



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID34481>



Mapeamento topográfico com aeronave remotamente pilotada para fins de georreferenciamento de propriedades rurais

Topographic mapping with remotely piloted aircraft for georeferencing rural properties

Miguel Julio Machado Guimarães¹, Anaide Carolane Da Silva Santos², Anderson Santos da Silva³, Denis Pereira Ribeiro⁴, Juliane Rafaela Alves Barros⁵, Iug Lopes⁶

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Santa Inês, Santa Inês/BA, Brasil. Email: Miguel.guimaraes@ifbaiano.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5497-6442>

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Raimundo das Mangabeiras, São Raimundo das Mangabeiras/MA, Brasil. Email: anaidecarolanesilva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2827-7608>

³ Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Campus Garanhuns, Garanhuns/PE, Brasil. Email: anderson.silva@ufape.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2229-501X>

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Raimundo das Mangabeiras, São Raimundo das Mangabeiras/MA, Brasil. Email: denis.ribeiro@ifma.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0689-0753>

⁵ Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Feira de Santana/BA, Brasil. Email: Juliane-ab@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0408-0904>

⁶ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Bom Jesus da Lapa, Bom Jesus da Lapa/BA, Brasil. Email: iug.lopes@ifbaiano.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-4774>

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade de produtos digitais obtidos em levantamentos topográficos com aeronave remotamente pilotada para fins de georreferenciamento de imóveis rurais. O estudo foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Raimundo das Mangabeiras. Foram selecionadas três áreas com diferentes declividades no terreno: 0 a 5%, 5 a 10% e 10 a 20%. Em cada área foram realizados levantamentos geodésicos com GNSS e aerofotogramétrico com aeronave remotamente pilotada (em três alturas de voo: 70, 80 e 90 m) para coletar as coordenadas de pontos topográficos foto identificáveis, totalizando nove combinações de declividade e altura de voo. O processamento digital das imagens foi realizado tendo como base a técnica *Structure from motion*, tendo como produto final o ortomosaico e o modelo digital de elevação de cada área/altura de voo. As imagens confeccionadas foram avaliadas conforme os critérios estabelecidos pela Norma Técnica ABNT NBR 13.133/2021 e pelo Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2ª Edição. Foi possível obter produtos digitais com alta precisão posicional planialtimétrica quando comparada a trabalhos similares encontrados na literatura. Pode-se concluir que a altura de voo deve ser configurada de acordo com a declividade do terreno a ser mapeado. Em áreas com maior declividade recomenda-se que os voos sejam realizados em alturas menores para garantir uma maior precisão planialtimétrica dos ortomosaicos e dos modelos digitais de elevação.

Palavras-chave: Levantamento planialtimétrico; Parâmetros de voo; Avaliação da precisão.

Abstract: The goal of this study was to evaluate the quality of digital products obtained in topographic surveys using remotely piloted aircraft for the georeferencing of rural properties. The study was conducted at the Federal Institute of Education, Science, and Technology of Maranhão, São Raimundo das Mangabeiras Campus. Three areas with different terrain slopes were selected: 0 to 5%, 5 to 10%, and 10 to 20%. In each area, geodetic surveys were conducted using GNSS and aerial photogrammetry with a remotely piloted aircraft (at three flight altitudes: 70, 80, and 90 meters) to collect coordinates of photo-identifiable topographic points, totaling nine combinations of slope and flight altitude. Digital image processing was carried out using the Structure from Motion technique, resulting in orthomosaics and digital elevation models for each area/flight altitude as the final products. The generated images were evaluated according to the criteria established by the ABNT NBR 13.133/2021 Technical Standard and the Technical Manual for the Georeferencing of Rural Properties - 2nd Edition. It was possible to obtain digital products with high planimetric and altimetric positional accuracy when compared to similar studies found in the literature. It can be concluded that the flight altitude should be configured according to the terrain slope to be mapped. In areas with steeper slopes, it is recommended to conduct flights at lower altitudes to ensure greater planimetric accuracy of orthomosaics and digital elevation models.

Keywords: Planialtimetric Survey; Flight parameters; Accuracy assessment.

Recebido: 27/10/2023; Aceito: 19/12/2024; Publicado: 21/01/2025.

1. Introdução

A utilização da aerofotogrametria a curta distância para fins topográficos aumentou notavelmente durante a última década devido ao aumento da disponibilidade de sistemas de aquisição de imagens digitais mais eficientes, juntamente com o avanço de técnicas mais fáceis para o processamento digital de imagens (PDI) (SADEQ, 2019).

Dados topográficos são largamente usados como grande informação de suporte em várias áreas de pesquisa e aplicações civis como gestão ambiental, agricultura e regulação fundiária (PIJL *et al.*, 2020), além de ser ferramenta indispensável na maioria dos experimentos agrícolas. A aquisição de dados topográficos, no entanto, sempre foi uma atividade relativamente lenta, demandante de elevado grau de conhecimento técnico e custosa.

Buscando solução para esse problema, iniciou-se o uso de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) para aquisição de dados geográficos. O primeiro uso comercial registrado de um ARP foi no início da década de 1980 no Japão, quando realizaram a aplicação de pesticidas em fazendas de arroz, entretanto a tecnologia para a época era cara e muito pesada (WONZOSKI & OLIVEIRA, 2020).

As ARPs são equipamentos muito eficientes na aquisição de dados cartográficos e geoespaciais em grande escala, os quais podem ser utilizados para gerar vários produtos nos diversos campos das ciências, podendo-se citar modelos digitais de superfície (MDS), ortofotos, modelos 3D de edifícios, mapas topográficos, características planimétricas e levantamento quantitativo, entre outros. Estes produtos são cruciais em diferentes áreas, tais como mapeamento topográfico, planejamento urbano e rural, gestão de atividades agrícolas, modelagem de fenômenos ambientais, entre outros (COLOMINA & MOLINA, 2014; OLLERO, 2015).

A modernização de técnicas de sensoriamento remoto para topografia possibilitou que os dados topográficos obtidos por aerofotogrametria com ARPs fossem crescentemente acessíveis e acurados (SILVA *et al.*, 2022). Para que estes dados sejam acurados, uma série de configurações e metodologias precisam ser aplicadas, tais quais altura de voo, tamanho do GSD (do inglês - *Ground Sample Distance*), velocidade de voo, porcentagem de sobreposição de imagens, número e localização de pontos de controle, entre outros.

Como principal produto topográfico de um levantamento realizado por aerofotogrametria tem-se as ortofotos e os modelos digitais de terreno e elevação. Estes produtos são gerados tendo como base de processamento a técnica SFM (do inglês - *Structure from motion*), que é uma técnica de processamento de imagem utilizada para reconstruir estruturas tridimensionais a partir de sequências de imagens bidimensionais coletadas em sensores em movimento (JIANG *et al.*, 2020).

Qualquer imagem obtida através da técnica SFM pode ter coordenadas georreferenciadas em um sistema de referência geográfica. Isso pode ser feito através dos dados de localização registrados pelas ARPs nos metadados das imagens, os quais possuem sensores com Sistema de Posicionamento Global (GPS) de navegação com baixa precisão topográfica, bem como com a inserção de pontos de referências foto identificáveis com coordenadas geográficas previamente conhecidas na área a ser levantada, denominados pontos de controle (PC) (SANZ-ABLANEDO *et al.* 2018).

Para que os produtos digitais obtidos em trabalhos topográficos com ARPs sejam utilizados no georreferenciamento de imóveis rurais uma série de padrões de precisão devem ser respeitados. No Brasil, o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) publicou no ano de 2022 o Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2ª Edição (INCRA, 2022), o qual cita os critérios que devem ser atendidos ao utilizar aerofotogrametria para fins de georreferenciamento de imóveis rurais.

Observando a importância de incorporar novas tecnologias em levantamentos de dados pelos diferentes profissionais das ciências exatas, o objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade de produtos digitais obtidos em levantamentos topográficos com aeronave remotamente pilotada para fins de georreferenciamento de imóveis rurais.

2. Metodologia

O estudo foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Raimundo das Mangabeiras, no âmbito do grupo de pesquisa NUAPI – Núcleo de Agricultura de Precisão e Irrigação. Foram selecionadas três áreas em uma propriedade rural, com diferentes declividades no terreno para serem utilizadas como áreas experimentais: 0 a 5%, 5 a 10% e 10 a 20% de declividade, conforme a Figura 1.

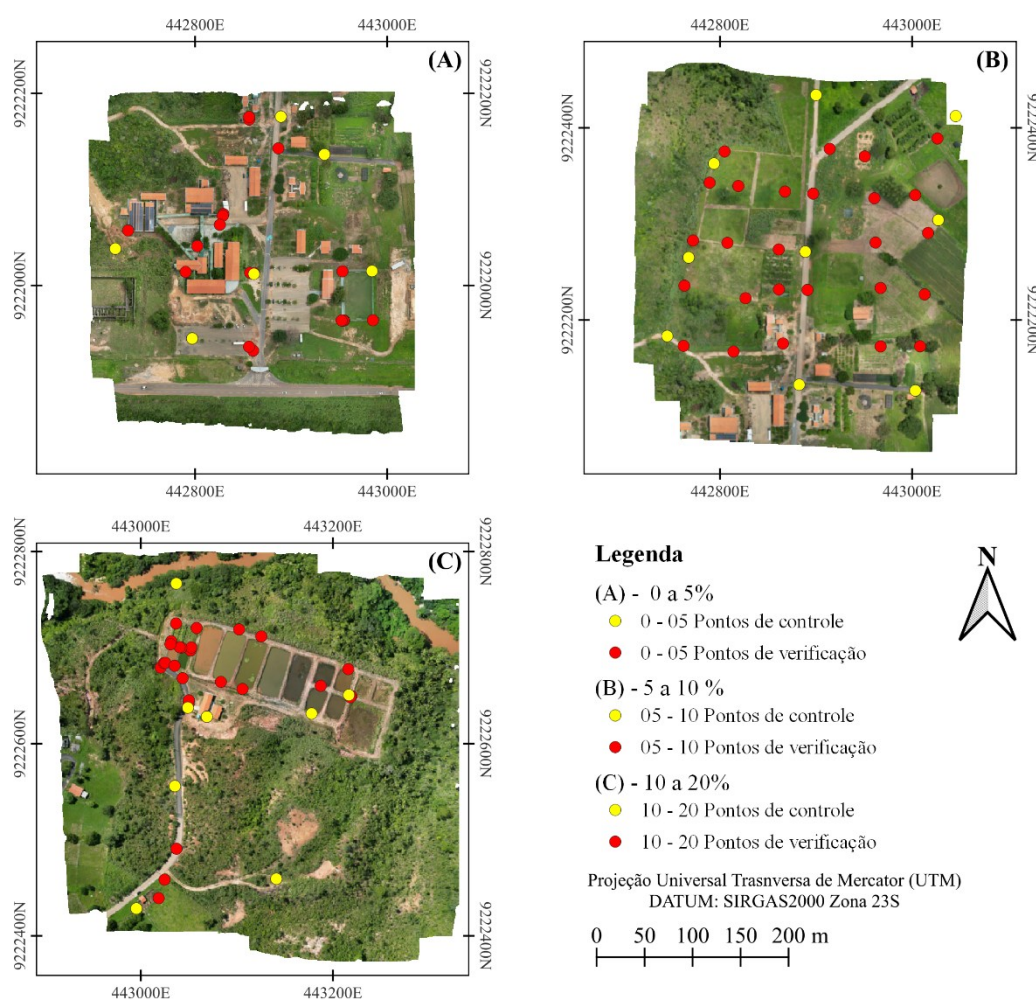


Figura 1 – Área de estudo com distribuição geográfica dos pontos de controle e verificação. (A) – 0 a 5% de declividade, (B) – 5 a 10% de declividade, (C) – 10 a 20% de declividade.

Fonte: Autores (2024).


Após a seleção das áreas experimentais, foram realizados levantamentos geodésicos seguindo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13.133/2021, que trata dos procedimentos inerentes aos levantamentos topográficos (ABNT, 2021). Esta etapa consistiu em coletar as coordenadas geográficas de pontos foto identificáveis, em seguida foram divididos em pontos de controle (PCs) e pontos de verificação (PVs). Os PCs foram utilizados para fazer a relação entre os sistemas de coordenadas da imagem com o de coordenadas do terreno (georreferenciamento da imagem). Acerca dos PVs, foram usados na verificação estatística da precisão dos produtos gerados. Os dados obtidos com os levantamentos geodésicos foram aplicados como padrão de referência na avaliação dos resultados.

Foi utilizado um par de aparelhos embarcado pelo Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS) identificado pelo modelo FOIF A30, com acurácia de 10 mm + 1 ppm para horizontal e 20 mm + 1 ppm na vertical, no modo RTK (*Real-Time Kinematic*). Uma base de referência foi instalada em um ponto central na área experimental, sendo esses dados processados através da técnica de Posicionamento por Ponto Preciso pela plataforma IBGE-PPP - Serviço online para pós-processamento de dados GNSS, que processa dados de base GNSS coletados por receptores para permitir obter coordenadas referenciadas ao SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (IBGE, 2021). A partir das coordenadas precisas da base fornecidas pela plataforma, foi realizada a correção das coordenadas coletadas de todos os pontos do levantamento.

Todos os pontos coletados (GPC e PV) foram marcados no chão com tinta branca/gesso em pó para facilitar a fotoidentificação durante o PDI.

Em seguida foram realizados os levantamentos aerofotogramétricos com a utilização de uma aeronave remotamente pilotada (ARP) multirotor da marca DJI, modelo Mavic Air 2S. As especificações da ARP utilizada são apresentadas na Tabela 1. Em cada área experimental (0 a 5%, 5 a 10% e 10 a 20%) foram realizados três levantamentos, diferenciando-se entre si na altura de voo: 70, 80 e 90 metros, respectivamente, totalizando nove combinações.

Tabela 1 – Especificações da aeronave remotamente pilotada utilizada no estudo.

Atributos	Especificações	Imagem
Marca	DJI	
Modelo	AIR 2S	
Peso de decolagem	595 g	
Dimensões aberto	183×253×77 mm	
Tempo máx. de voo (sem vento)	31 minutos	
Distância máx. de voo (sem vento)	18,5 km	
Velocidade máx. de voo	19 m/s (modo S) / 15 m/s (modo N) / 5 m/s (modo C)	
Alcance da temperatura de funcionamento	0° a 40 °C	
Frequências de funcionamento	2,4 GHz - 5,8 GHz	
GNSS	GPS+GLONASS+GALILEO	
Sensor	CMOS de 1”	
Píxeis efetivos	20 MP; dimensões de píxeis de 2,4 µm	
Abertura	f/2.8	
Tamanho da imagem	20 MP; 5472×3648 (3:2); 5472×3078 (16:9)	
Estabilização	Triaxial (inclinação, rotação, giro)	

Fonte: Site do fabricante (<https://www.dji.com/br/support/product/air-2s>).

Os voos foram planejados no software mobile Drone Harmony, velocidade de 8 m s⁻¹ e 80% de sobreposição lateral e longitudinal. As áreas dos levantamentos foram delimitadas com intuito de coletar todos os pontos topográficos (PC e PV) implantados por todo perímetro da área de estudo.

O processamento digital das imagens (PDI) foi realizado tendo como base de processamento a técnica SFM, que é uma técnica de processamento de imagem utilizada para reconstruir estruturas tridimensionais a partir de sequências de imagens bidimensionais coletadas em sensores em movimento (JIANG *et al.*, 2020).

A confecção dos produtos topográficos através do PDI seguiu o seguinte fluxo de trabalho: adição de fotos, alinhamento de fotos, apontamento de PCs, realinhamento de fotos, geração de nuvem densa de pontos, geração e exportação de modelo digital de elevação (MDE) e por fim, geração e exportação de ortofoto. Ao final do PDI foram exportados o ortomosaico e o MDE de cada área/altura de voo para análise posterior.

Foi utilizado um computador com a seguinte configuração de hardware para o processamento das imagens: processador Intel Core i5-8265U 1.6GHz com 4 núcleos de processamento e 8 Threads; unidades de armazenamento do tipo SSD com 240 Gb e HD com 1Tb; placa gráfica NVIDIA modelo GeForce RTX 3050 com 4 Gb; e memória RAM de 8 Gb.

Após a exportação dos produtos digitais, o software livre QGIS® 3.28 foi utilizado para extrair as coordenadas X e Y das ortofotos e Z (altimetria) dos MDEs dos pontos de verificação de cada tratamento avaliado. Em seguida, foram calculadas as discrepâncias posicionais das coordenadas dos PVs entre os dados coletadas no levantamento geodésico e os dados extraídos dos produtos digitais gerados (ortomosaico e MDE) de cada combinação declividade/altura, para posterior cálculo dos erros quadráticos médios (RMSE), conforme Equações 1 a 4 propostas por Jiménez-Jiménez *et al.* (2021):

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (xc_i - xv_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_i^n (yc_i - yv_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_i^n (zc_i - zv_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (4)$$

Onde:

$RMSE_x$, $RMSE_y$ e $RMSE_z$ - erros quadráticos médios das coordenadas X, Y e Z, respectivamente;

$RMSE_r$ - erro quadrático médio no plano horizontal;

xc_i , yc_i e zc_i - coordenadas dos PV marcadas nas imagens;

xv_i , yv_i e zv_i - coordenadas dos PV coletadas pelo GNSS;

n - número de pontos de verificação testados;

i - número inteiro variando de 1 a n .

O software GeoPEC 3.5.2 (SANTOS, 2023) foi utilizado para avaliação do padrão de precisão posicional dos produtos gerados conforme as legislações vigentes. Para avaliação planialtimétrica dos produtos gerados foram utilizados os critérios instituídos na Norma Técnica ABNT NBR 13.133/2021 - Execução de levantamento topográfico – Procedimento, a qual institui que os ensaios de precisão realizados devem assegurar que a discrepância calculada atenda a tolerância estabelecida para o estudo, sendo esta três vezes a precisão desejada, sendo que um levantamento topográfico planimétrico e/ou altimétrico deve ser considerado aceito se 90% dos pontos de verificação da precisão atenderem à tolerância considerada. Neste estudo foi considerada uma precisão planialtimétrica desejada de 0,3 m.

Para avaliar se os produtos confeccionados podem ser utilizados em trabalhos de georreferenciamento de imóveis rurais foram utilizados os critérios instituídos pelo Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2ª Edição (INCRA, 2022), sendo os testes realizados considerando uma escala de 1/1000:

- O Ground Sample Distance - GSD deverá ser compatível com a feição a ser identificada, devendo ser respeitada a precisão do tipo de limite a ser representado;
- Utilização de pontos de checagem/verificação, respeitando a proporcionalidade da área, geometria e relevo, objetivando atendimento ao Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC/PCD), conforme Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) e Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais ET-ADGV, ambos da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército;
- A classe resultante do cálculo do PEC deverá estar adequada à precisão exigida para o tipo de limite que se deseja representar;
- Caso se utilizem pontos de controle, estes não deverão ser utilizados como pontos de checagem;
- Para os vértices cujas coordenadas forem determinadas por aerofotogrametria, os valores de precisão posicional serão os valores de Root Mean Square (RMS) obtidos no processo de avaliação da acurácia posicional.

3. Resultados e discussão

A partir dos resultados obtidos e descritos na Tabela 2, pode-se verificar que os produtos digitais gerados (ortomosaico e MDE) apresentaram valores elevados de precisão topográfica em todos os voos avaliados. Foi observado também que em todas as declividades de terreno avaliadas, os voos com maior altura (90 m) apresentaram maiores valores de erros quadráticos médios (RMSE) da coordenada Z e da distância horizontal (H), apesar de pequenas, essas variações podem interferir negativamente na qualidade final do produto digital.

Tabela 2 – Erros quadráticos médios (RMSE) das coordenadas X, Y, Z, e da distância horizontal (H) de produtos cartográficos digitais obtidos por aeronave remotamente pilotada em áreas com diferentes declividades, com imagens coletadas em diferentes alturas de voo.

Declividade	Altura de voo	RMSE (m)			
		X	Y	Z	H

0-5%	70 m	0,11	0,12	0,34	0,17
	80 m	0,11	0,17	0,56	0,20
	90 m	0,23	0,16	0,60	0,28
5-10%	70 m	0,41	0,35	0,69	0,53
	80 m	0,36	0,30	0,49	0,47
	90 m	0,48	0,29	1,17	0,56
10-20%	70 m	0,12	0,11	0,27	0,16
	80 m	0,20	0,16	0,27	0,25
	90 m	0,27	0,18	0,43	0,33

Fonte: Autores (2024).

Conforme os resultados obtidos neste trabalho, sugere-se alta precisão dos ortomosaicos e MDEs produzidos, haja vista que os valores de RMSE observados foram relativamente baixos quando comparados a outros trabalhos similares na literatura.

Fonseca Neto et al. (2017) observaram discrepância média de 0,163 m, com RMSE de 0,186 m ao utilizar a mesma metodologia para avaliar a acurácia posicional planimétrica de um ortomosaico gerado a partir de um sensor embarcado em uma plataforma ARP de modelo idêntico ao utilizado neste trabalho. Vitti et al. (2018), foram verificados valores de RMSE superiores a 0,375 m, com valor máximo de 0,514 m, ao avaliar a precisão de mosaicos de imagens obtidas com ARP com diferentes sensores de aquisição de imagens. Já Liu et al. (2018) e Gómez-Candón et al. (2014) obtiveram resultados de RMSE na ordem milimétrica, indicando a viabilidade do uso desse produto em aplicações de alta precisão.

Os resultados gerados a partir da determinação das discrepâncias horizontais ponto-a-ponto são apresentados na Figura 2.

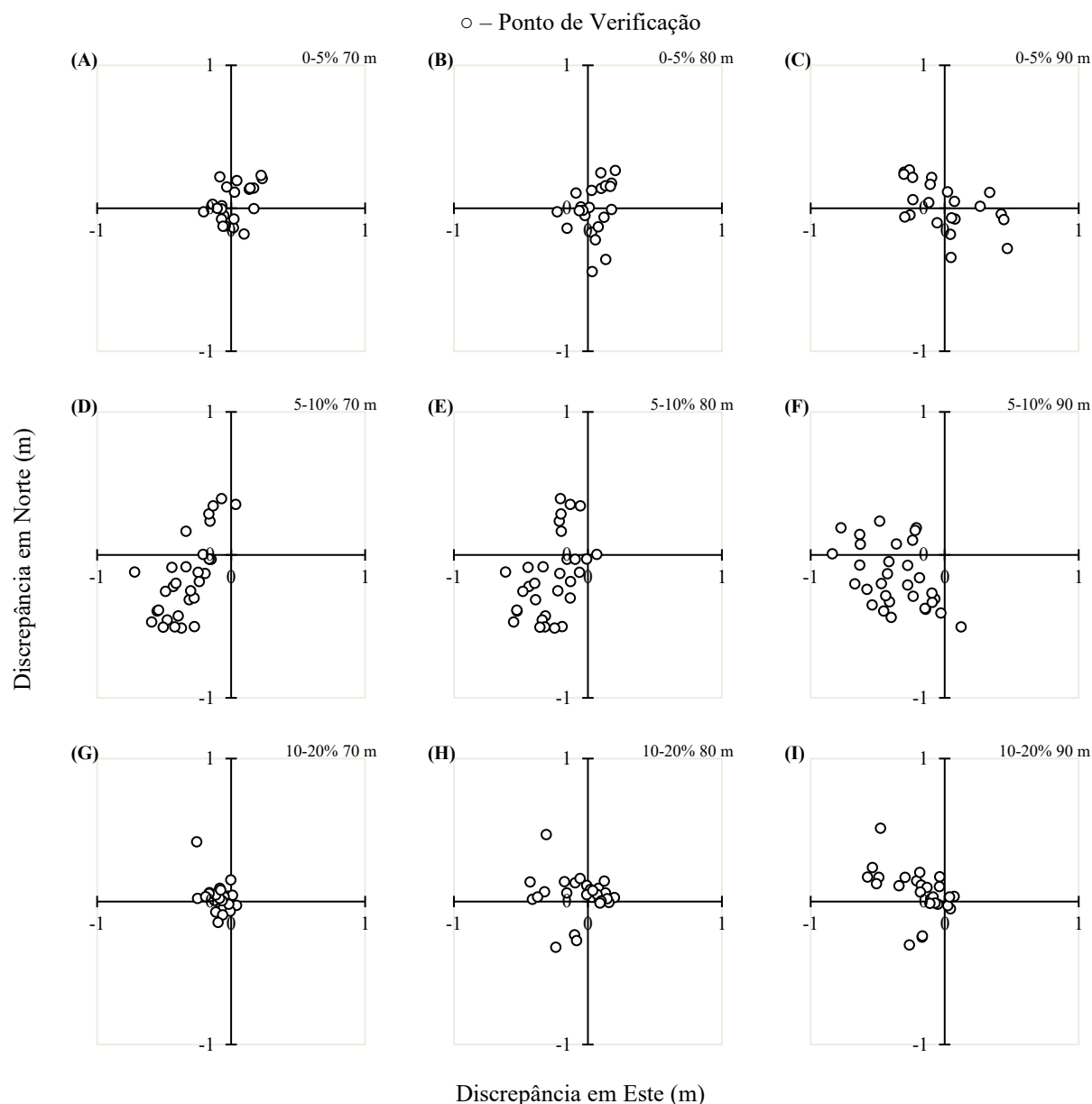


Figura 2 – Discrepância posicional planimétrica de produtos cartográficos digitais obtidos por aeronave remotamente pilotada em áreas com diferentes declividades, com imagens coletadas em diferentes alturas de voo. 0-5%: (A) – 70 m, (B) – 80 m, (C) – 90 m; 5-10%: (D) – 70 m, (E) – 80 m, (F) – 90 m; 10-20%: (G) – 70 m, (H) – 80 m, (I) – 90 m.

Fonte: Autores (2024).

Foi possível observar os valores de discrepâncias posicionais planimétricas no plano norte e leste, além de uma pequena dispersão das discrepâncias em todos os voos realizados. Foram obtidos valores médios de discrepâncias nos planos norte e leste inferiores a 1,0 m em todos os voos avaliados conforme visto anteriormente na Figura 2, sendo que as maiores discrepâncias foram observadas nos voos realizados na área com 5 a 10% de declividade (Figuras 2D, 2E e 2F), com uma maior dispersão dos pontos no quadrante sudoeste, em todas as alturas de voo.

Aquelas situações com declividade de 0 a 5%, ilustrados nas Figuras 2A, 2B e 2C, a dispersão apresentou-se padrão em todos os quadrantes. Nas declividades variando entre 10 a 20%, contempladas pelas Figuras 2G, 2H e 2I, houve uma

dispersão padrão nos voos realizados a 70 e 80 metros de altura, resultando numa dispersão no quadrante noroeste no voo realizado a 90 metros de altura.

Estes resultados podem estar relacionados às condições climáticas do momento do levantamento aerofotogramétrico, haja vista que diversos autores relatam que diversos fatores ambientais incidem na qualidade dos produtos, podendo-se citar a velocidade e direção do vento (SANZ-ABLAMEDO *et al.*, 2018).

Na Figura 3 encontram-se apresentados os recortes de detalhe da precisão de PVs nos ortomosaicos confeccionados. Tais resultados corroboram a precisão planimétrica observada nos resultados supracitados anteriormente. Observa-se diferenças posicionais do PV entre os ortomosaicos confeccionados com imagens obtidas em alturas de voo distintas, em áreas com semelhante declividade.

A variabilidade dos resultados apresenta-se potencialmente vulneráveis às condições climáticas durante o período de coleta das imagens, tendo em consideração que fatores climáticos interferem diretamente na qualidade do sinal de GPS captado pelo módulo eletrônico da ARP, podendo-se citar a nebulosidade do dia e a pressão atmosférica (SANZ-ABLAMEDO *et al.*, 2018).

De acordo com Oliveira e Brito (2019) e complementando Sanz-Ablamedo *et al.* (2018), outros parâmetros que influenciam diretamente na qualidade das imagens são a incidência de rajadas de ventos que acabam comprometendo a estabilidade da ARP e também a qualidade da câmera embarcada. Guimarães *et al.* (2023) afirmam que os erros de distorções nas imagens impactam diretamente na elaboração dos ortomosaicos, pois são comuns e quando presentes, influenciam negativamente na qualidade final dos produtos gerados, mas que podem ser minimizados quando adotam uma quantidade significativa e distribuição dos PCs em toda a área a ser levantada.

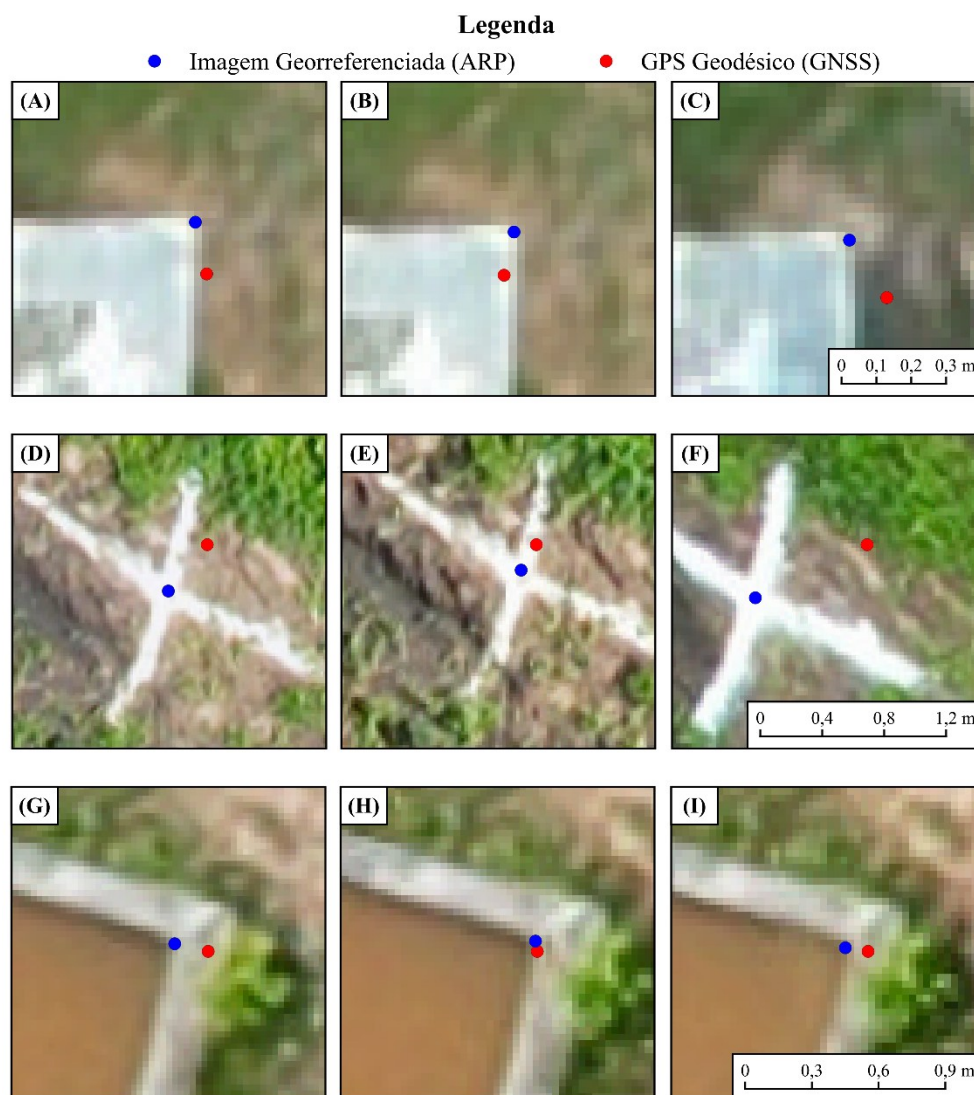


Figura 3 – Detalhes da precisão planimétrica de produtos cartográficos digitais obtidos por aeronave remotamente pilotada em áreas com diferentes declividades, com imagens coletadas em diferentes alturas de voo. 0-5%: (A) – 70 m, (B) – 80 m, (C) – 90 m; 5-10%: (D) – 70 m, (E) – 80 m, (F) – 90 m; 10-20%: (G) – 70 m, (H) – 80 m, (I) – 90 m.

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 4 são apresentados os MDEs produzidos através do processamento de imagens com a técnica SFM. Os dados apresentados na figura enfatizam as diferenças de declividade entre as áreas avaliadas neste estudo. Pode-se observar que, de forma visual, não é possível avaliar a precisão altimétrica dos produtos digitais confeccionados.

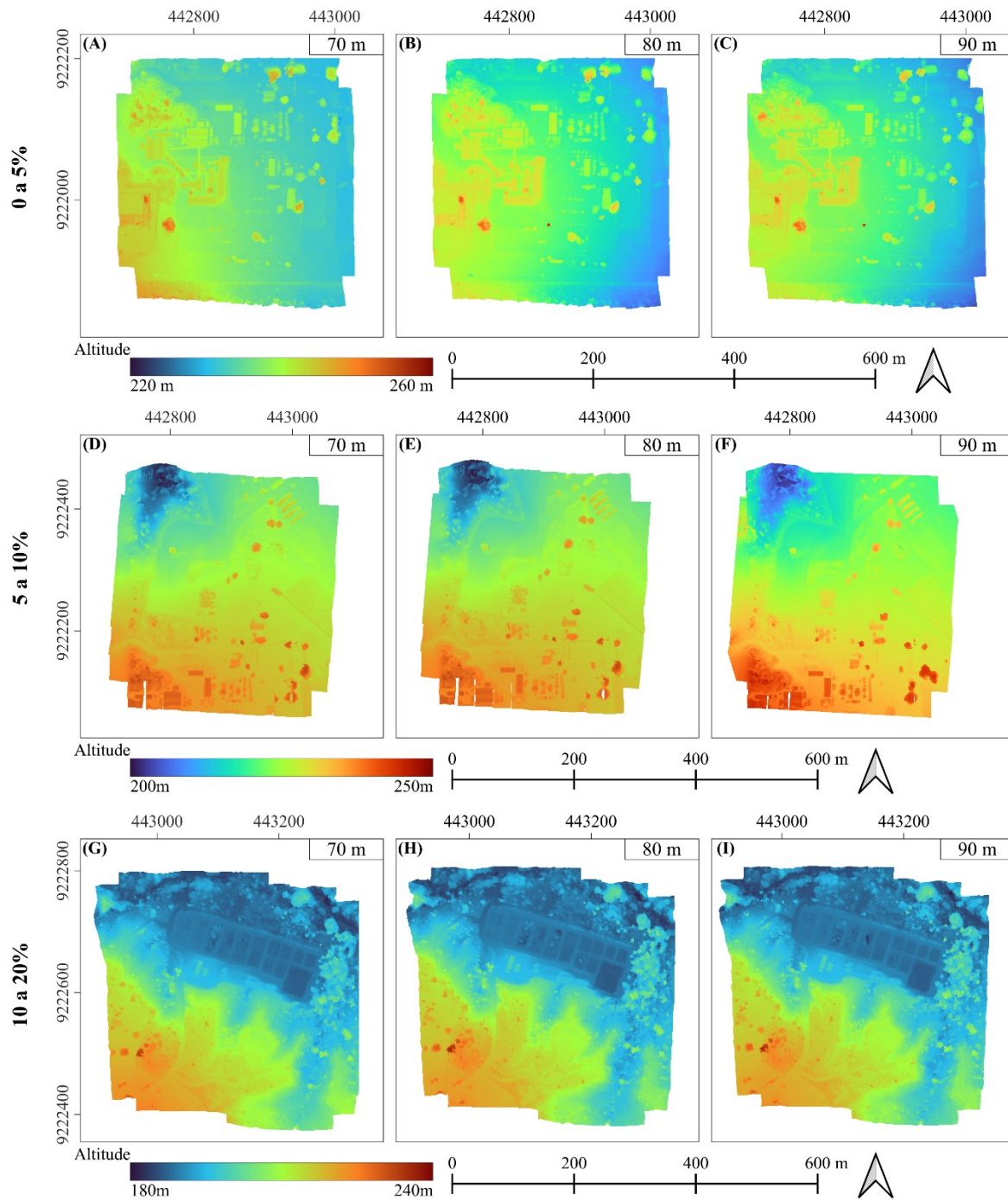


Figura 4 – Modelos digitais de elevação produzidos com imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada em áreas com diferentes declividades, com imagens coletadas em diferentes alturas de voo. 0-5%: (A) – 70 m, (B) – 80 m, (C) – 90 m; 5-10%: (D) – 70 m, (E) – 80 m, (F) – 90 m; 10-20%: (G) – 70 m, (H) – 80 m, (I) – 90 m.
 Fonte: Os Autores (2024).

Quando avaliadas as discrepâncias da coordenada altimétrica Z ponto-a-ponto, pode-se observar a presença significativa de variações entre as áreas avaliadas. De maneira geral, pode-se observar um aumento da discrepância média (ΔZ) com o aumento da altura de voo da ARP em todas as áreas avaliadas (Figura 5).

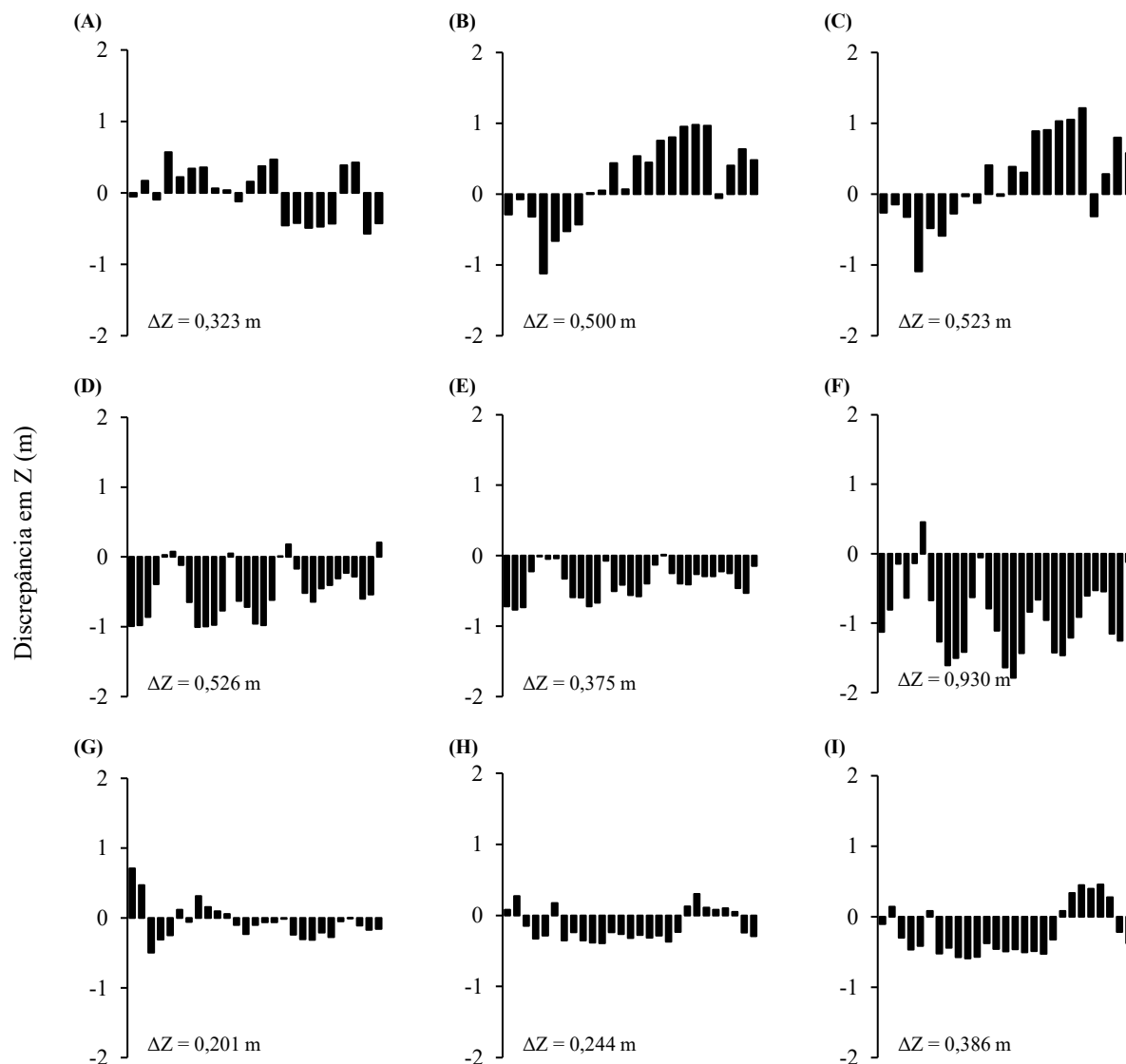


Figura 5 – Discrepância posicional altimétrica de produtos cartográficos digitais obtidos por aeronave remotamente pilotada em áreas com diferentes declividades, com imagens coletadas em diferentes alturas de voo. 0-5%: (A) – 70 m, (B) – 80 m, (C) – 90 m; 5-10%: (D) – 70 m, (E) – 80 m, (F) – 90 m; 10-20%: (G) – 70 m, (H) – 80 m, (I) – 90 m.

Fonte: Autores (2024).

Em função dos resultados apresentados anteriormente, pode-se inferir que a altura de voo interferiu diretamente na precisão altimétrica dos produtos digitais confeccionados através do processamento das imagens captadas por ARP. Tendo como base, os princípios da estereoscopia, associados aos princípios da técnica de processamento SFM, o operador deve realizar o planejamento da coleta das imagens de forma a se obter a melhor relação entre os parâmetros altura de voo e sobreposição das imagens, de forma a se obter o maior número de imagens de um mesmo ponto do levantamento, haja vista que, quanto maior for a quantidade de pontos de vista, mais representativa a reconstrução tridimensional. Estes

resultados corroboram às observações relatadas por Jiang et al. (2020), os quais detalham todas as etapas do processamento de imagens através da técnica SFM, onde relatam que a distância do alvo mapeado irá interferir diretamente na reconstrução tridimensional da área estudada, e conseqüentemente, na precisão altimétrica dos produtos digitais gerados.

A interferência da altura de voo na precisão altimétrica de produtos topográficos obtidos com ARPs vem sendo bastante estudada na literatura por diversos autores, os quais relatam comportamentos diversos em distintas situações. Anders et al. (2020) avaliaram a precisão altimétrica de MDEs confeccionados com imagens obtidas com ARPs em diferentes alturas de voo e verificaram que a altura do voo proporcionou aumentos na discrepância vertical. Udin e Ahmad (2014) avaliaram a precisão planialtimétrica de produtos obtidos com imagens captadas por ARP em alturas de voo variando entre 40 e 100 m de altura e verificaram uma correlação linear positiva entre a altura de voo e o RMSE. Tais resultados corroboram com os dados obtidos neste estudo. No entanto, estudos realizados por outros autores afirmam que a altura de voo não provoca influência significativa na precisão altimétrica destes produtos (Santana et al., 2021; Brookman-Amissah et al., 2022).

A avaliação da precisão dos produtos gerados quanto à Norma Técnica da ABNT NBR 13.133/2021 - Execução de levantamento topográfico – Procedimento (ABNT, 2021), apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos produtos digitais (ortomosaicos e MDEs) gerados quanto a Norma Técnica ABNT NBR 13.133/2021 - Execução de levantamento topográfico – Procedimento, com precisão desejada de 0,33 m.

Declividade	Altura de voo	Planimetria (ortomosaico)		Altimetria (MDE)	
		% $\Delta d \leq$ Tolerância	Parecer	% $\Delta Z \leq$ Tolerância	Parecer
0-5%	70 m	100	Aprovado	100	Aprovado
	80 m	100	Aprovado	95,5	Aprovado
	90 m	100	Aprovado	81,8	Reprovado
5-10%	70 m	96,8	Aprovado	93,5	Aprovado
	80 m	93,5	Aprovado	100	Aprovado
	90 m	100	Aprovado	54,8	Reprovado
10-20%	70 m	100	Aprovado	100	Aprovado
	80 m	100	Aprovado	100	Aprovado
	90 m	100	Aprovado	100	Aprovado

Fonte: Autores (2024).

Pode-se verificar que todos os ortomosaicos confeccionados foram aprovados ao se utilizar uma precisão desejada de 0,33 m. De acordo com a NBR 13.133/2021, considera-se o limite de tolerância como sendo até três vezes a precisão desejada. Logo, ao serem aprovados pela NBR, infere-se que mais de 90% dos PVs avaliados obtiveram discrepância menor que 0,99 m.

Salienta-se que a NBR 13.133/2021 não especifica qual valor de precisão deverá ser utilizado para avaliar a precisão dos produtos, somente afirma que para ser aceito um levantamento topográfico deve apresentar 90 % dos pontos objeto da inspeção inferior à tolerância considerada. Logo, a escolha do valor de precisão desejada irá influenciar diretamente no resultado da classificação. Desta forma, ao se trabalhar com produtos digitais gerados por aerofotogrametria, recomenda-se que o valor de precisão escolhido deve ser compatível o GSD da imagem, bem como às feições que serão identificadas.

Quando avaliados os produtos altimétricos, verificou-se que ao se aumentar a altura de voo para 90 metros nas áreas com 0 a 5 e 5 a 10% de declividade, os MDEs foram reprovados perante a NBR 13.133/2021. Tal comportamento não se repetiu na área com 10 a 20% de declividade, sendo este MDE considerado aprovado. No entanto, mesmo sendo considerado aprovado, observou-se maiores valores de ΔZ ao se realizar a coleta das imagens numa altura de 90 metros, quando comparados aos voos a 70 e 80 metros na mesma área (Figura 4). Estes resultados corroboram a interferência da altura de voo na precisão altimétrica dos produtos digitais.

Quando avaliados os critérios de precisão instituídos pelo INCRA para utilizar aerofotogrametria para fins de georreferenciamento de imóveis em ambiente rural, observou-se que todos os ortomosaicos confeccionados neste estudo atenderam os critérios estabelecidos pelo INCRA, podendo ser utilizados em trabalhos de georreferenciamento de imóveis rurais com escala de 1/1000 ou inferior conforme descreve a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos ortomosaicos gerados quanto ao Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2ª Edição (INCRA, 2022).

Declividade	Altura de voo	Decreto ET-CQDG	Tipo de Limite	Precisão INCRA
0-5%	70 m	CLASSE B	Artificial	Atende
	80 m	CLASSE B	Artificial	Atende
	90 m	CLASSE B	Artificial	Atende
5-10%	70 m	CLASSE C	Natural	Atende
	80 m	CLASSE C	Natural	Atende
	90 m	CLASSE D	Natural	Atende
10-20%	70 m	CLASSE A	Artificial	Atende
	80 m	CLASSE B	Artificial	Atende
	90 m	CLASSE C	Natural	Atende

Fonte: Autores (2024).

Estes resultados demonstram a alta qualidade dos produtos gerados, uma vez que, na avaliação da precisão de acordo com os critérios estabelecidos pelo INCRA (2022), a escala 1/1000 apresenta um limite de discrepância de 1,0 m (ET-CQDG Classe D), ou seja, há a exigência de que 100% das discrepâncias apresentem valores inferiores a 1 metro.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a altura de voo deve ser configurada de acordo com a declividade do terreno a ser mapeado. Foi observado que apenas na área com declividade de 0 a 5%, não houve redução da precisão dos ortomosaicos com o aumento da altura de voo, sendo todos os ortomosaicos classificados como Classe B conforme Decreto ET-CQDG (DSG, 2016), com 100% das discrepâncias inferiores a 0,5 m, independentemente da altura de voo.

Nas áreas com declividade de 5 a 10% e 10 a 20%, houve uma redução significativa da precisão quando se realizou voos em alturas mais elevadas. Naqueles voos realizados a 70 e 80 metros de altura na área com declividade variando entre 5 a 10%, as discrepâncias calculadas chegaram a apresentar valores de até 0,8 m. Já no voo realizado a 90 metros, foram registrados valores de até 1,0 m de discrepância.

Já na área com declividade variando entre 10 e 20% de declividade, verificou-se uma redução gradativa da precisão do ortomosaico com o aumento da altura de voo. O ortomosaico confeccionado com imagens obtidas a 70 metros de altura foi classificado como Classe A, com discrepâncias inferiores a 0,28 m. Quando se voou a 80 metros o ortomosaico apresentou discrepâncias inferiores a 0,5 m, se enquadrando na Classe B. Já o ortomosaico com imagens a 90 metros foi classificado como Classe C, com valores de discrepâncias de até 0,8 m.

A classificação das imagens conforme os parâmetros disponibilizados no Decreto ET-CQDG (DSG, 2016), utilizados pelo INCRA como critérios de avaliação dos produtos digitais com objetivo de georreferenciamento de imóveis rurais, classifica os produtos com base nos valores de discrepâncias médias obtidas na avaliação da precisão, levando em consideração a classificação do tipo de marco, definida pelo INCRA no Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2ª Edição (INCRA, 2022), pode auxiliar os profissionais na utilização dos produtos digitais.

Considerando uma escala de 1/1000, a Classe A da ET-CQDG tem como limite de discrepância 0,28 m, já a Classe B 0,5 m. Estas duas classes são as mais exigentes em termos de precisão, as quais podem ser utilizadas para mapear vértices de limites do tipo artificial, podendo-se citar cercas, muros, estradas, valas, canais, entre outros (INCRA, 2022). As Classes C e D permitem limites de discrepância de 0,8 e 1,0 m, respectivamente. Produtos classificados nestas classes, apresentam potenciais de uso em mapeamento que envolvam apenas vértices limítrofes do tipo natural e/ou inacessíveis, por exemplo, corpos d'água ou cursos d'água, linhas de cumeeada, grotas, cristas de encostas, entre outros (INCRA, 2022).

No trabalho desenvolvido por Guimarães *et al.* (2023), foi analisada a acurácia planimétrica de um ortomosaico originado de ARP e foi alcançado valores médios de discrepância de aproximadamente 0,121 m, consequentemente categorizados na Classe A, atendendo assim às exigências técnicas proposta pelo INCRA no desenvolvimento dos levantamentos que envolvam o georreferenciamento de imóveis rurais e até mesmo urbano.

Para se obter produtos digitais advindos de levantamentos aerofotogramétricos realizados por aeronaves remotamente pilotadas com qualidade posicional deve-se considerar vários fatores que incidem desde às características da área a ser mapeada, como declividade e cobertura de solo; parâmetros de planejamento de voo, como a velocidade e altura de voo, e

sobreposição configurada; condições climáticas no momento da operação, como velocidade do vento e luminosidade (SANZ-ABLANEDO *et al.*, 2018), até o processamento digital das imagens, podendo-se citar a qualidade da nuvem de pontos gerada durante o processo (SAI *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2018). Os resultados obtidos neste estudo indicam que a altura de voo no momento da aquisição das imagens interfere na qualidade planialtimétrica de ortomosaicos e MDEs confeccionados com imagens obtidas com ARPs. Neste sentido, recomenda-se que a medida que se aumente a declividade do terreno, reduza a altura de voo para que se obtenha produtos com qualidade posicional superior.

4. Considerações finais

Neste estudo foram avaliadas as precisões planialtimétricas de ortomosaicos e modelos digitais de elevação (MDE) produzidos com imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada. As imagens foram coletadas em três alturas de voo diferentes (70, 80 e 90 m), em três áreas com declividades distintas (0 a 5%, 5 a 10% e 10 a 20%). Conforme a metodologia utilizada, e a partir dos resultados obtidos, foi possível obter produtos digitais com alta precisão posicional planialtimétrica quando comparada a trabalhos similares encontrados na literatura.

Foi possível observar uma redução da precisão planimétrica dos ortomosaicos e altimétrica dos MDEs com o aumento da altura de voo nas áreas avaliadas, concluindo-se que este parâmetro deve ser configurado de acordo com a declividade do terreno a ser mapeado. Em áreas com maior declividade ou condições topográficas acidentadas, recomenda-se que os voos sejam realizados em alturas menores para garantir uma maior precisão planialtimétrica. A aplicação de parâmetros de avaliação previstos pelo Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais – 2ª Edição em propriedades rurais e/ou de uso misto é importante para balizar os estudos de aplicação da aerofotogrametria nesses tipos de propriedades.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus São Raimundo das Mangabeiras, pelo apoio financeiro e institucional.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13133: Execução de levantamento topográfico – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ANAC. Orientações para usuários de drones. 2017. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.
- ANDERSON, K.; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 11, n. 3, 138-146, 2013.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V.J. Instrumentação e Fundamentos de medidas. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- BOON, M. A.; GREENFIELD, R.; TEFAMICHAEL, S. Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry produces accurate high-resolution orthophotos, point clouds and surface models for mapping wetlands. *South African Journal of Geomatics*, v. 5, n. 2, 186-200, 2016.
- CASELLA, E.; DRECHSEL, J.; WINTER, C.; BENNINGHOFF, M.; ROVERE, A. Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. *Geo-Marine Letters* v. 40, n. 1, p 255-268. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00638-8>
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* v. 92, n. 1, p. 79-97, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- DARAMOLA, O.; OLALEYE, J.; AJAYI, O. G.; OLAWUNI, O. Assessing the geometric accuracy of UAV-based orthophotos. *South African Journal of Geomatics*, v. 6. n. 3, p. 395-406, 2017. <https://doi.org/10.4314/sajg.v6i3.9>

- DSG – Diretoria do Serviço Geográfico. Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) – 1ª Edição. Brasília, 2016. 94p
- FONSECA NETO, F. D.; GRIPP JÚNIOR, J.; BOTELHO, M. F.; SANTOS, A. P.; NASCIMENTO, L. A.; FONSECA, A. L. B. Avaliação da qualidade posicional de dados espaciais gerados por vant utilizando feições pontuais e lineares para aplicações cadastrais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 23, n. 1, p. 134 - 149, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000100009>
- GARCIA, M.V.Y.; OLIVEIRA, H.C. The influence of flight configuration, camera calibration, and ground control points for digital terrain model and orthomosaic generation using unmanned aerial vehicles imagery. *Bulletin of Geodetic Sciences*. v. 27, n. 2, p. e2021015, 2021.
- GÓMEZ-CANDÓN, D.; DE CASTRO, A. I.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, v. 15, n. 1, p. 44–56, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>
- GUIMARÃES, M. J. M.; SANTOS, I. E. A.; MIRANDA, I. B.; SILVA, A. S.; REZENDE, F. A.; BARROS, J. R. A. Acurácia planimétrica de ortomosaico produzida com imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 11, n. 2, p. 501-516, 2023.
- HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery. *Remote Sens.*, 4, 1573–1599, 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, 2017
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Especificações e normas gerais para levantamento geodésico em território brasileiro. 2021. Available on: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/normas/16463-especificacao-e-normas-gerais-para-levantamentos-geodesicos-em-territoriobrasileiro.html?=&t=o-que-e> Accessed on: Abr. 2022.
- IN CRA. Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais. 2ª ed. Brasília: Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. 2022.
- JIANG, S.; JIANG, C.; JIANG, W. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SFM tools. *ISPRS J Photogramm*, v. 167, p. 230-251, 2020.
- JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, S. I.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; MARCIAL-PABLO, M. DE J.; ENCISO, J. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 10, p. 1-27, 2021.
- LIU, Y.; ZHENG, X.; AI, G.; ZHANG, Y. ZUO, Y. Generating a High-Precision True Digital Orthophoto Map Based on UAV Images. *International Journal of Geo-Information*. v. 7, n. 9, p. 1-15, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijgi7090333>
- LUZ, C. C. Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de veículos aéreos não tripulados (SISVANT). Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2015.
- MARTÍNEZ-CARRICONDO, P.; AGUERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MESAS-CARRACOSA, F. J.; GARCÍA-FERRER, A.; PÉREZ-PORRAS, F. J. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.72, p.1-10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- MICHELS, N. B.; DA SILVA, R. M. DE SOUZA, S. F. Georreferenciamento de Imóveis Rurais: Análise de Área entre Topografia, RTK e Sistema TM. *R. bras. Geom.*, v. 9, n. 1, 062-084, 2021.

- NEVES, M.D.P. et al. Otimização de Modelos Digitais de Elevação para a obtenção de variáveis geomorfológicas e hidrológicas: avaliação da convolução bidimensional sobre os produtos ALOS, ASTER-GDEM e SRTM. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44, p. 1–15, 2021.
- OLIVEIRA, D. V.; BRITO, J. L. S. Aplicação da Acurácia Posicional de Dados Gerados por Aeronave Remotamente Pilotada. Revista Brasileira de Cartografia, v. 71, n. 4, p. 934-959, 2019.
- OLLERO, A. UAV applications. In: Handbook of unmanned aerial vehicles. Edited by K.P. Valavanis and G.J. Vachtsevanos. Springer, the Netherlands. p. 2637–2860 2015.
- PIJL, A.; BAILLY, J. S.; FEURER, D.; MAAOUI, M. A. E.; BOUSSEMA, M. R.; TAROLLI, P. TERRA: Terrain Extraction from elevation Rasters through Repetitive Anisotropic filtering. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 84, n. 101977, 2020.
- REIS, L.C.T. Acurácia de modelos digitais de elevação obtidos com uav em relação a dados SRTM e LIDAR. (Trabalho de conclusão de curso para obtenção de título de bacharel em geografia), Universidade Federal do rio Grande do Sul, p. 57, 2021.
- SADEQ, H. A. Accuracy assessment using different UAV image overlaps. Journal of Unmanned Vehicle Systems, v. 7, n. 3, p. 175-193, 2019. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0014>
- SAI, S. S.; TJAHJADI, M. E.; ROKHMANA, C. A. Geometric Accuracy Assessments of Orthophoto Production from UAV Aerial Images. KnE Engineering, v. 4, n. 3, p. 333–344. 2019. <http://dx.doi.org/10.18502/keg.v4i3.5876>
- SANTOS, A. P. GeoPEC - Avaliação da Acurácia Posicional - versão 3.6. 2023. Disponível em: <http://www.geopec.com.br/>
- SANTOS, A. P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; GRIPP JUNIOR, J. Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira. Boletim de Ciências Geodésicas. v. 22, n. 4, p. 630-650. 2016. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000400036>
- SANZ-ABLANEDO, E.; CHANDLER, J. H.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R.; ORDÓÑEZ, C. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sens, v. 10, n. 1606, 2018.
- SILVA, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 1, p. 73 - 94, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005>
- SILVA, L. C.; DIAS, F. F.; ASSIS, V. C.; PINTO, C. B.; RANGEL, F. E. Validation of the positional accuracy of products resulting from the digital processing of UAV images. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient, v. 26, n. 8, p.624-630, 2022.
- TANG, L.; SHAO, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. Journal of Forestry Research, v. 26, n. 4, 791-797, 2015.
- VITTI, D. M. C.; MAUAD, F. F.; MARQUES JUNIOR, A.; INOCÊNCIO, L. C.; VERONEZ, M. R. Análise Direcional de Erros Sistemáticos em ortomosaico gerado por meio de ARP. Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 5, p. 1566-1594. 2018. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n5-44563>
- WONZOSKI, F. DE O. E ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA, A. Desenvolvimento de um drone de baixo custo para mapeamento de território. Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira, v. 5, p. e24721, 2020.