

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA

WELVIS DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS ADQUIRIDOS A
PARTIR DE FOTOGRAMETRIA COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO:
ESTUDO DE CASO NA FAZENDA BELÉM E SOLEDADE NO MUNICÍPIO DE PÃO
DE AÇUCAR**

WELVIS DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS ADQUIRIDOS A
PARTIR DE FOTOGRAMETRIA COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO:
ESTUDO DE CASO NA FAZENDA BELÉM E SOLEDADE NO MUNICÍPIO DE PÃO
DE AÇUCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Agrimensura da
Universidade de Alagoas, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de
Agrimensura.

Orientador: Prof. Me. Ayrton Martim Oliveira Dias
Melo

Rio Largo
2026

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Stefano João dos Santos

A586a Santos, Welvis dos

Avaliação da acurácia de produtos cartográficos adquiridos a partir de fotogrametria com veículo aéreo não tripulado: estudo de caso na fazenda Belém e soledade no município de pão de açúcar / Welvis dos Santos. – Rio Largo - Al, 2026.

55 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Agrimensura) Universidade Federal de Alagoas, Campus Ceca – Rio largo, 2026.

Orientador: Prof. Me. Ayrton Martim Oliveira Dias Melo

1 Fotogrametria. Aeronave Remotamente Pilotada. Levantamento Topográfico.

CDU: 631.95

Folha de Aprovação

Welvis dos Santos

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS ADQUIRIDOS A PARTIR DE FOTOGRAMETRIA COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO: ESTUDO DE CASO NA FAZENDA BELÉM E SOLEDADE NO MUNICÍPIO DE PÃO DE AÇUCAR

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia de Agrimensura da Universidade Federal de Alagoas e aprovado em 30 de junho de 2026.

Aprovado em: 30/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **AYRTON MARTIM OLIVEIRA DIAS MELO**
Data: 08/07/2026 10:46:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Ayrton Martim Oliveira Dias Melo – UFAL (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **JUCIELA CRISTINA DOS SANTOS**
Data: 08/07/2026 10:36:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr^a. Juciela Cristina dos Santos - UFAL

Prof. Dr^a. Rafaela Faciola Coelho de Souza - UFAL

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, porque sem ele nada seria possível, e foi ele quem deu forças para que nos dias difíceis nunca pensasse em desistir.

Da mesma forma, agradecer minha querida mãe Lucidi, a dona “Nadir”, que durante todo esse processo sempre incentivou e batalhou para que me preocupasse apenas em estudar. Agradecer a senhora é apenas um pequeno ato de demonstrar toda minha gratidão por tudo que fez para nossa família, a senhora é uma verdadeira guerreira.

Aos meus irmãos, Wilson, Willas (Nan) e o Welton por todo apoio e suporte dado durante esse trajeto, vocês tiveram uma participação muito grande para que conseguisse chegar até aqui.

Ao Engenheiro Diego Medeiros, o cara mais perfeccionista que já conheci, um amigo que a Topografia me deu, impossível esquecer do meu mentor, uma pessoa que mesmo de longe sempre que precisei esteve ali para me ajudar.

Ao meu melhor amigo, Arquiteto Ruan Victor, um amigo que por anos dividiu uma louca rotina de sair de Coruripe e ir pra Maceió todos os dias, dividimos apartamento, dividimos a rotina até cada um chegar a encerra seu ciclo na universidade.

Aos meus amigos de São Miguel dos Campos, João Ribeiro e Eduardo, das poucas pessoas que fiz amizades durante a graduação esses dois foram uns parceiros que levo comigo até hoje.

Agradecer ao meu Orientador Ayrton Melo, uma pessoa que conheci já no final do curso, o professor que os alunos temiam, e nesse fim de ciclo quando tive a oportunidade de realmente conhecer, é uma pessoa extremamente gente boa, sem falar na sua inteligência.

Agradecer a coordenação do curso, em especial a Juciela, uma pessoa do coração enorme que sempre esteve presente para ajudar os alunos. Não diferente, agradecer também a professora Rafaela, uma professora fantástica, que sempre adorei pagar disciplina., mesmo tendo umas que eram chatas de ser aprovado.

Aos professores do curso, por todo ensinamento transmitido, dedicação e contribuição para minha formação acadêmica e profissional ao longo desta trajetória. Cada orientação e conhecimento transmitido contribuíram significativamente para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Aos colegas de sala de aula, mano Nykolas, Júnior, Vitória, Gabriel Carneiro a pessoa que mais faz piadas pesadas, Gustavo Camilo o ser humano mais calmo que já conheci, Gustavo Lima o embaixador e a Andréa uma amiga que a agrimensura me deu.

Agradecer meu colega de trabalho, Engenheiro Arthur Mattos, uma pessoa que sempre esteve disposto a dividir seus conhecimentos e a ensinar com toda sua experiência vivenciada na vida profissional.

Meu ex-professor, Ramon Salgueiro, uma pessoa de um coração enorme que me abriu as portas para que pudesse traçar novos caminhos.

Meu colega de trabalho, Silas Henrique, uma pessoa muito tranquila de um coração enorme e que tem um futuro brilhante pela frente.

RESUMO

A fotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem se consolidado como uma importante ferramenta para levantamentos topográficos, possibilitando a obtenção de produtos cartográficos com elevada resolução espacial, rapidez na aquisição de dados e redução dos custos operacionais. Entretanto, sua utilização em aplicações técnicas requer a verificação da qualidade posicional dos produtos gerados. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade posicional dos produtos cartográficos obtidos por levantamento aerofotogramétrico realizado na Fazenda Belém e Soledade, no município de Pão de Açúcar–AL, por meio da comparação com pontos levantados por GNSS RTK e da aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), utilizando o software GeoPEC. O levantamento foi realizado em uma área de aproximadamente 151 hectares, resultando na geração de ortomosaico, Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT), nuvem densa de pontos e curvas de nível. Os resultados indicaram que os produtos atenderam aos critérios da Classe A do PEC-PCD para a escala 1:1.000, apresentando RMSE planimétrico de aproximadamente 0,96 cm. O teste de Shapiro-Wilk confirmou a normalidade dos erros, enquanto o teste t de Student evidenciou tendência sistemática, indicando elevada precisão, porém com influência de erros sistemáticos na acurácia. Como limitação, destaca-se a reduzida quantidade de pontos de checagem utilizada na validação estatística. Conclui-se que a fotogrametria com ARP, associada ao GNSS RTK, mostrou-se eficiente para a geração de produtos cartográficos destinados a levantamentos topográficos, embora a tendência sistemática observada indique a necessidade de aprimoramento da validação em estudos futuros.

Palavras-chave: Fotogrametria. Aeronave Remotamente Pilotada. Levantamento Topográfico. Produtos Cartográficos. PEC-PCD. Qualidade Posicional.

ABSTRACT

Photogrammetry using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has become an important tool for topographic surveying, enabling the production of high-resolution cartographic products with greater operational efficiency and reduced acquisition costs. However, the use of these products in technical applications requires the assessment of their positional quality. This study aimed to evaluate the positional quality of cartographic products generated from a UAV photogrammetric survey conducted at Belém and Soledade Farm, located in the municipality of Pão de Açúcar, Alagoas, Brazil. The evaluation was performed by comparing the photogrammetric products with GNSS RTK survey data and by applying the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD) using the GeoPEC software. The survey covered an area of approximately 151 hectares, resulting in the generation of an orthomosaic, Digital Surface Model (DSM), Digital Terrain Model (DTM), dense point cloud, and contour lines. The results showed that the generated products met the requirements for PEC-PCD Class A at the 1:1,000 scale, with a planimetric Root Mean Square Error (RMSE) of approximately 0.96 cm. The Shapiro–Wilk test confirmed the normal distribution of positional errors, whereas Student's *t*-test detected the presence of systematic bias, indicating high precision but reduced positional accuracy due to systematic errors. The main limitation of the study was the limited number of check points used in statistical validation. It is concluded that UAV photogrammetry combined with GNSS RTK is an effective approach for generating cartographic products for topographic surveying, although the detected systematic bias highlights the need for improvements in the validation procedure in future studies.

Keywords: UAV Photogrammetry; Topographic Surveying; Cartographic Products; PEC-PCD; Positional Quality.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivo Geral.....	11
1.2	Objetivos Específicos.....	11
2	REFERENCIAL TÉORICO	13
2.1	Fotogrametria com VANTs no levantamento topográfico.....	13
2.2	Sistema de Referência Geodésico Global	14
2.2.1	SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO (SGB)	15
2.3	Integração entre Fotogrametria com Vants e sistemas geodésicos.....	17
2.4	Princípios do sistema de levantamento geodésico	18
2.5	Métodos de levantamento geodésico	19
2.6	Imprecisões em medições geodésicas	20
2.7	Levantamento com aeronaves remotamente pilotadas (ARP).....	21
2.8	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).....	23
2.9	Norma Técnica Para Georreferenciamento de Imóveis Rurais.....	24
2.9.1	A ESTRUTURA E AS FINALIDADES DA NTGIR	25
2.9.2	TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO PERMITIDAS	25
2.9.3	FOTOGRAMETRIA NA NTGIR.....	27
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	área de estudo.....	29
3.2	Caracterização da pesquisa.....	30
3.3	Materiais e equipamentos.....	31
3.4	Planejamento de Voo.....	32
3.5	Implantação e levantamento dos pontos de controle (GCPs).....	33
3.6	Execução do levantamento aerofotogramétrico	34
3.7	Processamento dos dados fotogramétricos	34
3.8	Análise da precisão e validação dos resultados	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	49

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos têm promovido mudanças significativas nos métodos de aquisição de dados espaciais, ampliando a precisão, a produtividade e a eficiência dos levantamentos topográficos. Nesse cenário, as geotecnologias passaram a desempenhar papel fundamental na obtenção de informações geoespaciais utilizadas em projetos de engenharia, planejamento territorial, cartografia, monitoramento ambiental e diversas outras aplicações que dependem da representação precisa da superfície terrestre (FRANCO; NAIME, 2021).

Entre essas tecnologias, destaca-se a fotogrametria digital associada ao uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidas como drones. Essa integração possibilita a aquisição rápida de imagens com elevada resolução espacial, permitindo a geração de produtos cartográficos como ortomosaicos, nuvens densas de pontos, Modelos Digitais de Superfície (MDS), Modelos Digitais de Terreno (MDT) e curvas de nível, os quais têm sido amplamente empregados em levantamentos topográficos devido à elevada qualidade das informações produzidas (FRANCO; NAIME, 2021).

A utilização dessa tecnologia representa uma importante evolução em relação aos métodos convencionais de levantamento, principalmente em áreas extensas ou de difícil acesso, onde as técnicas tradicionais demandam maior tempo de execução, maior número de equipes em campo e custos operacionais mais elevados. Além disso, a fotogrametria com ARP permite a obtenção de grande quantidade de informações em curto intervalo de tempo, favorecendo a elaboração de bases cartográficas detalhadas para diferentes finalidades técnicas (FERREIRA; ROSA; CARMO, 2023).

No município de Pão de Açúcar, no estado de Alagoas, as características do relevo e a diversidade das áreas rurais tornam o levantamento topográfico uma atividade que exige métodos capazes de aliar eficiência operacional e confiabilidade dos resultados. Nesse contexto, a utilização da fotogrametria com ARP apresenta potencial para otimizar a aquisição de dados e fornecer produtos cartográficos compatíveis com as necessidades de levantamentos topográficos destinados a projetos de engenharia, planejamento territorial e outras aplicações geoespaciais (ROCHA GOMES et al., 2023).

Diversos estudos demonstram que a fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas pode produzir produtos cartográficos com elevado nível de

detalhamento e precisão quando associada a um planejamento adequado do voo, à utilização de pontos de controle e ao processamento fotogramétrico apropriado (MARTINS; SILVA, 2020). Entretanto, a qualidade desses produtos não deve ser avaliada apenas por sua resolução espacial ou aparência visual. Para que possam ser utilizados com segurança em aplicações técnicas, é indispensável verificar sua qualidade posicional por meio de procedimentos estatísticos e critérios normatizados que permitam quantificar sua precisão e acurácia.

Dessa forma, torna-se necessária a avaliação da qualidade dos produtos cartográficos gerados por fotogrametria, verificando se os resultados obtidos atendem aos padrões de exatidão estabelecidos para levantamentos topográficos e se apresentam confiabilidade suficiente para subsidiar atividades que dependem de informações espaciais precisas. Nesse contexto, este trabalho avalia os produtos cartográficos gerados por meio de levantamento aerofotogramétrico realizado na Fazenda Belém e Soledade, localizada no município de Pão de Açúcar–AL, por meio da comparação entre os dados obtidos no processamento fotogramétrico e coordenadas levantadas com GNSS RTK, utilizando os critérios do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) como referência para a análise da qualidade posicional.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade posicional dos produtos cartográficos gerados por meio da fotogrametria com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), verificando sua precisão e acurácia para aplicação em levantamentos topográficos por meio da comparação com pontos obtidos por GNSS RTK e da classificação segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Processar as imagens obtidas para gerar ortomosaico, nuvem densa de pontos, Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT) e curvas de nível.
- Avaliar a qualidade posicional dos produtos cartográficos por meio da comparação entre as coordenadas obtidas no processamento fotogramétrico e os pontos de controle e de checagem levantados com GNSS RTK.

- Classificar os produtos cartográficos quanto ao atendimento aos critérios estabelecidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).
- Analisar os resultados estatísticos obtidos na avaliação da precisão e da acurácia dos produtos cartográficos, discutindo sua adequação para aplicações em levantamentos topográficos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos da fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), dos sistemas de referência geodésicos, dos métodos de posicionamento e dos critérios de avaliação da qualidade posicional de produtos cartográficos digitais. Também aborda as principais fontes de erros e os padrões estabelecidos pelo PEC-PCD e pela NTGIR, fornecendo a base conceitual para a metodologia e a análise dos resultados deste estudo.

2.1 FOTOGRAMETRIA COM VANTs NO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Tommaselli (2009) define a fotogrametria como a ciência e técnica dedicadas à obtenção de informações precisas sobre objetos físicos e meio ambiente, utilizando o registro, medição e interpretação de imagens fotográficas, assim, a fotogrametria possibilita medições exatas e a criação de modelos tridimensionais (3D) a partir de imagens bidimensionais (2D), sendo muito utilizada em campos como cartografia, engenharia, arquitetura e sensoriamento remoto.

Com o avanço tecnológico, particularmente no desenvolvimento de sensores digitais de alta resolução e sistemas aéreos não tripulados, os VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) passaram a ser amplamente empregados em levantamentos topográficos e na fotogrametria, devido à sua habilidade de coletar dados de forma rápida e precisa (DALMOLIN,2018).

Nesse contexto, Silva et al. (2015) ressaltam que a utilização de VANTs na cartografia permite maior rapidez na coleta e no processamento de dados, diminuindo os custos operacionais e gerando produtos com alta resolução espacial, como ortomosaicos e modelos digitais de terreno, o que contribui de forma significativa para aumentar a precisão e a eficiência dos levantamentos geoespaciais.

De acordo Alves Júnior et al. (2019), o uso da fotogrametria com Vant na engenharia tem se mostrado bastante eficiente, especialmente na criação de ortomosaicos, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais de Terreno (MDT), isso ocorre porque a qualidade e a precisão dos levantamentos estão diretamente ligadas ao método da coleta de dados e ao sistema de referência empregado, o que afeta diretamente na confiabilidade e na exatidão dos produtos gerados.

Além disso, o uso de VANTs permite a coleta de dados em áreas de difícil acesso, o que diminui o tempo necessário em campo e aumenta a segurança das equipes técnicas, além de proporcionar maior eficiência operacional nas atividades de levantamento e mapeamento, sob essa ótica pesquisas indicam que a utilização de drones em levantamentos topográficos ajuda a otimizar processos, reduzir custos e aumenta a precisão das informações obtidas (CHIAICCHIO; TECH 2017 SHAKHATREH et al 2018), conforme Figura 01.

Figura 01: Levantamento Topográfico com drone



Fonte: Autor (2026)

2.2 SISTEMA DE REFERÊNCIA GEODÉSICO GLOBAL

O Sistema de Referência Geodésico Global é utilizado para a determinação precisa de posições na superfície terrestre sendo amplamente utilizado em cartografia, geografia, engenharia e geociências por fixar um padrão unificado para a representação espacial da Terra (IBGE,2015).

Segundo Monico 2008 e Hofmann Wellenhof Moritz (2005) a adoção de sistemas de referência geodésicos globais é essencial para garantir a consistência e a integração de dados espaciais derivados de diferentes fontes permitindo a

padronização das coordenadas em escala global e assegurando a compatibilidade dos produtos geoespaciais por meio de modelos matemáticos que representam a forma da Terra e definem um sistema de coordenadas geográficas unificado.

Monico (2008), afirma que embora a forma da Terra não seja perfeita, é geralmente simplificada como um elipsóide de revolução, o que permite que seja modelada matematicamente, portanto, um sistema de referência geodésico específica não só o elipsóide de referência, mas também como ele está orientado e posicionado em relação ao centro de massa da Terra, possibilitando a medição precisa de coordenadas como latitude, longitude e altitude de referência.

Em conformidade com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a utilização de sistemas globais de referência é essencial para assegurar a precisão na determinação de posições e na navegação por satélite em todo o mundo, nesse cenário, o sistema WGS84 se destaca entre os sistemas de referência geodésicos, pois é amplamente empregado como base para o GPS e para aplicações de mapeamento digital, como o Google Maps, além disso, a adoção de um sistema de referência geodésico global permite a integração e a fusão de dados de diversas fontes, como sensoriamento remoto e levantamentos topográficos, garantindo consistência e compatibilidade entre as informações geoespaciais, em quanto que a falta dessa padronização pode levar a discrepâncias significativas, o que compromete a confiabilidade de análises científicas e aplicações práticas em engenharia e geociências (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2020).

2.2.1 SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO (SGB)

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE,2017), o SGB é composto por um conjunto de referenciais, métodos, normas e infraestruturas que permitem a definição e a representação das coordenadas geográficas no país, sua principal função é garantir que todas as informações espaciais geradas no Brasil estejam em conformidade com um padrão único.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE,2017), o SGB é o sistema oficial que fundamenta todas as atividades de posicionamento geodésico no país, sendo constantemente atualizado para atender às necessidades tecnológicas e científicas.

De acordo com Monico (2008), o Brasil utilizou diversos sistemas de referência geodésicos regionais ao longo de sua evolução, como o SAD69 (South American Datum 1969), que foi um sistema amplamente utilizado em atividades cartográficas e de geoprocessamento por várias décadas, entretanto apresentava limitações significativas, principalmente por não ter origem geocêntrica, o que dificultava sua compatibilidade com técnicas modernas de posicionamento por satélite, por isso, com o avanço das tecnologias de navegação global e a necessidade de integração com padrões internacionais, tornou-se essencial a modernização do referencial geodésico brasileiro para garantir maior precisão, consistência e compatibilidade dos dados espaciais em escala global.

Nesse cenário, em 2005 o IBGE estabeleceu o SIRGAS2000 como o sistema oficial de referência geodésica do Brasil por meio da Resolução n.º 1/2005. Esse sistema tem caráter geocêntrico e é compatível com tecnologias de posicionamento por satélite, como o GNSS, sua implementação garante maior confiabilidade e compatibilidade internacional aos dados espaciais usados em cartografia, engenharia e geociências (IBGE 2005).

Ademais, Monico e Dalazoana (2007) afirmaram que como o SIRGAS2000 está em conformidade com os referenciais internacionais, como WGS84, usado pelo GPS. Desta forma, a integração de dados coletados no Brasil a sistemas globais é possível sem a necessidade de transformações complexas, simplificando o compartilhamento de informações geoespaciais em escala internacional.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) concretiza o Sistema Geodésico Brasileiro, uma vez que ela está espalhada por todo país e é formada por estações que funcionam constantemente com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), essas estações oferecem dados de alta precisão em tempo real, desempenhando um papel relevante em levantamentos geodésicos, aplicações de navegação e pesquisas científicas.

Em conformidade com Borges *et al.* (2017), uma aplicação importante do Sistema Geodésico Brasileiro é sua utilização no planejamento territorial e na regularização de propriedades, uma vez que o uso de um referencial único e exato possibilita a definição adequada de propriedades, prevenindo sobreposições e disputas de limites, além disso, a padronização também é fundamental para a

formulação de políticas públicas, planejamento urbano e administração de recursos naturais.

De acordo com Costa e Fortes (2019), o SGB tem um papel importante também nos estudos científicos sobre a dinâmica da Terra, como mudanças no nível do mar, variações no campo gravitacional e deformações da crosta terrestre, sendo que a conexão com redes internacionais de monitoramento aumenta ainda mais sua importância, colocando o Brasil em um cenário global de geração de conhecimento geodésico.

Sob a perspectiva de Poz e Carvalho (2016), a transição do Sistema Geodésico Brasileiro para um referencial geocêntrico moderno demonstra a demanda por maior precisão e alinhamento com padrões internacionais, solidificando o SGB como um dos fundamentos da infraestrutura geoespacial atual.

2.3 INTEGRAÇÃO ENTRE FOTOGRAMETRIA COM VANTs E SISTEMAS GEODÉSICOS

Sob a ótica de Henri Eisenbeiss (2009), a combinação da fotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e sistemas de referência geodésicos é importante para assegurar a precisão e a confiabilidade dos levantamentos topográficos, uma vez que o uso de imagens aéreas em aplicações técnicas e cartográficas exige que os produtos gerados sejam corretamente georreferenciados, garantindo uma maior acurácia posicional dos dados espaciais, sendo o georreferenciamento portanto, uma etapa fundamental para a validação métrica e espacial dos produtos fotogramétricos obtidos por meio de sensores embarcados em VANTs.

Cintra (2015) afirma que a precisão de um levantamento está diretamente relacionada à correta associação dos dados a um sistema de referência geodésico, por isso, é essencial utilizar pontos de controle em campo em conjunto com receptores GNSS, conforme a Figura 02.

Como enfatizado por David R. Maidment (2017), o uso de fotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), em conjunto com sistemas geodésicos modernos, constitui um avanço tecnológico significativo para a topografia atual, contribuindo assim para melhorar a eficiência operacional dos levantamentos, a precisão espacial dos dados e o aperfeiçoamento das atividades de planejamento e gestão territorial.

Figura 02: Pontos de Controle



Fonte: Haus (2026).

2.4 PRINCÍPIOS DO SISTEMA DE LEVANTAMENTO GEODÉSICO

De acordo com o IBGE (2023), a geodésia é a ciência que se dedica a investigar a forma, as dimensões e o campo gravitacional da Terra, além de usar métodos e modelos específicos para definir coordenadas e altitudes com grande precisão. Nesse sentido, o levantamento geodésico tem uma grande importância para o posicionamento e mapeamento, pois leva em conta a curvatura da Terra e utiliza superfícies matemáticas de referência, como o elipsoide e o geóide, oferecendo uma representação espacial muito mais precisa do que o levantamento topográfico, que se baseia em simplificações planas em pequenas áreas (IBGE,2024).

Sob a ótica de Monico (2008), os levantamentos geodésicos começaram a ser feitos com mais rapidez e precisão graças ao progresso das tecnologias de posicionamento por satélite, em particular o GNSS, os quais possibilitam a obtenção de coordenadas tridimensionais de maneira contínua, global e com elevada precisão, superando diversas restrições dos métodos tradicionais, a Figura 03 ilustra as quatro principais constelações globais que transmitem sinais para receptores na terra.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), os levantamentos geodésicos modernos precisam estar obrigatoriamente conectados a sistemas de referência oficiais para assegurar a padronização e a compatibilidade dos dados, sendo o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), mantido pelo IBGE e fundamentado no sistema SIRGAS2000.

Figura 03: Sistemas de Posicionamento



Fonte: MODELOISMOBH, 2016.

2.5 MÉTODOS DE LEVANTAMENTO GEODÉSICO

De acordo com Souza (2023), nas últimas décadas, as técnicas de levantamento geodésico passaram por uma evolução significativa, migrando dos métodos tradicionais para abordagens altamente automatizadas, fundamentadas em satélites e processamento digital, esses métodos desempenharam um papel importante na criação das primeiras redes geodésicas no Brasil e no mundo, destacando que a triangulação baseia-se na medição de ângulos, a trilateração na medição de distâncias, e a poligonação no encadeamento de ângulos e distâncias, essencial para apoio planimétrico, a Tabela 01 mostra um resumo comparativo entre os três métodos.

Tabela 01: Comparação entre os métodos de levantamento geodésico

Método	Medição Principal	Figura Geométrica	Ideal para
Triangulação	Ângulos	Triângulos	Grandes distâncias/geodésia
Trilateração	Distâncias (Lados)	Triângulos	Terrenos acidentados/estação total
Poligonação	Ângulos + Distâncias	Linha/ Caminhamento	Apoio topográfico de obras

Fonte: Adaptado de Dalazoana (2024).

Esses métodos clássicos de levantamento geodésico, foram importantes para a formação da geodésia moderna e para determinação dos sistemas de referência

geodésicos que temos até hoje, mas com a evolução das tecnologias espaciais e dos sistemas de posicionamento por satélite, esses métodos foram gradualmente substituídos por técnicas que utilizam GNSS, as quais oferecem maior precisão, agilidade e eficiência na definição de coordenadas geográficas, modernizando assim os processos de posicionamento e mapeamento (KRUEGER et al., 2020).

Monico (2008) destaca que o posicionamento relativo e o posicionamento por ponto preciso (PPP) são dois dos métodos mais modernos, onde o posicionamento relativo é frequentemente empregado em levantamentos de alta precisão, uma vez que diminui consideravelmente os erros sistemáticos ao realizar observações simultâneas com dois ou mais receptores GNSS, por outro lado, o PPP possibilita a determinação de coordenadas usando apenas um receptor, fundamentando-se em correções exatas das órbitas e relógios dos satélites.

Conforme destacou o IBGE (2023), para assegurar a qualidade dos levantamentos, é de suma importância o uso de redes de referência geodésica, como a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo).

2.6 IMPRECISÕES EM MEDIÇÕES GEODÉSICAS

Conforme exposto por Andrade (1998), os levantamentos geodésicos estão sujeitos a diversos tipos de erros que podem afetar a precisão dos resultados, onde esses erros são classificados como sistemáticos, aleatórios e grosseiros, cada um com suas próprias características e exigindo métodos específicos para detecção, correção e controle no processamento das observações geodésicas.

Nesse cenário, Monico (2008) afirma que os erros sistemáticos são previsíveis e passíveis de modelagem matemática, podendo ser corrigidos no decorrer do processamento dos dados, por outro lado, os erros aleatórios acontecem de maneira imprevisível e são abordados por meio de técnicas estatísticas, como o ajuste de observações, já os erros grosseiros são provocados por falhas humanas ou operacionais e precisam ser detectados e removidos.

Loch e Cordini (2014) enfatiza que o controle de erros e a utilização de métodos estatísticos de ajuste são processos importantes nos levantamentos geodésicos, pois possibilitam a avaliação, distribuição e redução das incertezas nas observações, garantindo assim um maior nível de confiabilidade nos resultados.

Monico (2008) destaca que a precisão das medições feitas em levantamentos GNSS pode ser afetada por várias fontes de erro, dentre essas fontes, destacam-se

as imprecisões nas órbitas dos satélites, os atrasos causados pela ionosfera e troposfera, os efeitos de múltiplos caminhos do sinal e as influências das condições ambientais, é importante ressaltar que a modelagem e correção adequadas desses erros são essenciais para melhorar a precisão do posicionamento geodésico, especialmente em aplicações que exigem alta precisão posicional.

Segundo Cintra (2011), os levantamentos fotogramétricos realizados com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) enfrentam diversas fontes de erro que podem afetar a precisão dos resultados, dentre esses problemas, destacam-se a calibração da câmera, a qualidade das imagens, a falta de sobreposição entre as fotografias e a distribuição inadequada dos pontos de controle em campo, valido ressaltar que a qualidade final dos produtos fotogramétricos depende diretamente do planejamento e da execução adequada do levantamento.

2.7 LEVANTAMENTO COM AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (ARP)

Como descrito por Cintra (2011), a coleta de dados geoespaciais em campos como topografia, engenharia, agricultura de precisão e monitoramento ambiental tem sido amplamente realizada por meio de levantamentos aéreos utilizando Vant, comumente conhecidas como drones, os quais inseridos no contexto dos sistemas RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), esses drones incluem a aeronave, a estação de controle terrestre, os sensores embarcados e os sistemas de comunicação, possibilitando a obtenção de dados com alta resolução espacial, maior agilidade operacional e custos significativamente menores em comparação aos métodos tradicionais de levantamento.

De acordo com Silva e Centeno (2017), uma das técnicas mais importantes e frequentemente empregadas em levantamentos com ARP é a fotogrametria digital, onde essa técnica se destaca pela eficiência e precisão que proporciona, utilizando os princípios da estereoscopia para adquirir imagens com alta sobreposição longitudinal e lateral, permitindo assim a reconstrução tridimensional da superfície do terreno, resultando em produtos como ortofotos, modelos digitais de superfície (MDS), modelos digitais de terreno (MDT) e nuvens de pontos densas, esse processo fotogramétrico é composto pelas etapas de planejamento do voo, captura das imagens, processamento por meio de algoritmos de aerotriangulação e densificação, até a geração dos produtos cartográficos finais.

Sob a ótica de Jensen (2009) e Shan e Toth (2018), a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) tem sido amplamente utilizada em levantamentos com ARP, especialmente em áreas com vegetação densa, por possibilitar a geração de modelos tridimensionais detalhados do terreno por meio da emissão de pulsos a laser, capazes de medir distâncias com elevada precisão, destacando-se pela sua capacidade de penetrar parcialmente na cobertura vegetal, permitindo a obtenção de informações do relevo mesmo em regiões de florestas, o que torna essa tecnologia extremamente relevante para aplicações em estudos ambientais, inventários florestais e levantamentos topográficos de alta precisão.

Tommaselli et al. (2016) destaca que um aspecto fundamental nos levantamentos com ARP é o georreferenciamento dos dados, realizado com o auxílio de sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*), a precisão posicional desses dados podem ser significativamente aprimorada por meio de técnicas como RTK (*Real-Time Kinematic*) e PPK (*Post-Processed Kinematic*), essas técnicas permitem maior confiabilidade na obtenção de coordenadas e no posicionamento espacial dos produtos gerados, por isso, o uso de pontos de controle em solo (GCPs), levantados com equipamentos geodésicos de alta precisão, é um fator importante para melhorar consideravelmente a acurácia geométrica dos modelos tridimensionais, ortofotos e demais produtos cartográficos obtidos.

De acordo com Rosset et al. (2020) e Silva et al. (2021), a definição da missão de voo é uma das etapas mais críticas do levantamento aerofotogramétrico com aeronaves remotamente pilotadas, pois ela afeta diretamente a qualidade e a confiabilidade dos produtos gerados, envolvendo parâmetros como altura de voo, sobreposição longitudinal e lateral das imagens, resolução espacial (*Ground Sample Distance* – GSD) e delimitação da área de interesse, fatores que determinam a precisão geométrica e a densidade da nuvem de pontos obtida, ademais, após a captura das imagens, os dados são processados em softwares especializados que empregam técnicas de visão computacional, destacando assim o método *Structure from Motion* (SfM), pois é responsável pela reconstrução tridimensional da superfície por meio da correlação automática entre várias imagens bidimensionais.

Colomina e Molina (2014) aponta que embora os levantamentos com aeronaves remotamente pilotadas ofereçam diversas vantagens, como alta resolução espacial, flexibilidade operacional, rapidez na aquisição de dados e redução de custos em relação aos métodos tradicionais, essa tecnologia também enfrenta limitações e

desafios técnicos, entre esses desafios, destacam-se a dependência de condições climáticas favoráveis, autonomia limitada das aeronaves, restrições impostas pela regulamentação vigente e alta demanda computacional para o processamento dos dados, ainda assim, o uso de ARPs tem aumentado consideravelmente em áreas como cartografia, mineração, inspeção de infraestruturas e monitoramento ambiental, consolidando-se como uma ferramenta importante para a obtenção de dados geoespaciais.

2.8 PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA PARA PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (PEC-PCD)

Um dos principais instrumentos para avaliar a qualidade posicional de produtos cartográficos digitais é o PEC-PCD, que garante sua confiabilidade e uso em atividades técnicas e científicas, esse padrão define critérios para avaliar a precisão posicional tanto na componente planimétrica (horizontal) quanto na altimétrica (vertical), e assim os produtos são classificados em diferentes níveis de exatidão (Classes A, B e C) com base na escala cartográfica e nos limites máximos de erro permitidos (BRASIL, 2011).

A verificação da conformidade com o PEC-PCD é feita comparando as coordenadas obtidas no produto cartográfico com as coordenadas de pontos de controle medidos em campo com maior precisão, onde esses pontos, chamados de pontos de verificação, precisam ser independentes do processo de criação do produto para garantir uma avaliação imparcial, a partir dessa comparação, são determinados erros individuais e parâmetros estatísticos que possibilitam classificar o produto nas categorias de precisão estabelecidas pela norma (SANTOS et al., 2020).

Para produtos cartográficos digitais obtidos via fotogrametria com VANT, são vários os fatores que, de maneira direta, influenciam a conformidade com o PEC-PCD, os principais fatores incluem a qualidade e a disposição dos pontos de controle terrestre (GCPs), a resolução espacial das imagens, o planejamento do voo (principalmente a altura e a sobreposição das imagens) e os algoritmos utilizados no processamento fotogramétrico, a falta ou a má distribuição de pontos de controle pode comprometer de forma significativa a precisão final dos produtos gerados (OLIVEIRA; FERREIRA, 2019).

Outro ponto importante que o PEC-PCD prevê é que os erros devem ter um comportamento estatístico, isto é, uma distribuição normal, o que possibilita a

execução de testes de tendência e precisão, que são essenciais para validar a qualidade cartográfica, enquanto a análise de precisão mostra como os erros se dispersam em torno da média, resultando em uma avaliação mais sólida da confiabilidade do produto (GALO; CAMARGO, 1994).

Sobretudo, em estudos aplicados à avaliação da acurácia de produtos cartográficos obtidos por aeronaves remotamente pilotadas, nota-se a importância do uso do PEC-PCD como norma de referência para validação da qualidade posicional de ortofotos, evidenciando que a verificação da conformidade com esse padrão é essencial para garantir a confiabilidade dos dados geoespaciais gerados, especialmente em análises que envolvem a comparação entre coordenadas obtidas em campo e aquelas derivadas do processamento fotogramétrico (SANTOS et al., 2023).

Particularmente em aplicações de regularização fundiária e georreferenciamento de imóveis rurais, onde a legislação exige uma precisão posicional significativa, é ainda mais importante utilizar o PEC-PCD, pois nessas situações, a utilização de produtos cartográficos adequados às normas técnicas é uma forma de aumentar a segurança jurídica e a confiabilidade das informações espaciais (INCRA, 2022).

Em um cenário onde se destaca o uso de tecnologias de aquisição de dados geoespaciais, como os VANT, o PEC-PCD é responsável por validar a qualidade dos produtos resultantes dessas tecnologias, embora as imagens aéreas apresentem uma resolução impressionante, a qualidade final da cartografia só pode ser garantida por meio de avaliações padronizadas que seguem os critérios das normas brasileiras, dessa forma, o PEC-PCD é uma ferramenta vital para garantir a qualidade, precisão e confiabilidade dos levantamentos topográficos realizados com o auxílio de novas tecnologias, assegurando que eles atendam às exigências técnicas e legais (Silva, 2019).

2.9 NORMA TÉCNICA PARA GEORREFERENCIAMENTO DE IMÓVEIS RURAIS

A Norma Técnica para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR), definidas pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), são o principal conjunto de normas que regulam os procedimentos técnicos de levantamento, descrição e certificação de imóveis rurais em todo o Brasil. Essas diretrizes surgiram com a implementação da Lei nº 10.267/2001, que se tornou

obrigatória a identificação georreferenciada dos imóveis rurais brasileiros, buscando diminuir os conflitos de posse e proporcionar mais segurança jurídica na definição das fronteiras das propriedades rurais (INCRA, 2013).

Segundo o INCRA, a NTGIR estabelece que todos os levantamentos devem ser realizados utilizando o Sistema Geodésico Brasileiro, que, atualmente, está alinhado com o SIRGAS2000, o que garante que as informações espaciais em todo o país sejam consistentes (INCRA, 2013). Além disso, a norma estipula que os vértices dos imóveis rurais devem seguir critérios rigorosos de precisão posicional, ou seja, os dados precisam atender a padrões mínimos de qualidade para que sejam certificados no Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) (INCRA, 2022).

2.9.1 A ESTRUTURA E AS FINALIDADES DA NTGIR

As NTGIR têm como objetivo principal padronizar os procedimentos de georreferenciamento de imóveis rurais, garantindo que todos os levantamentos sigam critérios técnicos uniformes e rastreáveis, diante disso o INCRA (2022), assegura que essas normas são complementadas pelo Manual Técnico de Georreferenciamento de Imóveis Rurais.

Esse manual orienta tanto a definição dos limites jurídicos dos imóveis quanto os métodos de coleta de dados em campo, sendo considerados parte integrante da norma (INCRA, 2013; INCRA, 2022).

As normas também determinam que o georreferenciamento deve ser realizado por profissionais habilitados e credenciados junto ao INCRA, garantindo a responsabilidade técnica sobre os dados produzidos (INCRA, 2008).

2.9.2 TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO PERMITIDAS

De acordo com o INCRA (2023), o levantamento geodésico de imóveis rurais pode ser realizado por diferentes métodos de posicionamento, desde que atendam às exigências de critérios de precisão, dentre os principais métodos de posicionamento permitidos, destacam-se:

2.9.2.1 GNSS (SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE)

O levantamento geodésico por GNSS consiste em determinar a posição de pontos sobre a superfície terrestre com alta precisão usando sinais de satélites, esse método é amplamente empregado em redes geodésicas, em mapeamento e no

georreferenciamento de imóveis rurais ou urbanos, possibilitando medições rápidas sem a necessidade de visibilidade entre os pontos e pode ser feito em tempo real ou por pós-processamento, conforme menciona o INCRA, o GNSS desempenha um papel importante no posicionamento geodésico moderno, assegurando uma maior confiabilidade aos levantamentos geodésicos (IBGE, 2024).

Em conformidade com o INCRA (2022), o uso de GNSS é atualmente a principal técnica empregada em levantamentos geodésicos, sendo permitido em diferentes modalidades, como RTK (*Real Time Kinematic*), PPK (*Post Processing Kinematic*) e método estático, essas técnicas possibilitam a obtenção de coordenadas com alta precisão, entre as principais técnicas de posicionamento com o GNSS destacam-se:

- Posicionamento Relativo
- Posicionamento Relativo Estático
- Posicionamento Relativo Estático Rápido
- Posicionamento relativo Semicinematico
- Posicionamento Relativo Cinemático
- RTK Convencional
- RTK em Rede

2.9.2.2 POSICIONAMENTO POR TOPOGRAFIA CONVENCIONAL

Segundo INCRA (2022), a topografia clássica pode ser adotada de forma isolada ou em complemento a trabalhos conduzidos por posicionamento GNSS, principalmente onde este é inviável, em função de obstruções físicas que prejudicam a propagação de sinais de satélites. Dentre as principais técnicas de posicionamento por topografia convencional destacam-se:

- Estação Livre
- Poligonação
- Triangulação
- Trilateração
- Triangulateração
- Irradiação
- Interseção Linear
- Interseção Angular

- Alinhamento

2.9.2.3 POSICIONAMENTO POR SENSORIAMENTO REMOTO

De acordo com a NTGIR, o sensoriamento remoto é uma técnica complementar, aceito quando combinado ou integrado a métodos de campo de maneira que seja capaz de atingir a precisão exigida pelo INCRA.

Segundo INCRA (2022), no posicionamento por sensoriamento remoto, as informações geométricas são obtidas de forma indireta, a partir de sensores em nível orbital ou aerotransportados, dentre as possibilidades de posicionamento por sensoriamento remoto destaca-se:

- Aerofotogrametria
- Radar Aerotransportados
- Laser Scanner Aerotransportados
- Sensores Orbitais (Satélites)

2.9.3 FOTOGRAMETRIA NA NTGIR

No que diz respeito à fotogrametria destinada ao georreferenciamento de imóveis rurais, a utilização de VANTs representa um avanço tecnológico significativo para os levantamentos de campo, permitindo a obtenção de imagens aéreas de alta resolução e maior celeridade na coleta de dados em campo, diante disso conforme mencionam Dias et al (2015) a combinação entre as fotografias aéreas e os pontos de controle obtidos via GNSS resulta em níveis de precisão compatíveis com os padrões estabelecidos pela NTGIR para a definição de limites de imóveis rurais e para a confiabilidade dos produtos cartográficos que são utilizados em processos de regularização fundiária e no cadastro territorial.

A integração da Fotogrametria com a NTGIR é um importante marco para os levantamentos de terras, pois permite que novas tecnologias sejam integradas aos processos de obtenção de dados geoespaciais, sem comprometer os padrões de qualidade necessários para a certificação de propriedades rurais, no entanto, a aplicação dessa metodologia requer que vários critérios técnicos da norma sejam seguidos, especialmente no que diz respeito à preservação da precisão posicional dos produtos cartográficos resultantes. (INCRA, 2022).

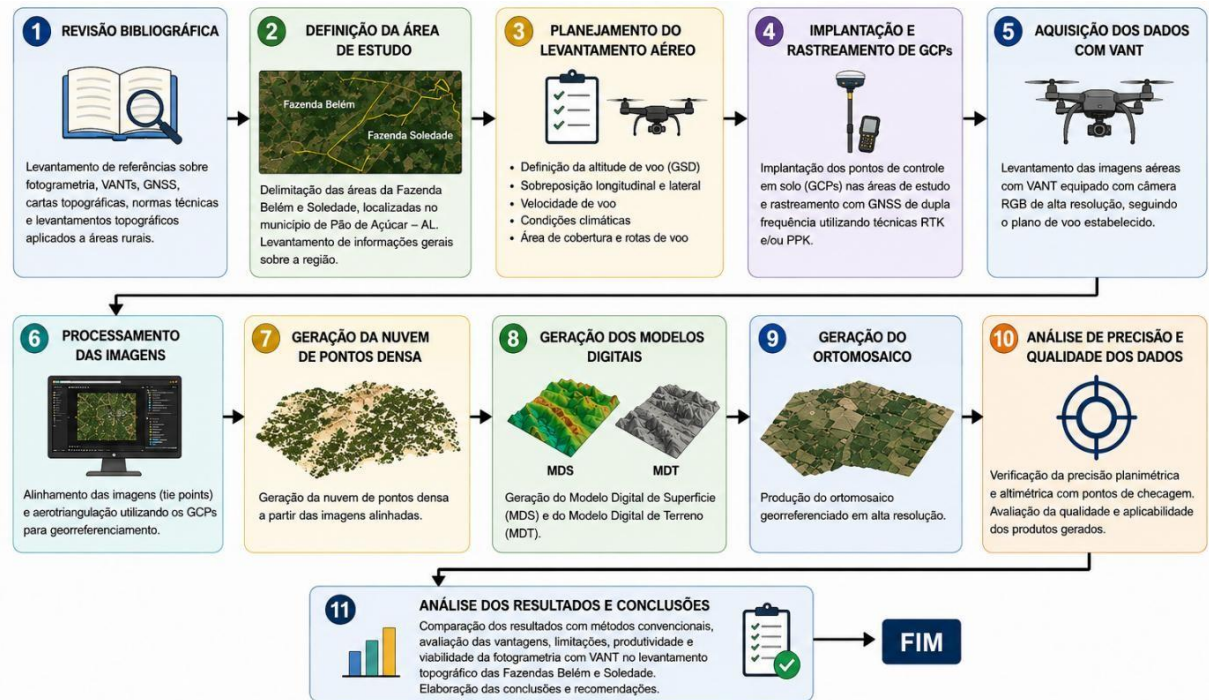
Oliveira Carvalho e Nero (2022) enfatizam que o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) no georreferenciamento de imóveis rurais é equivalente ao que é exigido pela Norma de Execução nº 02 de 2018 e pelo Manual Técnico de Georreferenciamento de Imóveis Rurais do INCRA, evidenciando que os produtos fotogramétricos gerados por essa tecnologia podem atender aos padrões de precisão posicional exigidos para certificação fundiária, desde que sejam seguidos os procedimentos técnicos referentes ao apoio de campo, ao processamento das imagens e à validação dos dados geoespaciais obtidos.

Além disso, a Fotogrametria na NTGIR exige a validação, por meio de análises estatísticas, da precisão dos produtos fotogramétricos em comparação com coordenadas obtidas em campo com maior precisão em pontos de controle, não se pode abrir mão desse procedimento, uma vez que ele é fundamental para verificar se os dados estão alinhados com os níveis de precisão planimétrica e altimétrica estabelecidos pela norma, garantindo assim a confiabilidade técnica e jurídica das informações geoespaciais (BRASIL,2011).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho pode ser sumariamente representada através da Figura 04.

Figura 04: Etapas metodológicas



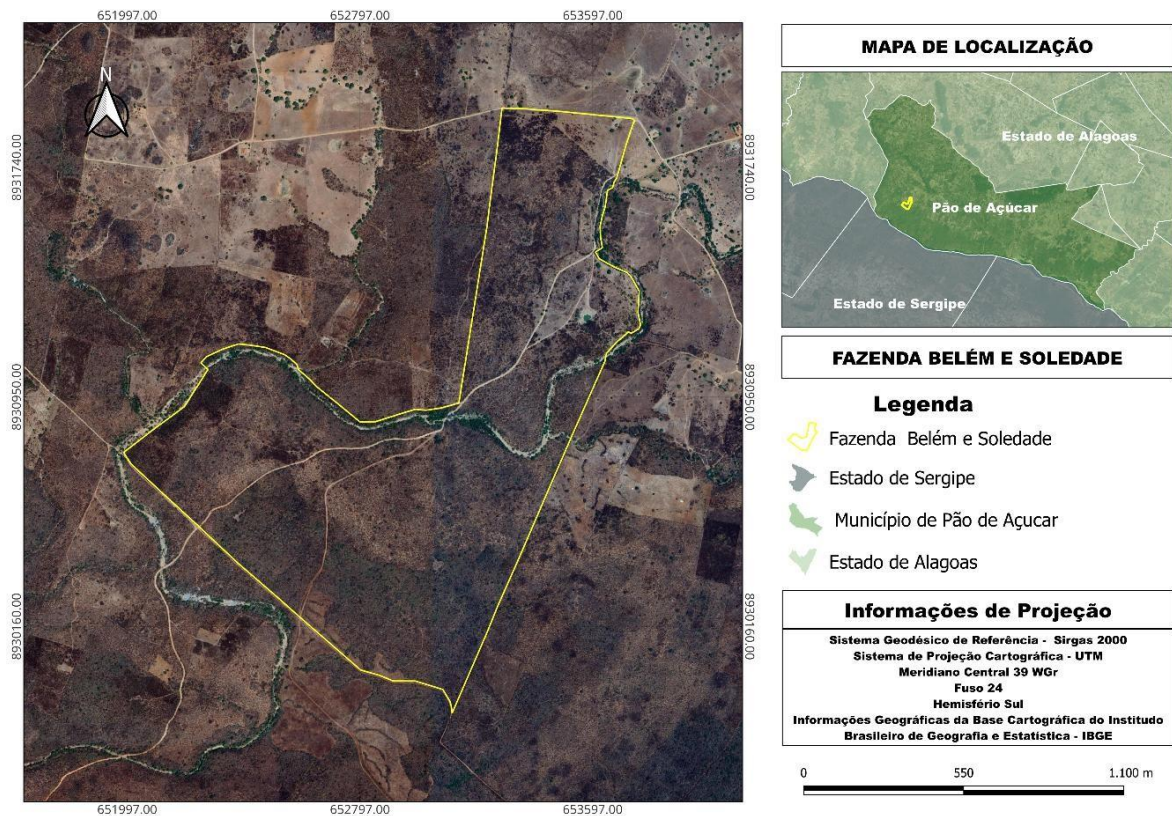
Fonte: Autor, 2026.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área utilizada como estudo de caso é a propriedade rural denominada Fazenda Belém e Soledade, que se encontra no município de Pão de Açúcar, localizado no estado de Alagoas. Está inserida na mesorregião do sertão alagoano e apresenta as seguintes coordenadas geográficas: Latitude 09°44'52" e Longitude 37°26'13".

Escolheu-se esta área porque possui as características típicas de um terreno rural na localidade, isto é, relevo diversificado, vegetação esparsa e variados tipos de uso do solo, os quais impactam diretamente na aplicação e na eficácia das técnicas de levantamento aerofotogramétrico. A Figura 05 apresenta o mapa de localização da Fazenda Belém e Soledade.

Figura 05: Mapa de Localização da Fazenda Belém e Soledade



Fonte: Autor, 2026.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho é um estudo de caso de natureza aplicada, com métodos qualitativos e quantitativos, que avalia a utilização da fotogrametria digital com VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) no levantamento topográfico em áreas rurais.

Para garantir um georreferenciamento mais preciso dos dados, a pesquisa utilizou uma combinação da fotogrametria por VANT com o uso de GNSS tendo como método de posicionamento o RTK. O VANT foi empregado para obter imagens aéreas de alta resolução e o GNSS foi usado para a coleta de pontos de controle em solo (GCPs). Com esse recurso tecnológico, utilizando métodos de correção adequados, os erros sistemáticos são minimizados e a confiabilidade dos produtos cartográficos gerados é elevada.

Os dados foram coletados no sistema geodésico oficial do Brasil SIRGAS2000, utilizando projeção UTM correspondente ao fuso da região de estudo.

3.3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a execução do levantamento topográfico com fotogrametria aérea foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- VANT (drone) equipado com câmera RGB de alta resolução, com capacidade de captura de imagens georreferenciadas, modelo Mavic 3 Enterprise (Figura 06).

Figura 06 – Drone DJI Mavic 3 Enterprise



Fonte: Autor, 2026.

- Par de receptores GNSS de dupla frequência L1/L2 para coleta dos pontos de controle, modelo CHC i73+, com precisão vertical de 2 cm e precisão horizontal de 1,5 cm. A Figura 07 mostra o modelo de receptor utilizado.

Figura 07: Receptor GNSS Modelo i73+



Fonte: Autor, 2026.

- Alvos de solo (GCPs – Ground Control Points), confeccionados em material de alta visibilidade (Figura 08).

Figura 08: GCP no solo



Fonte: Autor, 2026.

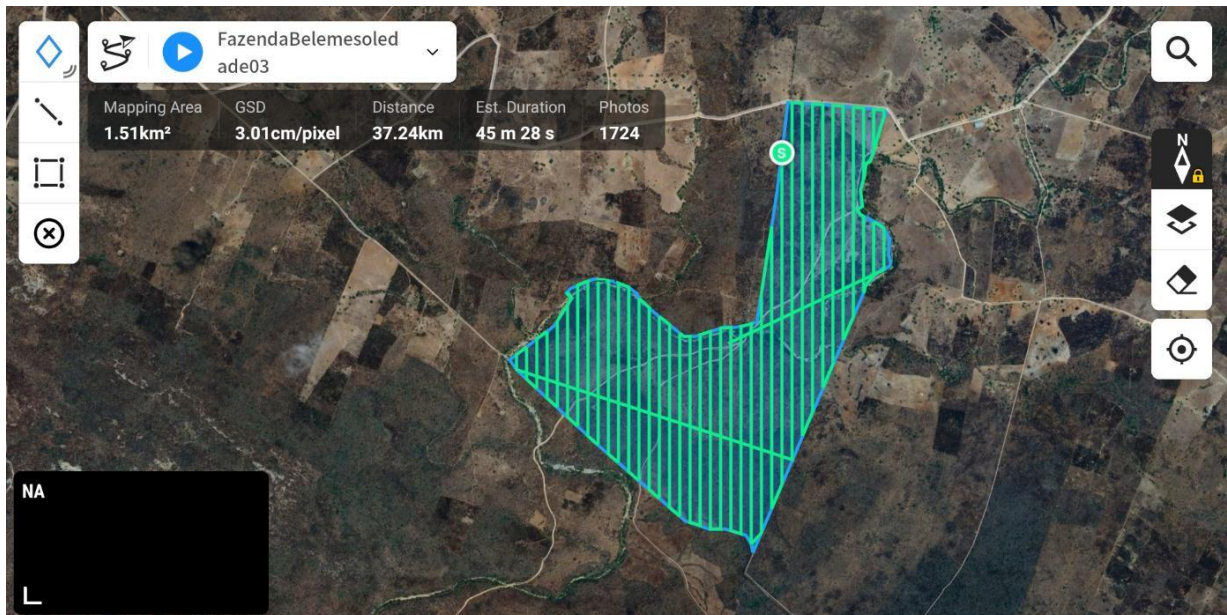
- Software de planejamento de voo automatizado.
- Software de processamento fotogramétrico Agisoft Metashape.
- Software CGO da CHC para processamento dos dados do GNSS.
- Software GeoPac para realização da PEC.
- Computador com alto desempenho gráfico e de processamento.
- Equipamentos auxiliares de campo (baterias extras, trenas, bipé e tripé).

3.4 PLANEJAMENTO DE VOO

Em um primeiro momento foi realizada uma análise do perímetro da área de estudo através de imagens de satélites do Google Earth, esse estudo serviu para entender um pouco o relevo da área e observar possíveis obstáculos para a realização do voo.

Em seguida foi iniciado a marcação dos pontos de controle em campo para posteriormente ser realizado o voo. O voo foi realizado no dia 15 de março de 2026 às 9 horas da manhã e durou 45 minutos. A Figura 9 ilustra o planejamento de voo.

Figura 9: Planejamento de Voo



Fonte: Autor, 2026.

3.5 IMPLANTAÇÃO E LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE (GCPS)

Foram implantados 20 pontos por toda a área de interesse, sendo 15 pontos de controle e 5 pontos de checagem, essa distribuição foi pensada e analisada de maneira que a distribuição da quantidade de pontos fosse suficiente para se obter um bom resultado. Inicialmente foram colocados pontos de controle nas bordas da área de interesse, pois é ali onde acontece o maior número de distorções, em seguida foram implantados pontos na parte central da área de interesse de maneira que formassem triângulos quando analisados com os pontos das bordas, a ideia de formar triângulos condiz com o pensamento de Wolf (2014), que ressalta que a triangulação fotogramétrica é responsável por estabelecer a orientação espacial das imagens e assegurar a precisão geométrica dos produtos gerados no processamento fotogramétrico. A Figura 10 mostra a implantação dos pontos de controle e rastreamento utilizando GNSS.

Como mostrou a Figura 10, após a implantação em solo dos pontos de controle, eles foram rastreados com o receptor GNSS, usando o método RTK, obtendo assim as coordenadas precisas daqueles pontos.

Figura 10: Implantação de Ponto de Controle



Fonte: Autor, 2026.

3.6 EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

Com os pontos de controle devidamente planejados e inseridos em campo, passou para a fase de execução dos voos com o VANT.

Enquanto o VANT estava em voo, seu sistema de piloto automático realizou a captura sequencial de imagens georreferenciadas, garantindo a cobertura total da área de estudo. Foram respeitadas as condições de segurança operacional, com atenção à altitude máxima permitida e às zonas de exclusão aérea.

3.7 PROCESSAMENTO DOS DADOS FOTOGRAMÉTRICOS

O processamento dos dados ocorreu em ambiente computacional utilizando o *software* Agisoft Metashape versão 1.8.4 que é um software pago especializado em fotogrametria Digital.

As etapas do processamento seguiram a seguinte metodologia:

- Download das imagens: Primeiro passo ao retornar do campo foi descarregar as fotografias do cartão de memória do drone, onde ficaram armazenadas todas as imagens obtidas durante o voo.

- Importação: Em seguida foi realizada a importação de todas as fotografias para software de processamento, nesse caso o Argsoft metashape versão 1.8.4.
- Definição do Sistema de Referência: Após a importação das imagens, o passo seguinte é informar ao software o sistema de referência que vamos trabalhar juntamente do tipo de coordenadas e o fuso horário da região de interesse, nesse trabalho foi utilizado o SIRGAS2000 UTM ZONA 24S.
- Alinhamento das imagens: Nessa etapa, solicita-se ao software que realize o alinhamento das imagens, onde é informado a acurácia se é baixa, média ou alta, nesse caso alinhou-se com precisão alta. Ao iniciar o alinhamento o *software* identifica os pontos em comum entre as imagens sobrepostas, gerando uma nuvem de pontos e estimando a posição relativa da câmera.
- Importação dos Pc (pontos de controle): Após finalizar o alinhamento das imagens, o passo seguinte é importar os pontos de controle, onde eles serão identificados nas imagens, permitindo assim o ajuste geométrico e o georreferenciamento preciso.
- Pontaria: Após a importação dos Pc, foi realizada a pontaria dos alvos implantados no solo. Nesse processo, seleciona-se o ponto de controle e o *software* identifica todas as imagens em que o drone identificou a presença daquele ponto. Com isso é apontado o mesmo ponto em diferentes imagens, permitindo um alinhamento fotogramétrico preciso. Esse processo é realizado com todos os pontos de controle.
- Processamento: Após realizar todos os passos acima descritos, foi chegado o momento de iniciar o processamento, onde foi inserido todos os parâmetros de processamento e botado para processar o voo, onde ao fim desse processamento será gerado alguns produtos cartográficos.
- Geração da nuvem de pontos: Após finalizar o processamento, foi gerado uma nuvem de pontos densa, representando com maior detalhamento a superfície da área de estudo.

- Geração do Modelo Digital: A partir da nuvem de pontos, foram gerados Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital do Terreno (MDT) e as curvas de níveis com equidistâncias de 1 metro.
- Geração do Ortomosaico: Após o processamento foi gerado um ortomosaico georreferenciado da área de interesse, permitindo medições precisas de distâncias, áreas e volumes.

3.8 ANÁLISE DA PRECISÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A precisão dos resultados foi avaliada por meio da análise dos erros dos pontos de controle. Foi calculado o Erro Médio Quadrático (RMSE) nas direções X, Y e Z.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes da etapa de processamento fotogramétrico, foi realizada a missão de voo seguindo parâmetros previamente definidos, visando garantir a qualidade geométrica dos produtos cartográficos gerados.

- Altitude de voo: 100 m com (GSD – Ground Sample Distance) de 3 cm/pixel
- Sobreposição frontal: 75% a 80%.
- Sobreposição lateral: 75% a 80%.
- Velocidade de voo: 15 m/s
- Linhas de Voo: 36

Após a conclusão de todo processamento, vários produtos cartográficos foram gerados, dentre eles o ortomosaico georreferenciado da área de estudo, representando uma visão precisa da superfície do terreno.

O ortomosaico gerado apresentou um elevado grau de detalhamento da Fazenda Belém e Soledade, sendo possível observar as feições do terreno, e alguns aspectos necessários para identificação da propriedade mediante ao georreferenciamento do imóvel rural, aspectos como: limites físicos, cercas, vias de acesso, áreas de vegetação e as benfeitorias existentes na propriedade.

Além dos produtos cartográficos, o *software* de processamento gerou um relatório de processamento, que reúne informações sobre a qualidade do processamento fotogramétrico, incluindo métricas relacionadas ao alinhamento das imagens, ao ajustamento fotogramétrico e à precisão geométrica dos produtos gerados. A partir desse relatório, foram extraídos os principais indicadores utilizados na avaliação da qualidade dos produtos cartográficos.

A qualidade do ortomosaico está diretamente relacionada à sobreposição longitudinal e lateral das imagens, bem como aos ajustes fotogramétricos realizados durante o processamento. O relatório de processamento indicou consistência no alinhamento das imagens e confiabilidade geométrica do produto gerado, evidenciada por um erro médio de reprojeção de 0,603 pixel, valor considerado satisfatório para aplicações de mapeamento com VANTs.

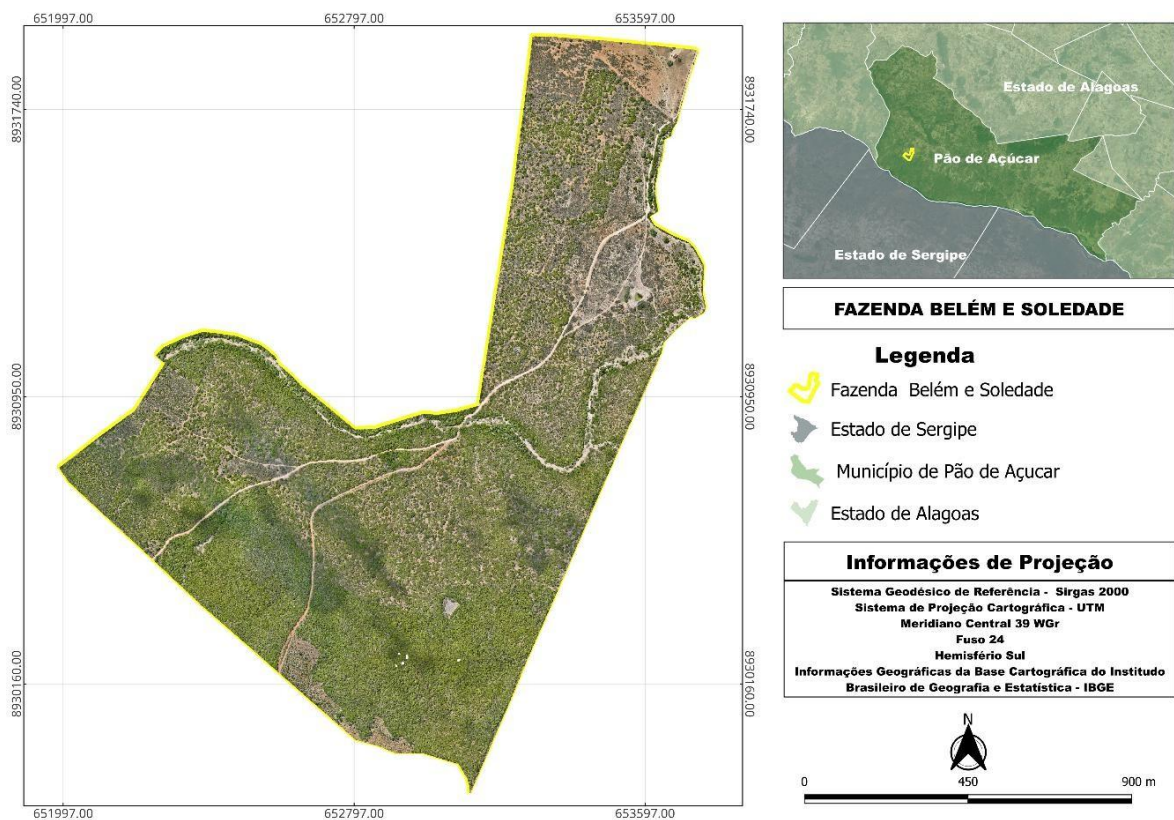
Além disso, o processamento foi realizado com 1.724 imagens, adquiridas a uma altura de voo de 100 m, resultando em 989 estações de câmera, 908.313 pontos

de ligação (*tie points*) e 2.955.384 projeções, cobrindo uma área aproximada de 1,5 km². O relatório também demonstrou que o ortomosaico alcançou uma resolução espacial (*Ground Sample Distance – GSD*) de 3 cm/pixel, permitindo elevado nível de detalhamento da superfície imageada.

Após a etapa de planejamento do voo, da aquisição das imagens e do processamento fotogramétrico, obteve-se como principal produto cartográfico o ortomosaico georreferenciado da Fazenda Belém e Soledade. Esse produto reúne as imagens capturadas durante o levantamento aéreo, corrigidas geometricamente, permitindo uma representação contínua e precisa da superfície da área de estudo.

A utilização do ortomosaico permite a visualização detalha da Fazenda Belém e Soledade, como também uma vista detalha dos limites da propriedade, contribuindo também para a representação das feições do imóvel, de acordo com os padrões de precisão estabelecidos pelas normas de georreferenciamento de imóveis rurais do INCRA. A Figura 11 mostra o ortomosaico da área de estudo.

Figura 11: Ortomosaico da Fazenda Belém e Soledade



Fonte: Autor, 2026.

Com o processamento do voo concluído, também foi possível gerar uma nuvem densa de pontos da área de estudo, representando tridimensionalmente a superfície da área de interesse com elevado grau de detalhamento.

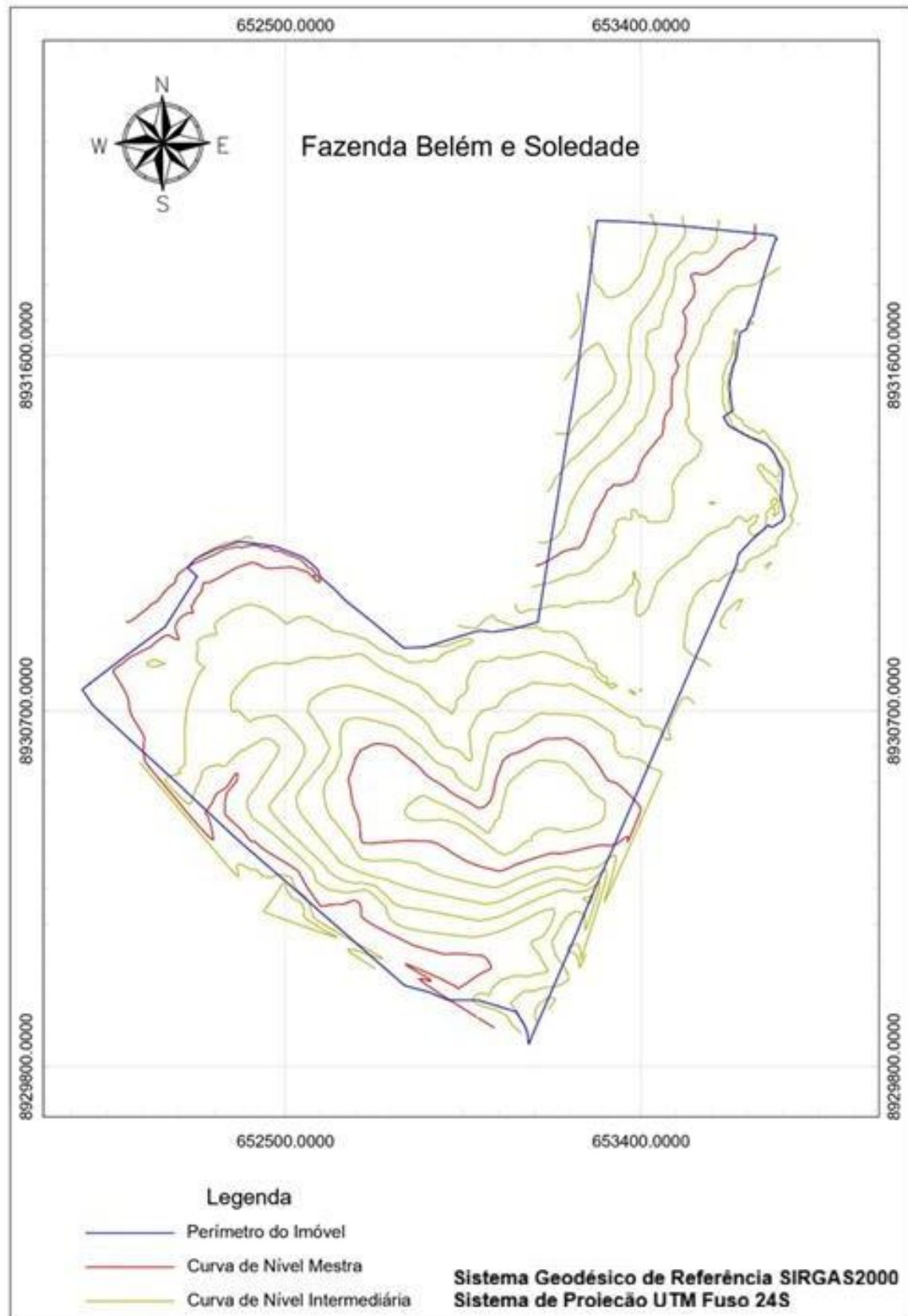
A nuvem densa apresentou uma distribuição homogênea dos pontos ao longo da área de interesse, a densidade desses pontos contribuiu para geração dos produtos cartográficos com um nível maior de detalhes, como o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT).

A qualidade da nuvem densa está diretamente ligada a sobreposição das imagens obtidas durante o voo, a resolução das imagens e ao ajustamento fotogramétrico realizado durante o processamento. Diante disso, uma correta configuração dos parâmetros de voo e de processamento contribuiu para uma obtenção de uma representação espacial compatível com as exigências necessárias para a utilização da fotogrametria em georreferenciamento de imóveis rurais.

A nuvem densa serviu para a extração de informações altimétricas da área de estudo. Através da nuvem densa foi possível gerar as curvas de nível da área de estudo. As curvas de níveis foram geradas com equidistância de 1 m, conforme mostra a Figura 12.

Através da criação da nuvem de pontos foi possível gerar o Modelo Digital de Superfície (MDS), que é um produto cartográfico tridimensional que representa toda a área abrangida pelo aerolevantamento. Esse modelo demonstra com clareza não apenas o relevo natural do terreno, mais também todos os elementos presentes acima da superfície, como edificações, cercas, vegetação, arvores e todos os elementos que estiverem acima da superfície.

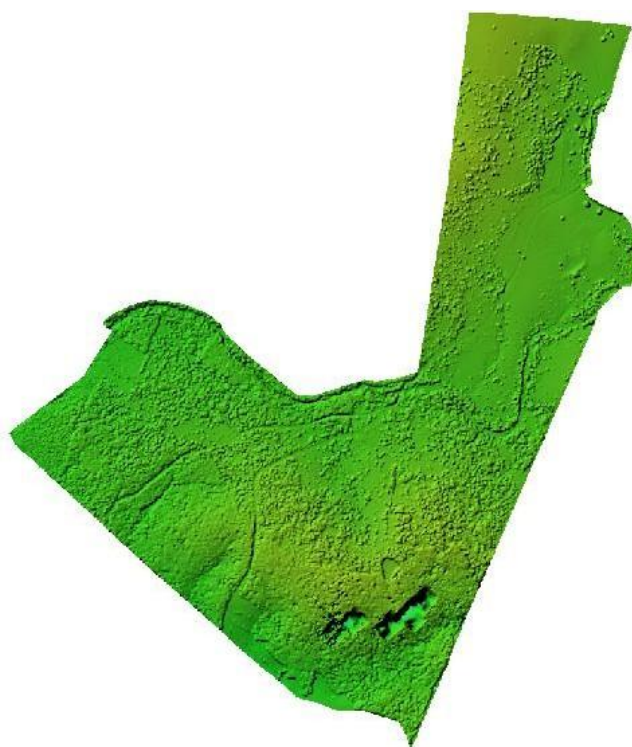
Figura 12: Curvas de Nível da Fazenda Belém e Soledade



Fonte: Autor, 2026.

O relatório de processamento mostrou que foi obtido uma resolução espacial elevada, essa resolução possibilitou uma ótima definição das feições presentes na superfície, garantindo uma boa qualidade visual e precisão do modelo gerado. A Figura 13 mostra o Modelo Digital de Superfície.

Figura 13: Modelo Digital de Superfície

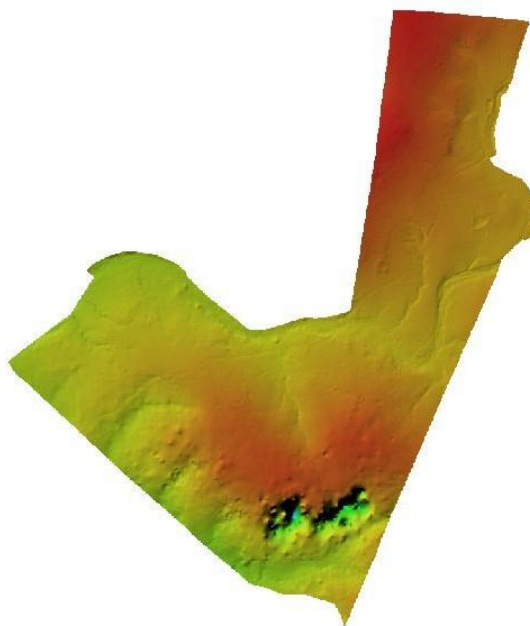


Fonte: Autor, 2026.

A análise visual da Figura 14 evidencia que o Modelo Digital de Superfície apresenta boa qualidade de representação, com continuidade da superfície e sem a ocorrência de falhas significativas ou distorções relevantes. Observa-se que as áreas onde possui vegetação ficou bastante detalhada, permitindo identificar nitidamente as áreas onde a superfície é coberta por vegetação e regiões onde o solo é exposto, outro fator importante observado durante a análise visual do MDS é a variação altimétrica, onde ficam nítidas as partes da área de estudo onde possui um relevo mais acidentado, mostrando a eficiência obtida da modelagem tridimensional pelo processamento.

Com o MDS gerado, foi possível através de sua filtragem gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT). O MDT foi gerado a partir da remoção de todos os elementos presentes acima da superfície, tais como: construções, vegetações, arvores, de modo a deixar somente o terreno natural. A Figura 14 mostra o Modelo Digital de Terreno.

Figura 14: Modelo Digital de Terreno



Fonte: Autor, 2026.

O Modelo Digital de Terreno (MDT) constitui um dos principais produtos do processamento fotogramétrico, uma vez que representa apenas a superfície do solo, sem interferências de elementos superficiais. Essa característica torna o modelo fundamental para análises topográficas, pois permite a extração de informações confiáveis sobre o relevo, como declividade, variações altimétricas e possíveis padrões de drenagem. No contexto do georreferenciamento de imóveis rurais, o MDT possui grande relevância, pois contribui para a compreensão detalhada das condições físicas do terreno, auxiliando na interpretação e representação cartográfica da área de estudo.

Com a remoção de todos os elementos acima da superfície foi possível realizar uma análise detalhada das feições naturais do terreno, permitindo ser realizado um estudo topográfico da área do estudo. Nesse sentido, o MDT possibilita a identificação de áreas com diferentes declividades e variações de altitude, fornecendo subsídios importantes para a caracterização do relevo.

Baseado no relatório de processamento e nas curvas de níveis geradas, o MDT obteve uma variação de altitude entre 20 m e 169 m. Analisando o MDT, as cores frias representam os menores valores de altitude, enquanto as cores quentes representam os maiores valores de altitude.

Como observado na Figura 16, os valores do RMSE, mostram que o MDT obteve uma boa precisão altimétrica.

Para avaliar a precisão dos produtos cartográficos gerados foi realizado o PEC-PCD, que é o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais. O Padrão de Exatidão Cartográfica, definido pelo decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabeleceu critérios para classificação de cartas quanto à sua exatidão. Para que um produto digital seja aceito como referência cartográfica, é necessário que pelo menos 90% dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparado com as coordenadas levantadas em campo, apresentem valores iguais ou inferiores aos previstos no PEC-PCD, devendo ainda apresentar valores de Erro Padrão iguais ou inferiores aos previstos na tabela do decreto. O Quadro 02 mostra a PEC-PCD relacionada a planimetria e a altimetria.

Quadro 02: PEC - PCD

Tipo	PEC - PCD (2016)	PEC (1984)	1/1.000		1/2.000		1/5.000		1/10.000	
			EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	-	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
	B	A	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
	C	B	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	D	C	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00
Altimetria	A	-	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
	B	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
	C	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
	D	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Fonte: Autor, 2026.

Para realização do PEC-PCD, foi utilizado o software GeoPEC, que é um software gratuito desenvolvido pelo departamento de Agrimensura e Cartografia da Universidade Federal de Viçosa, que está localizada na cidade de Viçosa, no estado de Minas Gerais. Esse software permite que sejam importados os dados dos pontos para fazer a análise quanto a classificação baseada no decreto nº 89.817 de 1984.

O Quadro 03 lista os pontos de checagem utilizados para a análise no GeoPEC.

Quadro 03: Pontos Analisado Pelo Software GeoPEC

Pontos de Checagem	Coordenadas coletadas em campo			Coordenadas do produto cartográfico		
	Este (m)	Norte (m)	Altitude (m)	Este (m)	Norte (m)	Altitude (m)
01	653039,936	8930048,987	40,157	653039,939	8930048,983	40,151
02	653246,846	8930497,015	27,821	653246,847	8930497,010	27,815
03	653071,196	8930563,306	61,889	653071,199	8930563,300	61,894
04	653375,793	8930765,599	76,391	653375,796	8930765,606	76,398
05	653461,200	8930936,384	48,286	653461,205	8930936,386	48,290

Fonte: Autor, 2026.

Como pode ser observado na Figura 15, após o processamento dos pontos de verificação e a realização dos testes estatísticos, os produtos cartográficos foram classificados como Classe A para a escala 1:1000, tanto na análise planimétrica quanto na altimétrica. Esse resultado indica que os erros posicionais observados permaneceram dentro dos limites estabelecidos pelo PEC-PCD para essa classe de precisão, evidenciando a elevada qualidade geométrica dos produtos gerados. Entretanto, a análise de tendência e precisão realizada pelo GeoPEC indicou que, embora os produtos sejam precisos, apresentam tendência sistemática. Dessa forma, os produtos não foram considerados acurados para a escala 1:1000, uma vez que a acurácia requer, além da precisão, a ausência de tendência nos erros posicionais.

Figura 15 Classificação do PEC-PCD

CLASSIFICAÇÃO FINAL DO PRODUTO

Padrão de acurácia utilizado: Decreto n. 89.817/1984 - Análise Planimétrica
Metodologia: Santos et al. (2016) com as tolerâncias PEC-PCD da ET-CQDG

O produto "", **NÃO É ACURADO** para a escala de 1/1000. O resultado do PEC-PCD foi "**Classe A**", de acordo com o Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.
O produto foi submetido a análise de tendência e precisão em suas componentes posicionais, onde os resultados foram: **É Preciso e Existe Tendência**.

Pontos de checagem utilizados: 5
RMS das discrepâncias (m): 0,0045

Fonte: Autor, 2026.

O segundo resultado de interesse refere-se à verificação da normalidade dos erros posicionais por meio do teste de Shapiro–Wilk, procedimento estatístico amplamente empregado para avaliar a adequação dos dados à distribuição normal, pressuposto fundamental para a aplicação de testes paramétricos. Os resultados obtidos indicaram valores da estatística de teste de $W_{calc}(E) = 0,8835$ para a componente Leste (E) e $W_{calc}(N) = 0,8689$ para a componente Norte (N). Os respectivos valores de significância foram $p = 0,3254$ e $p = 0,2621$, considerando um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Como ambos os valores de p são superiores ao nível de significância adotado ($p > 0,05$), não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula de normalidade.

Após a verificação do atendimento ao pressuposto de normalidade, procedeu-se à avaliação da existência de tendência sistemática nos erros posicionais por meio do teste t de Student, amplamente empregado para verificar se a média dos erros difere significativamente de zero. Esse procedimento consiste em comparar a estatística de teste calculada (t_{calc}) com o valor crítico da distribuição t de Student (t_{tab}), considerando o nível de significância previamente estabelecido.

Os resultados obtidos indicaram $t_{calc}(E) = 67,082$ para a componente Leste (E) e $t_{calc}(N) = -0,5367$ para a componente Norte (N), enquanto o valor crítico foi $t_{tab} = 2,1318$, correspondente ao nível de confiança de 95%. Observa-se que, para a componente Leste, o valor absoluto da estatística calculada é significativamente superior ao valor crítico ($|67,082| > 2,1318$), conduzindo à rejeição da hipótese nula de ausência de tendência e evidenciando a existência de erro sistemático nessa componente. Em contrapartida, para a componente Norte, verifica-se que $|-0,5367| < 2,1318$, não havendo evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula, indicando ausência de tendência significativa nessa direção.

Complementarmente, foi realizada a análise por Estatística Espacial dos resíduos, na qual se obteve média direcional (azimute) de $118,4^\circ$ e variância circular igual a 0,42. Esses resultados evidenciam a existência de um padrão preferencial de orientação dos erros, corroborando a presença de comportamento sistemático nos resíduos posicionais. Dessa forma, a análise conjunta do teste t de Student e da estatística espacial indica que os erros não se distribuem de maneira exclusivamente aleatória, apresentando uma componente sistemática que pode estar associada a fatores inerentes ao processo de aquisição, processamento ou modelagem dos dados

fotogramétricos. Esse comportamento deve ser considerado na interpretação da qualidade posicional do produto cartográfico, uma vez que a presença de tendência sistemática compromete a acurácia absoluta, ainda que os indicadores de precisão possam apresentar desempenho satisfatório.

Após ser realizada toda análise estatística, foi possível confirmar que houve uma tendência direcional significativa, a média direcional (azimute) foi de $118,4^\circ$ e uma variância circular de 0,42. Esses resultados indicam que os erros apresentaram uma orientação preferencial em torno desse azimute, evidenciando uma concentração moderada das direções e caracterizando um comportamento direcional dos resíduos.

Apesar dos produtos cartográficos terem sido classificados na Classe A segundo os critérios do PEC-PCD, a análise estatística identificou a presença de tendência sistemática, motivo pelo qual o produto não foi considerado acurado para a escala analisada. Esse resultado pode estar associado à amostragem utilizada na etapa de validação, uma vez que a quantidade e a distribuição espacial dos pontos de checagem influenciam diretamente a confiabilidade dos testes estatísticos. Assim, a utilização de um número maior de pontos de verificação, distribuídos de forma homogênea em toda a área de estudo, poderia proporcionar uma avaliação mais representativa da qualidade posicional dos produtos cartográficos. Além disso, uma amostragem mais robusta reduziria a influência de discrepâncias pontuais sobre os resultados, permitindo uma análise mais consistente da existência de tendência sistemática.

A identificação de tendência sistemática na componente Leste indica que os erros posicionais não se distribuíram aleatoriamente em torno de média nula, evidenciando a existência de um deslocamento médio das coordenadas nessa direção. Esse resultado não implica necessariamente baixa precisão dos produtos cartográficos, uma vez que os valores de RMSE permaneceram reduzidos e compatíveis com a Classe A do PEC-PCD. Entretanto, demonstra que, apesar da elevada precisão, existe um viés sistemático que compromete a acurácia absoluta do produto, conforme evidenciado pelo teste t de Student.

É importante destacar que a presença de tendência sistemática não invalida a utilização dos produtos cartográficos para diversas aplicações de engenharia, especialmente aquelas em que a geometria relativa entre os elementos é mais relevante que o posicionamento absoluto. Contudo, aplicações que exigem elevada acurácia absoluta, como o georreferenciamento de imóveis rurais, demandam

investigação adicional das causas do viés observado e validação com um número maior de pontos de checagem distribuídos de forma homogênea na área de estudo, aumentando a confiabilidade da avaliação estatística.

Como os produtos cartográficos gerados, foi importante realizar uma segunda análise baseada nos critérios estabelecidos pela Norma Técnica de Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR). Enquanto o PEC-PCD analisa a qualidade cartográfica do produto gerado, a NTGIR utiliza requisitos específicos voltados à precisão posicional dos vértices que determinam os limites do imóvel.

A avaliação da acurácia posicional foi complementada pela determinação do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* – RMSE) dos pontos de checagem, métrica amplamente empregada para quantificar a magnitude dos erros posicionais em produtos cartográficos. O RMSE foi calculado a partir das discrepâncias entre as coordenadas obtidas em campo e aquelas extraídas do produto cartográfico, permitindo avaliar o desempenho geométrico da metodologia proposta.

Os resultados obtidos indicaram RMSE de 0,72 cm para a componente Leste (X), 0,64 cm para a componente Norte (Y) e 1,34 cm para a componente Altimétrica (Z). A combinação das componentes planimétricas resultou em um RMSE horizontal (XY) de 0,96 cm, enquanto o RMSE tridimensional total foi de 1,65 cm, conforme apresentado na Figura 22. Esses valores evidenciam reduzidas discrepâncias entre as coordenadas de referência e as coordenadas determinadas a partir do produto gerado, indicando elevada consistência geométrica do levantamento.

Considerando os critérios estabelecidos pela Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR), que estabelece precisão posicional planimétrica igual ou inferior a 0,50 m para vértices de limites artificiais, verifica-se que o RMSE planimétrico obtido foi de cerca de 1 cm, encontra-se substancialmente abaixo do limite normativo. Esse valor representa aproximadamente 1,9% da tolerância máxima admissível, correspondendo a uma margem de aproximadamente 0,49 m em relação ao limite estabelecido pela norma para vértices com limite físico.

Os resultados demonstram que a metodologia empregada apresenta desempenho geométrico significativamente superior ao requisito mínimo exigido pela NTGIR, evidenciando elevado nível de acurácia posicional para a representação de limites artificiais. Esse desempenho reforça a confiabilidade do produto cartográfico obtido e confirma sua adequação para aplicações de georreferenciamento de imóveis rurais, atendendo não apenas aos requisitos da NTGIR, mas também aos critérios de

qualidade posicional estabelecidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade posicional dos produtos cartográficos gerados por meio da fotogrametria com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), verificando sua precisão e acurácia para aplicação em levantamentos topográficos por meio da comparação com pontos levantados por GNSS RTK e da classificação segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

Os objetivos propostos foram alcançados, uma vez que o levantamento aerofotogramétrico permitiu a geração de ortomosaico, nuvem densa de pontos, Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT) e curvas de nível, possibilitando a avaliação da qualidade posicional desses produtos por meio dos critérios estabelecidos pelo PEC-PCD.

A análise dos resultados demonstrou que os produtos cartográficos atenderam aos requisitos da Classe A para a escala 1:1.000, evidenciando elevada precisão posicional. Por outro lado, a identificação de tendência sistemática reforça a importância da utilização conjunta de procedimentos estatísticos que permitam avaliar, além da precisão, a acurácia dos produtos cartográficos, contribuindo para uma análise mais abrangente da qualidade posicional.

A tendência sistemática observada não invalida a utilização dos produtos cartográficos para diversas aplicações de engenharia, nas quais a consistência geométrica e a precisão relativa são fatores predominantes. Entretanto, em aplicações que exigem elevada acurácia absoluta, como o georreferenciamento de imóveis rurais e outras atividades sujeitas a rigorosos requisitos normativos, torna-se recomendável investigar as possíveis causas desse viés e adotar procedimentos adicionais de controle de qualidade, incluindo a ampliação do número de pontos de checagem, sua distribuição homogênea na área de estudo e a reavaliação do ajustamento fotogramétrico. Essas medidas contribuem para aumentar a confiabilidade estatística da validação e reduzir a influência de erros sistemáticos nos produtos gerados.

Os resultados obtidos demonstram que a fotogrametria com ARP constitui uma alternativa tecnicamente viável para levantamentos topográficos, produzindo produtos cartográficos com elevada qualidade posicional quando associada a um adequado planejamento do levantamento, ao apoio geodésico por GNSS RTK e à aplicação de procedimentos de validação compatíveis com os padrões cartográficos vigentes.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a realização de novos levantamentos contemplando diferentes características de relevo, cobertura do terreno e dimensões de área, bem como diferentes configurações de planejamento de voo, distribuição de pontos de controle e de checagem, alturas de voo e estratégias de processamento fotogramétrico. Recomenda-se, ainda, a utilização de um número maior de pontos de verificação independentes, distribuídos de forma homogênea em toda a área de estudo, permitindo uma avaliação estatística mais robusta da qualidade posicional e da presença de tendências sistemáticas. Também são sugeridos estudos comparativos envolvendo diferentes plataformas, sensores, métodos de posicionamento GNSS e *softwares* de processamento, visando compreender a influência desses fatores sobre a precisão, a acurácia e a conformidade dos produtos cartográficos com o PEC-PCD e com a NTGIR.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. C.; GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Influência dos pontos de controle terrestre na acurácia de produtos fotogramétricos obtidos por drones. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 30, e2024008, 2024.
- BARROS, R. S.; FERREIRA, T. A.; ALMEIDA, P. F. Aplicação de VANTs na geração de modelos digitais de superfície para áreas rurais. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 11, n. 1, p. 25-41, 2023.
- BORGES, André Ferreira et al. Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros. *Revista Geografias*, v. 12, n. 1, p. 45-63, 2017.
- BRASIL. Decreto n.º 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 21 jun. 1984.
- BRASIL. Diretoria de Serviço Geográfico. Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG). Brasília, DF: DSG, 2011.
- CARVALHO, Paulo Roberto Alves; DALAZOANA, Rosangela. SIRGAS2000: o sistema de referência geocêntrico para as Américas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 5-23, 2006.
- CINTRA, Jorge Pimentel. *Fotogrametria digital*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- COLMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 92, p. 79-97, 2014.
- COSTA, Sônia Maria Alves; FORTES, Luiz Paulo Souto. A evolução da geodésia: da observação às estrelas aos satélites. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 64, n. 1, p. 136-145, 2019.
- CUNHA, R. F.; GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Avaliação da precisão de produtos fotogramétricos obtidos por RPAS em diferentes condições de voo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 29, e2023007, 2023.
- DALMOLIN, Jorge Augusto. Avaliação do uso da fotogrametria digital em levantamentos topográficos. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

DIAS, Gilda Maria et al. Levantamento de limites de imóvel rural a partir de fotografias obtidas por VANT, apoiadas por pontos GNSS. *Revista Cartográfica*, n. 91, p. 35-58, 2015.

EISENBEISS, Henri. UAV Photogrammetry. Zurich: ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264>. Acesso em: 11 mar. 2026, às 14h23min.

FERREIRA, Bruno Rafael de Souza; ROSA, Diego de Jesus Queiroz; CARMO, Junio César dos Santos. Uso de RPA (Remotely Piloted Aircraft System) aplicado ao georreferenciamento de imóveis rurais. *Paramétrica*, v. 15, n. 2, 2023.

FRANCO, Guilherme Gandra; NAIME, André Fonseca. Structure from Motion (SfM): uma breve revisão histórica, aplicações nas geociências e perspectivas futuras. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 44, 2021.

FREITAS, E. P.; OLIVEIRA, R. A.; SANTOS, M. A. Avaliação da precisão cartográfica de ortomosaicos produzidos por VANT em áreas rurais. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 13, n. 1, p. 45-61, 2025.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 41-48, 1994.

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

HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; MORITZ, Helmut. *Physical Geodesy*. Wien; New York: Springer, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Rede geodésica: Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). Manual Técnico de Posicionamento: Georreferenciamento de Imóveis Rurais. Brasília, DF: INCRA, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Glossário do Anuário Estatístico do Brasil 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 27 fev. 2026, às 10h41min.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Rede Altimétrica de Alta Precisão. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/geodesia.html>. Acesso em: 04 abr. 2026, às 16h58min.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.
- KRUEGER, Claudia Pereira et al. Posicionamento GNSS em Tempo Real: evolução, aplicações práticas e perspectivas para o futuro. *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 72, n. especial, p. 1359-1379, 2020.
- LIMA, G. S.; PEREIRA, R. C.; SANTOS, D. A. Emprego de drones no georreferenciamento de imóveis rurais: estudo aplicado ao cadastro territorial. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, n. 29, 2022.
- LOPES, Matheus Amâncio et al. Análise de sobreposição de imagens em levantamentos aerofotogramétricos urbano. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SELPER, 21., 2024, Belém. Anais... Belém: UFPA, 2024.
- MAIDMENT, D. R. et al. *Geospatial technology for earth observation and environmental management*. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- MARTINS, V. L.; DAL POZ, A. P.; GALO, M. Aplicações da fotogrametria digital baseada em Structure from Motion em áreas agrícolas.
- MENDES, A. R.; SOUZA, J. M.; SILVA, E. F. Avaliação da acurácia planimétrica de ortomosaicos gerados por drones para fins cadastrais. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 75, n. 2, p. 345-361, 2023.
- MONICO, João Francisco Galera. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora UNESP, 2008.
- MONICO, João Francisco Galera; DALAZOANA, Rosangela. Sistemas de referência geodésicos e sua evolução no Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 59, n. 2, p. 127-136, 2007.
- MORAES, A. P.; FONSECA, E. L.; MACHADO, M. A. Uso de VANTs para levantamento topográfico e monitoramento ambiental em propriedades rurais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, n. 5, p. 389-400, 2024.
- MORAIS, F. H.; COSTA, R. S.; FERREIRA, B. R. S. Análise comparativa entre levantamento GNSS RTK e fotogrametria por drones para fins cadastrais. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, n. 33, 2025.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). World Geodetic System 1984 (WGS84). Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov>. Acesso em: 22 fev. 2026, às 09h17min.
- OLIVEIRA, H. C.; FERREIRA, M. V. Avaliação da acurácia posicional de ortomosaicos gerados por VANT. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 71, n. 3, 2019.

- PEREIRA, A. L.; SILVA, D. C.; CENTENO, J. A. S. Aplicação da fotogrametria digital com VANT para geração de modelos digitais de terreno em propriedades rurais. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 76, n. 2, p. 201-219, 2024.
- RAMOS, Marcony de Paulo; DAL POZ, William Rodrigo; CARVALHO, Alessandro Salles. Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas estimadas pelo PPP. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n. 3, p. 1-20, 2016.
- ROCHA GOMES, Anthony de Almeida da; SILVA, Bruna Nunes da; NUNES, Julio Cesar Borba et al. O uso de drones para mapeamento topográfico. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 15, n. 5, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v15i5.3799.
- RODRIGUES, M. C.; CENTENO, J. A. S. Controle de qualidade em ortomosaicos produzidos por VANTs utilizando a ET-CQDG. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 12, n. 2, p. 88-104, 2024.
- SANTOS, D. R. et al. Controle de qualidade posicional em produtos cartográficos digitais. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 8, n. 2, 2020.
- SANTOS, L. A.; FERREIRA, B. R. S.; CARMO, J. C. S. Potencial dos sistemas RPAS para levantamentos cadastrais rurais de alta precisão. *Revista Geociências*, v. 43, n. 1, p. 115-128, 2024.
- SANTOS, R. A. et al. A avaliação da acurácia de ortofotos obtidas com aeronaves remotamente pilotadas com o uso da PEC-PCD para fins de regularização fundiária (REURB) em três comunidades da Região Metropolitana de Maceió (RMM). 2023.
- SHAN, J.; TOTH, C. K. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- SILVA, C. A. et al. Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados pelo MVANT/DNPM. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 7, p. 1479-1495, 2015.
- SILVA, D. C.; CENTENO, J. A. S. Fotogrametria digital aplicada ao uso de VANTs para geração de produtos cartográficos. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69, n. 6, p. 1145-1158, 2017.
- SILVA, H. M.; PEREIRA, T. S.; ALVES, J. R. Comparação entre métodos GNSS RTK e fotogrametria por drones para levantamentos topográficos rurais. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 76, n. 1, p. 55-73, 2024.

SILVA, J. P.; OLIVEIRA, F. A.; COSTA, M. R. Análise da qualidade cartográfica de produtos fotogramétricos obtidos por aeronaves remotamente pilotadas. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 74, n. 4, p. 891-910, 2022.

SOUZA, Sérgio Florêncio de. *Topografia aplicada*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SOUZA, V. M.; MARTINS, C. A.; GALO, M. Controle de qualidade posicional de ortofotos geradas por RPAS utilizando a metodologia PEC-PCD. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 75, n. 4, p. 811-829, 2023.

TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K. *Fotogrametria digital*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. *Fotogrametria básica: introdução*. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2009. Disponível em: <https://www.fct.unesp.br>. Acesso em: 13 abr. 2026, às 11h36min.