utilizando como referência espacial: os ortomosaicos, para extração das coordenadas X e Y; e os Modelos Digitais de Superfície, para extração da coordenada Z.

A extração das coordenadas foi realizada por meio da calculadora de campos do QGIS. Posteriormente, os dados foram exportados em formato de texto e organizados em planilhas eletrônicas para a realização das análises quantitativas.

2.5 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL

A avaliação da acurácia posicional de produtos geoespaciais constitui uma etapa essencial no processamento aerofotogramétrico, permitindo quantificar o grau de concordância entre coordenadas derivadas de modelos digitais e ortomosaicos e as coordenadas de referência coletadas com maior precisão no campo. Essa avaliação é especialmente crítica em estudos comparativos que envolvem diferentes estratégias de controle geodésico, como no presente trabalho.

Segundo a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS*), a acurácia de um produto espacial deve ser analisada com base em um conjunto de pontos independentes de verificação, que não foram utilizados no ajuste das imagens, de forma a evitar sobreajustes (*overfitting*) e proporcionar uma estimativa realista do erro posicional absoluto (ASPRS, 2024).

A ASPRS (2024) recomenda que a avaliação seja realizada com base em métricas estatísticas objetivas, sendo o Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error – RMSE*) o principal indicador para expressar a acurácia posicional de dados geoespaciais digitais. Segundo o padrão atualizado, o RMSE é considerado suficiente para representar a acurácia do produto, substituindo abordagens baseadas exclusivamente em níveis de confiança percentuais, que podem gerar interpretações ambíguas.

Neste estudo, a acurácia posicional foi avaliada separadamente para as componentes planimétricas (X e Y) e altimétrica (Z), bem como de forma integrada, conforme preconizado pela ASPRS. Inicialmente, foram calculados os erros residuais individuais para cada ponto de verificação, obtidos pela diferença entre as coordenadas observadas no produto fotogramétrico e as coordenadas de referência levantadas em campo:

$$\Delta X = X_{fot} - X_{ref} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\Delta Y = Y_{fot} - Y_{ref} \quad \text{Equação (3)}$$

$$\Delta Z = Z_{fot} - Z_{ref} \quad \text{Equação (4)}$$

onde $X_{fot}, Y_{fot}, Z_{fot}$ são as coordenadas extraídas dos ortomosaicos e modelos digitais de superfície gerados em cada processamento, e $X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}$ correspondem às coordenadas GNSS de referência calculadas em campo.

A partir dessas diferenças, foram calculados os RMSE para as componentes planimétricas e altimétrica:

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta X)^2} \quad \text{Equação (5)}$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta Y)^2} \quad \text{Equação (6)}$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta Z)^2} \quad \text{Equação (7)}$$

onde n representa o número total de pontos de verificação.

A acurácia planimétrica foi expressa pelo RMSE horizontal (RMSE_H), obtido pela combinação das componentes X e Y, conforme estabelecido pelo padrão ASPRS:

$$RMSE_H = \sqrt{(RMSE_X)^2 + (RMSE_Y)^2} \quad \text{Equação (8)}$$

Para a análise tridimensional, foi calculado o RMSE tridimensional (RMSE_3D), que integra as componentes horizontais e verticais do erro posicional:

$$RMSE_{3D} = \sqrt{(RMSE_X)^2 + (RMSE_Y)^2 + (RMSE_Z)^2} \quad \text{Equação (9)}$$

Além disso, com base no RMSE horizontal, foram estimados os indicadores CE90 (*Circular Error at 90%*) e LE90 (*Linear Error at 90%*), amplamente utilizados na literatura para expressar a acurácia posicional de forma probabilística, permitindo a comparação com outros estudos e padrões técnicos.

3 RESULTADOS

Este estudo parte da hipótese de que, em levantamentos aerofotogramétricos realizados com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) equipadas com receptores

GNSS embarcados, é possível obter produtos com acurácia geométrica compatível com diferentes classes de aplicação cartográfica mesmo na ausência de pontos de controle em campo, desde que sejam adotadas estratégias adequadas de processamento e, quando necessário, tratamento altimétrico por meio de modelos geoidais. Tal hipótese fundamenta-se nos avanços recentes dos sistemas de posicionamento embarcados e nas diretrizes da Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), que reconhecem o uso do georreferenciamento direto como alternativa viável em determinados contextos de mapeamento.

Nesse sentido, os resultados foram analisados não apenas sob a ótica da acurácia posicional, mas também considerando aspectos operacionais, como tempo de campo, esforço de processamento e custos associados à coleta de pontos de controle, elementos fundamentais para a avaliação da viabilidade técnica e econômica dos diferentes cenários de processamento.

A Tabela 3 apresenta os resultados da avaliação da acurácia posicional dos ortomosaicos e dos Modelos Digitais de Superfície (MDS) gerados a partir dos quatro cenários de processamento analisados. São apresentados os valores de RMSE para as componentes planimétricas X e Y, o RMSE planimétrico consolidado (RMSE_PLAN), o RMSE altimétrico (RMSE_Z) e o RMSE tridimensional (RMSE3D), permitindo a comparação direta da qualidade geométrica dos produtos obtidos sob diferentes estratégias de controle geodésico e tratamento altimétrico.

Tabela 3 – Acurácia posicional dos produtos fotogramétricos nos diferentes cenários de processamento.

Processamento	RMSE_X (m)	RMSE_Y (m)	RMSE_PLAN (m)	RMSE_Z (m)	RMSE3D (m)
A – GCP + CP	0,0112	0,0106	0,0154	0,340	0,341
B – Todos GCP	0,0186	0,0102	0,0212	0,246	0,247
C – Sem GCP	1,535	1,044	1,856	25,841	25,908
D – Sem GCP + Alt. Orto	1,534	1,043	1,854	4,062	4,466

Fonte: Dos autores.

De modo geral, observa-se que os processamentos que utilizaram pontos de controle em campo (A e B) apresentaram os menores valores de erro planimétrico e tridimensional, indicando elevada acurácia geométrica dos produtos gerados. O Processamento A apresentou RMSE_PLAN de 0,0154 m, enquanto o Processamento B apresentou RMSE_PLAN de 0,0212 m, ambos caracterizando desempenho planimétrico de ordem centimétrica. A diferença observada entre esses dois cenários indica que o uso de todos os pontos como pontos de controle não resultou em ganhos expressivos de acurácia planimétrica quando comparado ao uso combinado de pontos de controle e pontos de verificação, reforçando a importância da existência de pontos independentes para avaliação realista do erro posicional, conforme recomendado pela ASPRS.

Em relação à componente altimétrica, os Processamentos A e B apresentaram RMSE_Z de 0,340 m e 0,246 m, respectivamente, refletindo diretamente nos valores de RMSE3D, que se mantiveram inferiores a 0,35 m. Esses resultados evidenciam que, mesmo em levantamentos de pequena área, a componente vertical tende a exercer influência dominante na acurácia tridimensional.

Em contraste, os processamentos realizados sem utilização de pontos de controle (C e D) apresentaram valores significativamente superiores de erro posicional. No Processamento C, que utilizou exclusivamente o georreferenciamento direto do GNSS embarcado e manteve as altitudes geométricas, o RMSE_PLAN atingiu 1,856 m e o RMSE_Z alcançou 25,841 m, resultando em um RMSE3D de 25,908 m, caracterizando acentuada degradação da qualidade geométrica, especialmente na componente vertical.

O Processamento D, embora também não tenha utilizado pontos de controle em campo, incorporou a transformação das altitudes geométricas em altitudes ortométricas por meio de modelo geoidal oficial. Nesse cenário, o RMSE_PLAN manteve-se praticamente inalterado em relação ao Processamento C (1,854 m), indicando que a transformação altimétrica não exerce influência sobre a componente planimétrica. Entretanto, observou-se uma redução substancial do erro altimétrico, com o RMSE_Z diminuindo de 25,841 m para 4,062 m, o que representa redução superior a 80%, refletindo diretamente na diminuição do RMSE3D para 4,466 m.

3.1 RELAÇÃO ENTRE RMSE E GSD

De acordo com as diretrizes da ASPRS, a avaliação da qualidade geométrica de produtos fotogramétricos pode ser relacionada ao *Ground Sample Distance* (GSD), estabelecendo faixas interpretativas de acurácia em função da razão entre o RMSE horizontal e o tamanho do pixel no terreno. A Tabela 4 apresenta essa relação conceitual.

Tabela 4 – Relação entre RMSE horizontal e GSD segundo a ASPRS.

RMSE_H	Interpretação prática
$\leq 2 \times \text{GSD}$	Alta precisão cartográfica
$2-5 \times \text{GSD}$	Mapeamento temático
$> 5 \times \text{GSD}$	Uso exploratório

Fonte: ASPRS, 2024.

Considerando o GSD dos produtos deste estudo, de aproximadamente 2 cm para as ortofotos e 3,6 cm para os MDS, observa-se que os Processamentos A e B apresentam RMSE_PLAN inferiores a $2 \times \text{GSD}$, enquadrando-se na categoria de alta precisão cartográfica. Por outro lado, os Processamentos C e D apresentam RMSE_PLAN muito superiores a $5 \times \text{GSD}$, caracterizando produtos adequados apenas para aplicações exploratórias ou temáticas, conforme o grau de exigência geométrica da aplicação.

A adequação dos produtos gerados às diferentes classes de aplicação cartográfica pode ser discutida à luz das normas nacionais de controle de qualidade posicional. No contexto brasileiro, o Decreto nº 89.817/1984 estabelece o conceito de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), definindo classes de exatidão (A, B e C) associadas à escala do produto, conforme exemplificado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores aproximados de erro planimétrico admissível segundo o PEC.

Escala	Classe A	Classe B	Classe C
1:1.000	~0,25 m	~0,50 m	~0,75 m
1:5.000	~1,25 m	~2,50 m	~3,75 m
1:10.000	~2,50 m	~5,00 m	~7,50 m

Fonte: Brasil, 1984.

Historicamente, essas escalas estão associadas a diferentes tipos de aplicação, sendo a escala 1:1.000 relacionada a cadastro e engenharia urbana, a escala 1:5.000 a planejamento urbano e regional, e escalas 1:10.000 ou menores a aplicações ambientais e regionais. Embora o presente estudo não tenha como objetivo o enquadramento formal dos produtos em classes do PEC, os valores de RMSE obtidos permitem inferir sua compatibilidade com essas escalas e aplicações.

Complementarmente, a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) estabelece que a avaliação da qualidade posicional deve ser realizada com base na acurácia absoluta e interpretada segundo o princípio da adequação ao uso. Sob essa perspectiva, foi elaborado a Tabela 6, que relaciona níveis de acurácia planimétrica e altimétrica a classes de aplicação, de forma interpretativa.

Tabela 6 – Relação entre níveis de acurácia e classes de aplicação dos produtos fotogramétricos.

RMSE Planimétrico	RMSE Altimétrico	Classe de aplicação	Exemplos de uso
≤ 0,05 m	≤ 0,50 m	Alta precisão cartográfica	Cadastro urbano, projetos preliminares, base de referência
0,05 – 0,50 m	0,50 – 2,00 m	Precisão intermediária	Planejamento urbano, infraestrutura, mapeamento local
0,50 – 2,00 m	2,00 – 5,00 m	Precisão moderada	Monitoramento ambiental, uso e cobertura da terra
> 2,00 m	> 5,00 m	Uso exploratório	Estudos preliminares, análises qualitativas

Fonte: Dos autores.

À luz desse quadro, os Processamentos A e B enquadram-se claramente na classe de alta precisão cartográfica, enquanto o Processamento D apresenta precisão compatível com aplicações ambientais e de planejamento preliminar. O Processamento C, por sua vez, restringe-se a usos exploratórios, especialmente devido à elevada incerteza altimétrica.

3.2 IMPLICAÇÕES OPERACIONAIS E FATORES QUE INFLUENCIAM A ACURÁCIA

A análise integrada dos resultados evidencia que a decisão quanto à utilização de pontos de controle deve considerar não apenas os requisitos de acurácia, mas também aspectos operacionais e econômicos. A coleta de pontos de controle em campo implica aumento do tempo de levantamento, demanda equipamentos GNSS de maior precisão e exige etapas adicionais de processamento, como a pontaria manual dos alvos nas imagens, que demanda esforço e tempo do operador.

Ressalta-se, por fim, que as variações observadas na acurácia posicional não estão associadas exclusivamente à presença ou ausência de pontos de controle, mas também a um conjunto de fatores interdependentes, como o modelo de aeronave remotamente pilotada utilizada, as características do sensor embarcado, o planejamento do voo, o método de levantamento dos pontos de controle e as opções adotadas nas etapas de processamento fotogramétrico. Aspectos como a precisão da pontaria dos pontos de controle, a filtragem e eventual classificação da nuvem de pontos e os parâmetros de geração dos modelos digitais exercem influência direta sobre os resultados, devendo ser considerados na interpretação e generalização das conclusões deste estudo.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a qualidade geométrica de produtos aerofotogramétricos gerados a partir de diferentes estratégias de controle geodésico, com e sem a utilização de pontos de controle em campo, considerando tanto a acurácia posicional quanto os impactos operacionais associados ao tempo, esforço de processamento e custos do levantamento. A hipótese central, de que seria possível obter produtos com acurácia compatível com determinadas classes de aplicação cartográfica mesmo na ausência de pontos de controle, foi parcialmente confirmada.

Os resultados demonstraram que os processamentos que utilizaram pontos de controle em campo apresentaram desempenho superior em termos de acurácia planimétrica e tridimensional, com erros da ordem de centímetros na componente horizontal e inferiores a 0,35 m na componente tridimensional, caracterizando produtos de alta precisão cartográfica, adequados para aplicações que demandam

elevado rigor geométrico, como levantamentos urbanos locais, projetos preliminares de infraestrutura e apoio à cartografia cadastral.

Por outro lado, os cenários sem utilização de pontos de controle evidenciaram perda significativa de acurácia, especialmente na componente altimétrica. Entretanto, a aplicação da transformação das altitudes geométricas em altitudes ortométricas por meio de modelo geoidal oficial resultou em expressiva melhoria da acurácia vertical, reduzindo o erro altimétrico em mais de 80% quando comparado ao processamento sem qualquer correção. Esses resultados indicam que, embora a ausência de pontos de controle comprometa a precisão planimétrica, estratégias de processamento adequadas podem viabilizar o uso dos produtos em aplicações de menor exigência geométrica, como monitoramento ambiental, análises de uso e cobertura da terra e planejamento territorial preliminar.

A análise integrada dos resultados, à luz das diretrizes da ASPRS e das normas brasileiras de controle de qualidade cartográfica, reforça que a decisão quanto à utilização de pontos de controle deve ser orientada pelo princípio da adequação ao uso. Em aplicações nas quais a acurácia centimétrica não é requisito fundamental, a redução do tempo de campo, do esforço de processamento e dos custos associados à coleta e ao tratamento de pontos de controle pode representar vantagem operacional significativa, sem inviabilizar a utilização técnica dos produtos gerados.

Por fim, ressalta-se que os níveis de acurácia obtidos neste estudo estão condicionados a um conjunto específico de fatores, incluindo as características da aeronave remotamente pilotada e do sensor embarcado, o planejamento do voo, o método de levantamento dos pontos de controle e as opções adotadas nas etapas de processamento fotogramétrico. Estudos futuros podem aprofundar essa análise avaliando diferentes plataformas, sensores, densidades e distribuições de pontos de controle, bem como o uso de técnicas avançadas de georreferenciamento direto, como RTK e PPK embarcados, ampliando a compreensão sobre os limites e potencialidades do mapeamento aerofotogramétrico com ARP.

REFERÊNCIAS

AGISOFT LLC. **Agisoft Metashape Professional** [software de computador] Versão 2.1.1 São Petersburgo, 2024. Disponível em: <https://www.agisoft.com>. Acesso em: 07 set. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). **Positional accuracy standards for digital geospatial data**. 2. ed. Bethesda, MD: ASPRS, 2024. <https://asprs.org/Main/Main/Standards/Positional-Accuracy-Standards.aspx>. Acesso em: 17 set. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as normas reguladoras do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Diário Oficial da União, Brasília. 22 jun. 1984. Acesso em: 06 set. 2025.

BRASIL. **Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. 2. ed. Brasília: DSG, 2016. Acesso em: 06 set. 2025.

CARVALHO, L. R.; SANTOS, R. M.; ALMEIDA, M. J. **Differential adjustment integrating kinematic GNSS measurements and ground control points for UAV photogrammetry**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 185, p. 101–112, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.004>. Acesso em: 23 set. 2025.

DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. **High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision**. *Remote Sensing of Environment*, v. 136, p. 259–276, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.024>. Acesso em: 16 set. 2025.

DOS SANTOS, J. M. A.; DA SILVA, P. C. M.; TINOCO, V. N. V. **Técnicas de levantamento topográfico: uma análise comparativa da aerofotogrametria e GNSS RTK**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2024. Acesso em: 02 out. 2025.

EISENBEISS, H. **UAV photogrammetry**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências) – Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264>. Acesso em: 16 set. 2025.

MOREIRA, A. T.; COSTA, F. L.; BRAGA, R. P. **Avaliação de diferentes arranjos de pontos de controle em levantamentos UAV em áreas com relevo complexo**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 70, n. 3, p. 441–457, 2018. Acesso em: 02 out. 2025.

NEX, F.; REMONDINO, F. **UAV for 3D mapping applications: a review**. *Applied Geomatics*, v. 6, p. 1–15, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>. Acesso em: 16 set. 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System** [software de computador] Versão 3.24.2. Open-Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 07 set. 2025.

REMONDINO, F.; FRASER, C. S. **Digital camera calibration methods: considerations and comparisons**. In: *ISPRS Commission V Symposium*, 2006, Dresden. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 36, parte 5, p. 266–272, 2006. Acesso em: 10 out. 2025.

SILVA, A. B. **Avaliação comparativa entre softwares comerciais e soluções open-source para geração de ortomosaicos a partir de imagens UAV.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Acesso em: 02 out. 2025.

TOTH, C.; JÓZKÓW, G. **Remote sensing platforms and sensors: a survey.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 115, p. 22–36, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>. Acesso em: 10 out. 2025.