**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA**
**DEPARTAMENTO DE CARTOGRAFIA**
**CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA**

**WALDSON LEMOS ARAUJO JUNIOR**

# INTEGRAÇÃO DE NUVEM DE PONTOS OBTIDAS COM UAS E SMARTPHONE PARA DOCUMENTAÇÃO 3D DE PATRIMÔNIO HISTÓRICO: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA - RECIFE/PE

RECIFE
2025

**WALDSON LEMOS ARAUJO JUNIOR**

# INTEGRAÇÃO DE NUVEM DE PONTOS OBTIDAS COM UAS E SMARTPHONE PARA DOCUMENTAÇÃO 3D DE PATRIMÔNIO HISTÓRICO: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA - RECIFE/PE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Cartográfica e Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e Agrimensura.

Orientador (a): Simone Sayuri Sato

RECIFE
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Araujo Junior, Waldosn Lemos .
Integração de nuvem de pontos obtidas com UAS e smartphone para documentação 3D de patrimônio histórico: Estudo de caso no casarão da Várzea - Recife/PE / Waldosn Lemos Araujo Junior. - Recife, 2025.
54 : il., tab.

Orientador(a): Simone Sayuri Sato
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Cartográfica e de Agrimensura - Bacharelado, 2025.
Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Fotogrametria. 2. UAS. 3. Smartphone. 4. Patrimônio histórico. 5. Modelagem 3D. I. Sato, Simone Sayuri. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

**WALDSON LEMOS ARAUJO JUNIOR**

# INTEGRAÇÃO DE NUVEM DE PONTOS OBTIDAS COM UAS E SMARTPHONE PARA DOCUMENTAÇÃO 3D DE PATRIMÔNIO HISTÓRICO: ESTUDO DE CASO NO CASARÃO DA VÁRZEA - RECIFE/PE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e Agrimensura.

Aprovado em: 14/08/2025
Nota: 9,0

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br LEANDRO LUIZ SILVA DE FRANCA
Data: 03/09/2025 10:52:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Msc. Leandro Luiz Silva de França
(Examinador Externo)
Instituto Federal da Paraíba

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCAS GONZALES LIMA PEREIRA CALADO
Data: 03/09/2025 22:27:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Lucas Gonzales Lima Pereira Calado
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
gov.br SCHNEIDER ALMEIDA PAIVA
Data: 04/09/2025 03:38:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Msc. Schneider Almeida Paiva
Universidade Federal de Pernambuco
(Examinador Externo)

Documento assinado digitalmente
gov.br SIMONE SAYURI SATO
Data: 01/09/2025 21:55:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Simone Sayuri Sato (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

**AGRADECIMENTOS**

Gostaria de começar agradecendo aos meus pais, Ana Lucia e Waldson Lemos, sem os quais eu nunca estaria aqui. Eles me ensinaram a nunca desistir, nunca pegar o caminho mais fácil, a entender que coisas ruins acontecem com qualquer um, mas elas não definem quem somos. Aos meus irmãos, Maria Vitória e Julio Cezar. Estiveram ao meu lado o tempo todo, dividimos os melhores e os piores momentos da vida. Nesse parágrafo falo das quatro pessoas que mais amo.

Agradeço também à professora Dr.ª Simone Sayuri Sato, Durante grande parte do tempo que estive no curso ela me ajudou e orientou, não apenas nesta monografia, mas como profissional e pessoa.

E por último a empresa Pix4D, devido a seu interesse pelo desenvolvimento da ciência, contribuíram para realização desta monografia, disponibilizaram de forma gratuita a ferramenta Pix4Dmatic por 30 dias. Esta ferramenta foi imprescindível para a elaboração deste estudo.

**RESUMO**

Este trabalho apresenta uma metodologia que pode ser aplicada para documentação tridimensional de patrimônio histórico a partir da integração de nuvens de pontos obtidas por Unmanned Aircraft System (UAS) com sistema GNSS PPK e por smartphone, utilizando o aplicativo Pix4Dcatch. O estudo foi conduzido no Casarão da Várzea, Recife–PE, imóvel de relevância histórico-cultural situado em área urbana com restrições de acesso e interferências visuais (árvores de grande porte) quando considerado o levantamento aéreo. A metodologia compreendeu o uso de uma nuvem de pontos 3D previamente levantada usando plataforma de UAS (Phantom 4 Advanced) e complementada por meio da fotogrametria terrestre, com captura de dados usando o smartphone. O processamento individual das nuvens em Pix4Dmatic e a posterior integração em um mesmo sistema de referência (SIRGAS 2000, UTM fuso 25S), complementa a metodologia proposta. A avaliação da acurácia foi realizada por meio de comparação das coordenadas de pontos de verificação medidos em campo com as extraídas da nuvem integrada, resultando em Erro Quadrático Médio (RMSE) global de 0,009 m. Os resultados demonstram que a abordagem híbrida de levantamentos (aéreo e terrestre) usando soluções comerciais de baixo custo, amplia a completude e o nível de detalhe do modelo 3D, mantendo precisão compatível com levantamentos de alta qualidade para fins de documentação de patrimônio histórico. A metodologia mostrou-se viável, econômica e replicável em diferentes contextos urbanos, contribuindo para a preservação e gestão de bens culturais.

Palavras-chave: Fotogrametria; UAS; Smartphone; Patrimônio histórico; Modelagem 3D.

**ABSTRACT**

This paper presents a methodology that can be applied to the three-dimensional documentation of historical heritage, based on the integration of point clouds obtained by Unmanned Aircraft System (UAS) with GNSS PPK system and by smartphone, using the Pix4Dcatch application. The study was carried out at Casarão da Várzea, Recife-PE, a building of historical and cultural importance located in an urban area with access restrictions and visual interference (large trees) when considering aerial surveys. The methodology involved using a 3D point cloud previously surveyed using a UAV platform (Phantom 4 Advanced) and complementing it with terrestrial photogrammetry, capturing additional data using a smartphone. Individual processing of the clouds in Pix4Dmatic and subsequent integration into the same reference system (SIRGAS2000, UTM zone 25S) complements the proposed methodology. Accuracy was assessed by comparing the coordinates of checkpoints measured in the field with those extracted from the integrated cloud, resulting in a global root mean square error (RMSE) of 0.009 m. The results show that the hybrid approach of surveys (aerial and terrestrial) using low-cost commercial solutions increases the completeness and level of detail of the 3D model, while maintaining accuracy compatible with high-quality surveys for the purposes of documenting historical heritage. The methodology proved to be viable, economical and replicable in different urban contexts, contributing to the preservation and management of cultural assets.

**Keywords:** Photogrammetry; UAV; Smartphone; Historical heritage; 3D modeling.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ATPs** Aerial Triangulation Points

**CPs** Control Points

**ET-ADGV Defesa F Ter** Especificação Técnica Para Aquisição De Dados Geoespaciais Vetoriais De Defesa Da Força Terrestre

**GCPs** Ground Control Points

**GNSS** Global Navigation Satellite System

**ITPs** Image Tie Points

**LiDAR** Light Detection and Ranging

**mITPs** Modified Image Tie Points

**PPK** Post-Processing Kinematic

**SfM** Structure from Motion

**SIFT** Scale-Invariant Feature Transform

**SURF** Speeded Up Robust Features

**UAS** Unmanned Aircraft System

# LISTA DE IMAGENS

Figura 1 - Casarão da Várzea. Fonte: Jornal do Commercio (2014)..... 22
Figura 2 - Mapa de localização - Casarão da Várzea. Fonte: Autor (2025)..... 22
Figura 3 - Fluxograma de Processamento - Linha de trabalho. Fonte: Autor (2025).....24
Figura 4 - mITP UAS. Fonte: Autor (2025)..... 25
Figura 5 - mITP smartphone. Fonte: Autor (2025).....25
Figura 6 - Mapa de correspondência. Fonte: Autor (2025)..... 26
Figura 7 - Pré-alinhamento das nuvens de ponto. Fonte: Autor (2025).....27
Figura 8- Alinhamento das nuvens de pontos. Fonte: Autor (2025).....28
Figura 9 - Malha tridimensional. Fonte: Autor (2025)..... 28
Figura 10 - Detalhamento da malha. Fonte: Autor (2025).....29
Figura 11 - ITP. Fonte: Autor (2025)..... 30
Figura 12 - mITP. Fonte: Autor (2025).....30
Figura 13 - Medida da frente na estrutura da malha 3D no ambiente Pix4Dmatic. Fonte: Autor (2025)..... 33
Figura 14 - Medida do batente na estrutura da malha 3D no ambiente Pix4Dmatic. Fonte: Autor (2025).....33
Figura 15 - Medida da frente da estrutura in loco. Fonte: Autor (2025)..... 33
Figura 16 - Medida do batente da estrutura in loco. Fonte: Autor (2025).....34

**SUMÁRIO**

**1. INTRODUÇÃO**..... 10
1.1 Justificativas..... 11
1.2. Problema da pesquisa..... 12
1.3. Hipótese..... 12
1.4. Objetivos..... 13
**2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**..... 14
2.1 Fotogrametria..... 14
2.2 Fotogrametria Terrestre e a Curta Distância..... 14
2.2.1 Fotogrametria Terrestre..... 14
2.2.2 Fotogrametria de curta distância..... 15
2.3 Fotogrametria Structure from motion (SfM)..... 15
2.4 Aquisição de dados com drone e smartphone..... 16
2.4.1 Aquisição de dados com drone..... 16
2.4.2 Aquisição de dados com Smartphones em projetos Fotogramétricos..... 16
2.5 Processamento de dados fotogramétricos..... 16
2.6 Qualidade..... 19
**3 METODOLOGIA**..... 20
3.1 Área de Estudo..... 20
3.2 Materiais utilizados..... 21
3.3 Aquisição de Dados..... 22
3.3.1 Aquisição de Dados com UAS..... 22
3.3.2 Aquisição de Dados Terrestre com Smartphone..... 22
3.4 Processamento e Integração..... 23
**4 DISCUSSÕES E RESULTADOS**..... 25
**5 CONCLUSÃO**..... 34
**REFERÊNCIAS**..... 35
**ANEXO A - RELATÓRIO PEC-PCD DADOS DO VOO PPK**..... 41
**APÊNDICE A - ARTIGO ELABORADO DURANTE O TCC**..... 49

# 1. INTRODUÇÃO

Através dos séculos foram muitos os filósofos e historiadores que defenderam a preservação do conhecimento humano para futuras gerações. Na obra, Histórias (2001), Heródoto faz inúmeras menções à importância de se entender o passado com o intuito de preservar e difundir o conhecimento de forma ampla. Neste contexto, a preservação do patrimônio histórico por sua relevância pode ser destacada nesta defesa.

De acordo com Dahl, Ed (2016), o campo de estudo cartográfico ainda se encontra subvalorizado, se tratando quase de um conhecimento de nicho. Para evitar que afirmações como esta continuem a surgir com o passar dos anos, é preciso alinhar o conhecimento existente com as novas formas de divulgação da era moderna.

Preservar e difundir acervos históricos exige o alinhamento do conhecimento existente com as novas formas de divulgação, garantindo assim que esse patrimônio cultural seja acessível a um público geral, fazendo com que a Cartografia seja reconhecida não só como ciência exata, mas como arte, como Sunagawa (2015), em seu artigo, associa períodos históricos e as diversas representações cartográficas através das história.

A evolução tecnológica é uma das maiores constantes da humanidade na atualidade. Segundo Moore, Gordon, em 1998 que o poder computacional mais que dobra a cada ano. Na atual conjuntura o avanço tecnológico tornou as ciências cartográficas uma pioneira nesse quesito fazendo jus às afirmações de Moore, favorecendo a incorporação de novas ferramentas nos processos de registro e análise espacial. Em particular, os smartphones atuais, equipados com câmeras de alta resolução e sensores adicionais, mostram-se capazes de fornecer imagens de qualidade suficiente para aplicações fotogramétricas em pequena escala (SAIF, 2022). Essa tendência aponta para a possibilidade de democratização de técnicas anteriormente restritas a equipamentos mais caros e especializados.

A utilização da fotogrametria por meio de smartphones foi abordada por Döş, Yiğit e Uysal (2021) como uma alternativa viável para a documentação de monumentos históricos. O estudo destaca as vantagens dessa tecnologia ao possibilitar a geração de modelos tridimensionais a partir de imagens capturadas por câmeras não métricas, como as presentes em dispositivos móveis (smartphones). Os produtos derivados dessas imagens são amplamente empregados na renderização baseada em imagem, permitindo visualizações virtuais imersivas, bem como na modelagem geométrica, que proporciona representações precisas e detalhadas de elementos arquitetônicos, terrenos, cidades e documentos de patrimônio cultural.

Adicionalmente, um dos aspectos relevantes dessa abordagem é a democratização da aquisição e modelagem 3D, tornando-se acessível a usuários não especializados, incluindo profissionais do patrimônio cultural. O artigo também enfatiza as vantagens da obtenção de dados de nuvem de pontos por métodos fotogramétricos em comparação ao laser scanner, destacando fatores como menor custo, maior acessibilidade a áreas internas de edificações e maior portabilidade dos equipamentos.

O uso de smartphones tem sido progressivamente adotado em levantamentos fotogramétricos de curta distância. No presente trabalho, objetiva-se explorar essa tecnologia para a aquisição de imagens e nuvens de pontos tridimensionais de áreas parcialmente obscurecidas por vegetação, com o intuito de subsidiar o mapeamento aéreo de uma área patrimonial pública, atualmente em fase de planejamento para recuperação do imóvel.

Entre os principais desafios a serem enfrentados, destaca-se a necessidade de avaliar a eficiência da metodologia proposta, especialmente quanto à integração dos dados obtidos por meio de smartphones com aqueles oriundos de levantamentos aerofotogramétricos realizados com veículos aéreos não tripulados (UASs). Essa preocupação corrobora com o estudo conduzido por Rapuca *et al.,* (2023), que investigou a aplicabilidade de smartphones na reconstrução tridimensional de monumentos históricos e constatou limitações significativas, como a baixa sobreposição entre imagens e a necessidade de aprimorar captura manual, que comprometeu a qualidade dos modelos gerados.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da integração de nuvens de pontos obtidas por UAS com sistema GNSS PPK e por smartphone, utilizando o aplicativo Pix4Dcatch, para documentação tridimensional de patrimônio histórico. Nesse sentido, destaca-se o uso do Pix4Dmatic, conforme empregado por Tamimi (2023) em pesquisa publicada nos The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Nessa investigação, os dados capturados foram processados no referido software, resultando em conjuntos de nuvens de pontos utilizados como base para análises subsequentes.

Dessa forma, busca-se contribuir para o desenvolvimento de metodologias acessíveis, precisas e replicáveis para a documentação e preservação do patrimônio histórico, aliando rigor técnico e inovação tecnológica.

## 1.1 Justificativas

A documentação de edificações históricas é fundamental para a preservação da memória cultural, servindo como base para ações de conservação, restauração e gestão patrimonial. No contexto urbano, especialmente em áreas de interesse histórico, a produção de registros tridimensionais detalhados pode auxiliar na tomada de decisões e na elaboração de projetos de intervenção, garantindo que as características arquitetônicas originais sejam mantidas e respeitadas.

O avanço das tecnologias móveis e a crescente acessibilidade a ferramentas de fotogrametria têm possibilitado novas abordagens para a documentação de bens patrimoniais. Entre essas inovações, destaca-se o uso de smartphones como dispositivos alternativos para levantamentos fotogramétricos que permitem a obtenção de modelos tridimensionais precisos e acurados a partir de imagens capturadas em diferentes perspectivas. Dada a sua portabilidade, baixo custo e difusão ampla, esses dispositivos surgem como solução promissora, sobretudo em áreas de difícil acesso ou parcialmente oclusas, onde drones podem enfrentar limitações operacionais, como vegetação densa ou estruturas artificiais.

A integração de dados provenientes de UASs e dispositivos móveis, como smartphones, representa uma solução promissora, pois combina a abrangência da visão aérea com o detalhamento da captura terrestre.

O Casarão da Várzea, situado no bairro homônimo, em Recife–PE, é um bem histórico de reconhecida relevância cultural e encontra-se inserido em zona de preservação definida pelo Plano Diretor do Município (Lei nº 17.511/2008). Sua localização e características construtivas impõem desafios à documentação fotogramétrica, devido à presença de vegetação, edificações vizinhas e limitações de acesso. Nesse contexto, a aplicação de uma abordagem híbrida, integrando nuvens de pontos obtidas por UAS com sistema GNSS PPK e por smartphone permite avaliar a viabilidade técnica dessa metodologia para superar obstáculos operacionais e ampliar a completude dos modelos gerados. No entanto, ainda é necessário avaliar a precisão, a compatibilidade dos dados e a qualidade da nuvem de pontos usando essa técnica híbrida.

A relevância deste estudo está em demonstrar que, por meio da integração de tecnologias acessíveis e precisas, é possível obter produtos cartográficos de alta qualidade para a documentação do patrimônio histórico. Além de contribuir para a preservação de bens culturais, a metodologia proposta apresenta potencial de replicabilidade em diferentes contextos urbanos. Ademais, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de investigar soluções acessíveis e eficientes no campo das geociências aplicadas ao patrimônio, ampliando o repertório técnico-científico sobre o tema.

### 1.2. Problema da pesquisa

Como integrar nuvens de pontos obtidas por UAS com sistema GNSS PPK e por smartphone, diante das limitações operacionais enfrentadas por UASs em áreas parcialmente oclusas de forma adequada para a documentação tridimensional de edificações históricas localizadas em áreas urbanas com restrições físicas e visuais?

## 1.3. Hipótese

A integração de nuvens de pontos obtidas por UAS com sistema GNSS PPK e por smartphone, processadas em um mesmo sistema de referência, permite gerar modelos tridimensionais completos e precisos, com acurácia métrica, mesmo em cenários urbanos com limitações de acesso e visibilidade.

## 1.4. Objetivos

Objetivo Geral é avaliar a viabilidade do uso de smartphones na aquisição de imagens para geração e integração de nuvens de pontos 3D, utilizando o aplicativo *Pix4Dcatch*, para documentação tridimensional de patrimônio histórico, por meio de um estudo de caso no Casarão da Várzea, Recife–PE.

Para isso, os objetivos específicos foram divididos em:

a) Executar a aquisição terrestre de imagens com smartphones, via *Pix4Dcatch*, contemplando áreas oclusas do levantamento com UAS;
b) Processar os conjuntos de dados, integrando os conjuntos de nuvens de pontos oriundos de diferentes tipos de aquisição de imagens.
c) Desenvolver uma metodologia de integração de nuvens de pontos obtidas por smartphone e por drone, utilizando o software Pix4Dmatic.
d) Verificar a qualidade posicional da nuvem integrada.
e) Verificar a viabilidade do uso do método híbrido de aquisição de dados 3D na documentação de edificações históricas

# 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Fotogrametria

Fotogrametria foi definida pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 1980* como a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio do registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante registrada, bem como outros fenômenos. Como o nome sugere, a ciência originalmente consistia na análise de fotografias, contudo o uso de câmeras analógicas foi amplamente substituído por sensores digitais (Wolf *et al*., 2014).

Em Shenk (2005), a fotogrametria é definida como a arte e ciência de extrair medidas e informações físicas sobre objetos ou superfícies tridimensionais sem contato físico. Em artigo escrito para o International Journal of Computer Vision, Shan (2023) elabora sobre a variedade de tecnologias associadas à fotogrametria, desde a utilização de UASs ao mais recentes usos de smartphones, alegando que essas inovações estão tornando o estudo fotogramétrico algo mais democrático e popular.

## 2.2 Fotogrametria Terrestre e a Curta Distância

### 2.2.1 Fotogrametria Terrestre

A Fotogrametria terrestre é o ramo da fotogrametria que utiliza imagens obtidas com câmeras localizadas na superfície terrestre, as quais podem estar acopladas em tripés, bastões ou suspensas em torres ou escadas ou em outras plataformas (Pitombeiras e Reis Filho. 2020). Pode ser estática, fotografias de objetos parados, ou dinâmica, fotografias de objetos em movimento, (Wolf *et al*., 2014).

Continuando, a contextualização, o autor, destaca que a fotogrametria terrestre, se limita a áreas pequenas e situações especiais, e nas aplicações topográficas são citadas o mapeamento de: desfiladeiros profundos ou montanhas escarpadas que são difíceis de mapear com fotografias aéreas. Também são incluídos os mapeamentos de locais de construção, áreas de escavação, caixas de empréstimo, estoques de materiais. Para as aplicações não topográficas, são citadas: indústria aeronáutica, naval, telecomunicações, robótica, nuclear e, nas áreas da silvicultura, arqueologia, antropologia, arquitetura, geologia, engenharia, mineração, ciências forenses, oceanografia, medicina, odontologia e muitas outras. No campo da medicina, a fotogrametria de raios X, que traz uso de vantajoso na medição de tamanhos e formas de partes do corpo, registro de crescimento de tumores, estudo de desenvolvimento de fetos, localização de objetos estranhos no corpo, entre outros.

Como exemplo, de fotogrametria de curta distância é apresentada a determinação de dimensões de uma hélice de um navio em que o tamanho e o formato da hélice foram determinados para que uma peça substituta pudesse ser fabricada com as dimensões corretas.

### 2.2.2 Fotogrametria de curta distância

A fotogrametria de curta distância e a varredura laser terrestre vem sendo utilizada como ferramenta de mapeamento para descrever a morfologia de taludes rochosos naturais e artificiais em 3D (Sturzenegger, 2009). O termo "curta distância" refere-se a uma distância câmara/scanner até o objeto de até cerca de 300 metros (Wolf *et al*., 2014).

A fotogrametria de curta distância, altamente implementada na arqueologia, foi citada em 1994 por Utimura com o intuito de monitorar as diferentes etapas de trabalho e momentos de achados arqueológicos, com auxílio de câmeras não métricas e vídeos.

## 2.3 Fotogrametria Structure from motion (SfM)

Para confecção dos modelos tridimensionais o método Structure from motion (SfM) é altamente difundido. Usado para estimar modelos 3D a partir de sequências de imagens 2D sobrepostas. Ganhou popularidade na última década devido à sua capacidade de lidar com conjuntos de imagens desordenadas e heterogêneas sem conhecimento prévio dos parâmetros da câmera (Westoby, 2012).

A fotogrametria SfM, algoritmo responsável por duas tarefas: correlacionar estruturas em imagem recriando-as em 3D e medir o movimento da câmera neste espaço (Oliensis, 2005), visando diminuir os custos de produção e operação sem perder a precisão já estabelecida, no presente momento esse campo é majoritariamente composto por UAS. Com um sobrevoo abaixo das nuvens e uma aquisição de imagens aéreas com maior detalhamento da área, baixo custo de operação e alta produtividade (Menezes, 2019). A evolução natural para levantamentos fotogramétricos de baixa escala é a utilização de smartphones para tomada de cenas com alto nível de detalhe, entretanto baixo alcance vertical.

A complexidade de interfaces,bem como a falta de material didático para usuários menos familiarizados com tecnologia e a sobrecarga de informações podem dificultar a plena exploração dos recursos oferecidos. Nesse contexto, o método SfM apresenta-se como uma ferramenta promissora para a reconstrução tridimensional de objetos e ambientes a partir de sequências de imagens capturadas por esses dispositivos móveis. Contudo, a qualidade das imagens obtidas com smartphones é frequentemente afetada por limitações de sensor, óptica e estabilização, impondo desafios significativos à aplicação eficaz deste processo.

## 2.4 Aquisição de dados com drone e smartphone

### 2.4.1 Aquisição de dados com UAS

O modelo mais usado para aquisição de dados fotogramétricos é através de UASs, ou drones. Foi apontado por Bryan Alemán em 2021, durante os meses de maio a novembro, no ano de 2017 foram utilizados UASs para coletar dados de crescimento em plantações de milho, avaliando sua mudança ao decorrer do tempo.

A captura de imagens com UASs acaba sofrendo com o acesso a localidades para implementação de Pontos de Controle e checagem. Neste cenário Dinkov (2023) disserta sobre a adição de um receptor GNSS - *Post-Processing Kinematic* (PPK) contornando essas limitações, fornecendo precisão de nível centimétrico para levantamentos de superfície terrestre sem a necessidade de Pontos de controle terrestres, já que, devido ao receptor acoplado à aeronave, os pontos que serão utilizados no processamento são coletados em conjunto com as images.

### 2.4.2 Aquisição de dados com Smartphones em projetos Fotogramétricos

Com base na análise de artigos científicos recentes, a incorporação de smartphones na fotogrametria terrestre representa uma evolução tecnológica significativa, transformando dispositivos móveis em ferramentas viáveis para a captura de dados tridimensionais. Estudos demonstram que smartphones modernos possuem câmeras com resoluções superiores a 64 MP, múltiplas lentes (wide-angle, teleobjetiva), sensores de profundidade (LiDAR) e estabilização óptica avançada, aliados a aplicativos especializados (Polycam, Magiscan, Qlone, Pix4D) que implementam algoritmos de SfM para geração de modelos 3D e ortomosaicos em fluxos quase instantâneos segundo Patonis, em 2024.

No tocante à problemática da sobreposição de imagens, uma solução apontada na literatura é a utilização do aplicativo *Pix4Dcatch*, desenvolvido pela empresa Pix4D Ltd., conforme demonstrado por Süleymanoğlu *et al*., (2023). Tal ferramenta possibilita maior controle espacial no momento da captura, otimizando a coleta de dados e contribuindo para a geração de produtos fotogramétricos com melhor acurácia.

## 2.5 Processamento de dados fotogramétricos

O processamento dos dados fotogramétricos envolve um fluxo de etapas que, conforme a American Society of Photogrammetry (ASP, 1980), segue uma cronologia bem definida. As etapas e suas definições, cruciais para a acurácia do processo, iniciam-se com a

definição do projeto, seguida pela configuração dos referenciais geodésicos e sistemas de coordenadas. Em projetos georreferenciados, a especificação precisa do sistema de referência geodésico vertical e horizontal é indispensável para garantir a integridade posicional e altimétrica dos dados em levantamentos de alta precisão.

Após a definição inicial, o processamento, como visto em Xie (2022) consiste inicialmente na inserção das imagens capturadas que são carregadas no software. O primeiro estágio, conforme Gonçalves (2020), consiste em "Detecção de Feições" e "correspondência de feições e validação geométrica" As imagens são carregadas no software, que começa com a detecção do ponto-chave. Os pontos-chave são recursos invariantes em escala filtrados pela precisão da localização e pela sensibilidade ao ruído (Lowe, 2004). Como esses pontos-chave são bem identificados em todas as imagens, eles são combinados com o respectivo identificador. Esses pontos são denominados tie points.

Em seguida, os tie points identificados, pontos correspondentes em múltiplas fotos, permitem a criação de uma nuvem de pontos esparsa. Sendo crucial para o alinhamento interno e externo das câmeras, que define suas posições e orientações relativas. Entrando na etapa de inserção de pontos de controle e checagem é georreferenciando o modelo e avaliando sua precisão. Nesta etapa, aplica-se o "Bundle Block Adjustment (SfM)", que calcula os parâmetros da câmera interna e os parâmetros de orientação externa de cada imagem no bloco de imagens. O realinhamento otimizado, visa melhorar os parâmetros da câmera de orientação encontrados anteriormente pelo procedimento BBA. Nesse procedimento, o erro de reprojeção quantifica a diferença entre os pontos na nuvem esparsa e os mesmos pontos reprojetados usando os parâmetros da câmera (Nguyen *et al*., 2012). O erro de reprojeção é associado a cada ponto, permitindo a remoção dos pontos com o maior erro de reprojeção. No entanto, essa ação isolada não altera o erro porque os parâmetros calculados no segundo estágio são ajustados para a nuvem esparsa não filtrada. Portanto, o processo deve ser otimizado para os pontos da nuvem esparsa filtrada. No "processo de georreferenciamento", se faz uma transformação 3D entre o sistema do modelo e o sistema do objeto que retorna sete parâmetros (três para rotação, três para translações e um fator de escala). A nuvem densa de pontos é criada aplicando um dos algoritmos Multi-View Stereo (MVS) para calcular mapas de profundidade a partir de equações de colinearidade ou projetivas (Remondino *et al*., 2013). Por fim, a criação de mesh transforma a nuvem densa em uma superfície 3D, gerando o modelo final.

De acordo Xie (2022) com a Orientação Externa se estabelece a posição precisa da câmera e sua atitude angular (rotação) no espaço tridimensional do objeto no momento da aquisição da imagem. Na Orientação Interna temos características geométricas intrínsecas da câmera, como sua distância focal e as distorções da lente. Assim, em conjunto, ambas ditam diretamente a fidelidade geométrica do modelo 3D final.

Na fotogrametria, a precisão e a confiabilidade dos modelos 3D, acima citado, dependem fundamentalmente da qualidade dos pontos utilizados. Pontos fotogramétricos,

capturados e processados a partir das imagens, servem de parâmetro para a reconstrução de terrenos e objetos. Divididos em Pontos de controle, Pontos de checagem e Tie-Points, detalhados nos próximos parágrafos.

Para georreferenciar os dados, já orientados, Zhong (2025), indica a adição de pontos no terreno com coordenadas precisamente conhecidas, os Pontos de Controle (GCPs), utilizados no modelo 3D, vinculando-o a um sistema de coordenadas absoluto e garantindo sua acurácia espacial. Já os Pontos de Checagem (CPs) são pontos com coordenadas 3D conhecidas que, diferentemente dos GCPs, não são empregados no processo de cálculo do modelo, mas servem para avaliar de forma independente a acurácia absoluta do produto fotogramétrico final, atuando como uma medida essencial de controle de qualidade. Em termos gerais, "tie points" (pontos de amarração) são pontos correspondentes em imagens sobrepostas, que são usados para calcular a posição relativa das cameras e criar modelos 3D. Eles podem ser pontos naturais, como cantos de edifícios ou sinais de trânsito, ou podem ser marcadores artificiais colocados no local. O software de fotogrametria identifica e alinha esses pontos para construir um modelo 3D da área e alinhar imagens ou nuvens de pontos, permitindo a criação de modelos 3D precisos.

Para alinhar as imagens obtidas, após a execução dos processos de orientação interior, os tie-points automáticos (ATPs) são gerados por algoritmos como Scale-Invariant Feature Transform (SIFT - Detecção de extremos no espaço de escala) ou Speeded Up Robust Features (SURF - uso de imagens integrais para filtragem rápida) que identificam características texturais únicas (como bordas ou padrões) em imagens sobrepostas, sendo eficientes mas suscetíveis a erros em cenários complexos (e.g., texturas repetitivas ou baixa iluminação) (Mousavi, *et al.*, 2022). Em contraste, os Manuais Intersection Tie Points (mITPs) representam uma abordagem híbrida: partem de intersection tie points (ITPs) automáticos, gerados por interseções de feições lineares, como quinas de edifícios, posteriormente refinados pelo operador de forma manual. Esse processo confere maior influência na calibração do modelo, pois os mITPs incorporam controle humano sobre pontos estruturalmente críticos, como janelas, portas ou detalhes arquitetônicos, diminuindo a ocorrência de distorções em projetos de patrimônio cultural, ambientes internos ou oclusos pela vegetação. A eficácia do mITP foi validada em estudos como o de Rapuca *et al*., (2023), que demonstrou ganhos na precisão dimensional em modelos 3D de monumentos históricos quando comparados a métodos totalmente automatizados, devido ao refinamento de pontos-chave em áreas de baixa textura ou oclusão.

Um dos produtos gerados a partir de levantamento fotogramétrico é o mesh ou malha descrita como a sobreposição das imagens sobre a nuvem densa de pontos gerando uma superfície com forma aproximada ao real objeto ou terreno (Forootan, Ehsan, 2021). Resultando em um objeto digital tridimensional, no qual é possível extrair medidas e observações quanto ao estado de conservação do objeto de estudo.

## 2.6 Qualidade

Para um definição de qualidade tomamos a acurácia, que denota a proximidade de uma medição individual ou da média de um conjunto de medições ao valor verdadeiro ou aceito como referência. A precisão descreve o grau de repetibilidade ou consistência das medições. Um sistema é preciso quando medições repetidas fornecem resultados muito próximos entre si, independentemente de estarem corretos ou não, como salienta Taylor (1994).

Com a finalidade de categorizar a qualidade de um produto cartográfico, seja ele digital ou não, foram elaboradas pelo Exército Brasileiro, em 06 de maio de 2016 as tabelas de Padrão de Exatidão Cartográfica. De acordo com o erro espacial do material avaliado, e de sua escala e tipo, receberá uma classe variando de "A" a "D", de acordo com a escala do produto. Em produtos Digitais como Modelo Digital de terreno a Especificação Técnica Para Aquisição De Dados Geoespaciais Vetoriais De Defesa Da Força Terrestre (ET-ADGV Defesa F Ter, 2016) (Quadro 1 e 2) . O valor utilizado para essa classificação é o RMS (Root Mean Square), ou valor quadrático médio, dos erros ou RMSE (Fórmula 1) métrica essencial na avaliação da precisão espacial de modelos digitais e processos de restituição. Segundo Wolf em 2014, o erro RMSE é amplamente utilizado como indicador da qualidade de ajuste em pontos de controle e verificação, refletindo a acurácia geométrica de produtos fotogramétricos. Essa medida é fundamental para validação de ortorretificação, nuvens de pontos e modelos 3D gerados a partir de imagens.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - p_i)^2}$$

Fórmula 1 – Erro Quadrático Médio (RMSE)

| PEC -PCD (3) | **1:1.000** | | **1:2.000** | | **1:5.000** | | **1:10.000** | | 1:25.000 | | 1:50.000 | | 1:100.000 | | 1:250.000 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) |
| A | 0,27 | 0,17 | 0,27 | 0,17 | 0,54 | 0,34 | 1,35 | 0,84 | 2,70 | 1,67 | 5,50 | 3,33 | 13,70 | 8,33 | 27,00 | 16,67 |
| B | 0,50 | 0,33 | 0,50 | 0,33 | 1,00 | 0,66 | 2,50 | 1,67 | 5,00 | 3,33 | 10,00 | 6,66 | 25,00 | 16,66 | 50,00 | 33,33 |
| C | 0,60 | 0,40 | 0,60 | 0,40 | 1,20 | 0,80 | 3,00 | 2,00 | 6,00 | 4,00 | 12,00 | 8,00 | 30,00 | 20,00 | 60,00 | 40,00 |
| D | 0,75 | 0,50 | 0,75 | 0,50 | 1,50 | 1,00 | 3,75 | 2,50 | 7,50 | 5,00 | 15,00 | 10,00 | 37,50 | 25,00 | 75,00 | 50,00 |

Quadro 1 – Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. Fonte: Exército Brasileiro ET-ADGV Defesa F Ter 2016

| PEC (1) | PEC - PCD | 1:1.000 | | 1:2.000 | | 1:5.000 | | 1:10.000 | | 1:25.000 | | 1:50.000 | | 1:100.000 | | 1:250.000 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) | PEC (m) | EP (m) |
| - | A[2] | 0,28 | 0,17 | 0,56 | 0,34 | 1,40 | 0,85 | 2,80 | 1,70 | 7,00 | 4,25 | 14,00 | 8,51 | 28,00 | 17,02 | 70,00 | 42,55 |
| A | B[1] | 0,50 | 0,30 | 1,00 | 0,60 | 2,50 | 1,50 | 5,00 | 3,00 | 12,50 | 7,50 | 25,00 | 15,00 | 50,00 | 30,00 | 125,00 | 75,00 |
| B | C[1] | 0,80 | 0,50 | 1,60 | 1,00 | 4,00 | 2,50 | 8,00 | 5,00 | 20,00 | 12,50 | 40,00 | 25,00 | 80,00 | 50,00 | 200,00 | 125,00 |
| C | D[1] | 1,00 | 0,60 | 2,00 | 1,20 | 5,00 | 3,00 | 10,00 | 6,00 | 25,00 | 15,00 | 50,00 | 30,00 | 100,00 | 60,00 | 250,00 | 150,00 |

Quadro 2 – Padrão de Exatidão Cartográfica Planimétrica para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. Fonte: Exército Brasileiro ET-ADGV Defesa F Ter 2016

# 3 METODOLOGIA

A partir da seleção da área de estudo, apresentada no subitem 3.1, os processos metodológicos foram planejados e conduzidos em quatro etapas principais: coleta de dados, processamento individual, integração das nuvens de pontos e avaliação da acurácia.

## 3.1 Área de Estudo

O presente estudo foi realizado no Casarão da Várzea, edificação de relevância histórica e arquitetônica localizada no bairro da Várzea, zona oeste do município do Recife–PE. Segundo o Plano Diretor do Recife (Prefeitura do Recife, 2019), a Várzea é caracterizada por um conjunto urbano que combina edificações históricas, áreas residenciais e espaços institucionais, inserindo-se em um contexto de importância cultural e ambiental para a cidade. O prédio histórico, funcionou o Hospital Magitot, localizado próximo a Praça Pinto Dâmaso, na Várzea, Zona Oeste do Recife. Local do primeiro hospital odontológico da América do Sul (Jornal do Commercio 2014). A edificação encontra-se em área estratégica, próxima a equipamentos urbanos e vias de circulação, mas também circundada por vegetação e há décadas abandonado. O imóvel está localizado na Rua Azeredo Coutinho, Várzea, foi indicado como Imóvel de Preservação e incluído no Setor de Preservação Ambiental (SPA) da Zona Especial de Preservação Histórico-Cultural da Praça da Várzea (ZEPH-07), de acordo com o Plano Diretor do Município do Recife (Lei nº 17.511/2008). A Figura 1, ilustra uma visão geral do estado atual do imóvel e a Figura 2, o mapa de localização. A área selecionada, é objeto de interesse de pesquisa do grupo de estudos do laboratório de fotogrametria (Lafoto), que vislumbra testar geotecnologias acessíveis para dar suporte para demais produtos cartográficos acerca destas instalações, consequentemente servir para um plano de conservação e reestruturação do edifício, e assim, preservar esse e demais patrimônios culturais espalhados pela cidade.

O estado de degradação, mau uso, e com presença de obstáculos naturais e artificiais, influenciam diretamente as estratégias de captura de imagens, e demanda metodologias que combinem diferentes ângulos de visada e formas de captura para garantir a completude do modelo tridimensional.

Figura 1 - Casarão da Várzea. Fonte: Jornal do Commercio (2014).

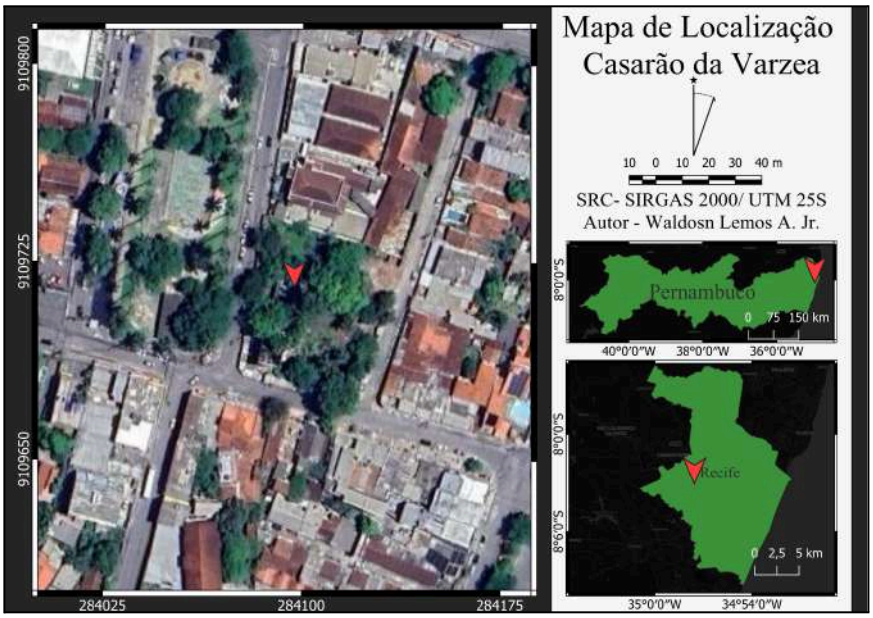



Figura 2: Mapa de localização  - Casarão da Várzea. Fonte: Autor (2025)

## 3.2 Materiais utilizados

Quanto aos materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados:

- Aparelho móvel (smartphone) Iphone 12 PRO;
- Computador tipo Desktop com as configurações:
    - 32 Gb de Ram DDR4
    - Placa de vídeo RTX 4050
    - Processador AMD Ryzen 9
    - Windows 11
- Nuvem de pontos obtida por UAS;
- Software comercial Pix4Dmatic da Pix4D;
- Trena.
- Drone DJI Phantom 4 Advanced com Kit PPK

## 3.3 Aquisição de Dados

### 3.3.1 Aquisição de Dados com UAS

Essa aquisição é proveniente de um voo com UAS equipado com tecnologia *Pos-Processing Kinematic* (PPK), a qual permite o cálculo pós processados das coordenadas centrais da câmera com base em correções das coordenadas pela estação de referência, utilizando sinais de múltiplas constelações GNSS (Yu, 2019). O voo foi planejado com altura de 45 m, resultando em GSD de 1,3 cm/pixel, sobreposição longitudinal de 85% e lateral de 80%. O sistema de referência geodésico adotado foi SIRGAS2000, projeção UTM fuso 25S. Foram adquiridas 151 imagens aéreas. A fonte deste trabalho, é o Trabalho de Conclusão de Curso elaborado pelo aluno João Paulo Santana Rodrigues (2025, em andamento).

Neste estudo, foi utilizada apenas a nuvem de pontos oriunda destes dados, cuja acurácia posicional apresentou um RMSE em X de 8,64 cm e Y de 6,91 cm e em Z (altimétrico) de 0,2710 m. Sendo enquadrado na categoria A, na planimetria e B na altimetria tanto nas tabelas de 2016 (Quadros 1 e 2) quanto as de 1984, vide dados de qualidade posicional no Anexo A.

### 3.3.2 Aquisição de Dados Terrestre com Smartphone

As imagens terrestres foram capturadas no dia 10 de dezembro de 2024, utilizando um iPhone 12Pro com aplicativo *Pix4Dcatch* (Pix4D Ltd.) que permitiu adquirir 392 registros automáticos fotográficos com sobreposição de aproximadamente 70 a 80% entre as imagens e entre as laterais, bem como o georreferenciamento das capturas por meio de coordenadas “georreferenciadas” associadas. O percurso foi planejado para a reconstrução tridimensional de uma porção do imóvel, parcialmente encoberta por vegetação.

### 3.4 Processamento e Integração

O processamento e a integração da nuvem de pontos, seguiu os passos conforme demonstrado no fluxograma apresentado na Figura 3.

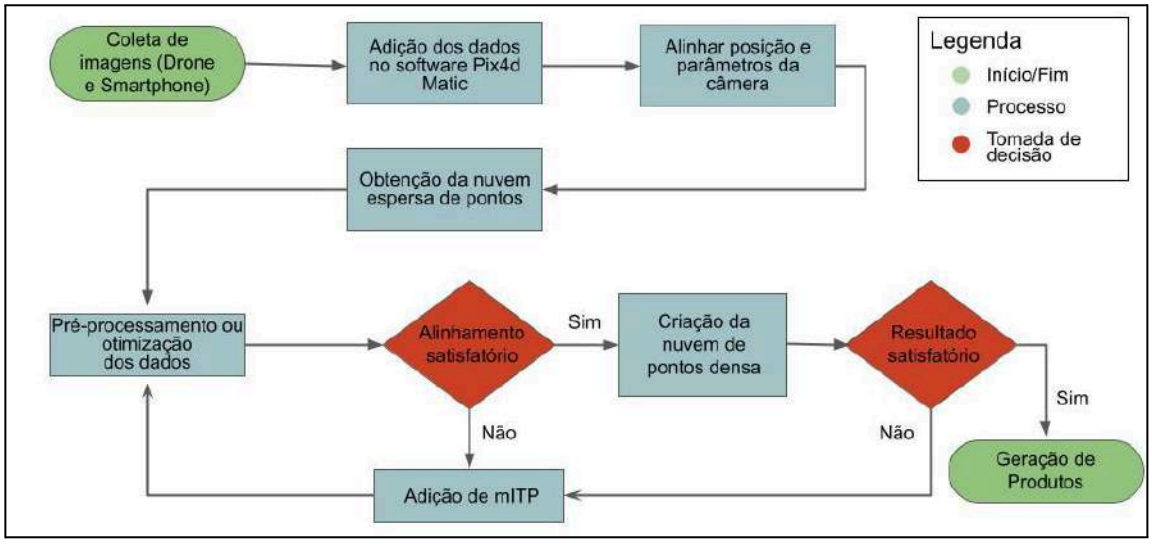



Figura 3: Fluxograma de Processamento - Linha de trabalho. Fonte: Autor (2025).

A adoção deste procedimento metodológico teve como base o artigo de Araújo Júnior (2025) que obteve resultados promissores com o software Pix4Dmatic no processamento de dados com smartphone em relação ao software Pix4Dmapper.

Os dois conjuntos de dados são adicionados no software Pix4Dmatic, para a fusão de diferentes fontes de nuvens de pontos oriundas de UAS e Smartphone, conforme visto em (Tamimi, 2023). Os dados da nuvem de pontos 3D adquirida com UAS foi tomada como referência no processamento, conforme visto Zoé Bessin, *et al.*, em 2023.

Para iniciar a integração entre os dois conjuntos de nuvem de pontos foi utilizada um método ICP (Iterative Closest Point), onde se observa uma região que possui uma vasta gama de geometrias reconhecíveis e aplica-se a medição de pontos de ligação entre as duas nuvens de pontos. Contudo, para este trabalho, utiliza-se a medição/adição de tie-points (pontos de ligação entre as imagens), cujo método é denominado Manual Intersection Tie Points (mITP) onde são definidos pontos de interseção que o operador observa e identifica, grupos de pixels únicos e textura de imagem, ou estruturas que podem ser encontradas nos dois conjuntos de dados, Smartphone e UAS. Ao identificar manualmente pelo menos duas feições lineares dentro de uma imagem, é possível alinhar as nuvens de pontos. Esses recursos lineares são simbolizados como segmentos de linha amarela nas imagens, Figura 5, e ajudam o usuário a

marcar algumas características das imagens, e que fornecem uma confirmação visual, de acordo com a empresa Pix4d,Ltd. Esses padrões foram reconhecidos em ambos os levantamentos, conforme exemplificados nas figuras 4 e 5.

Figura 4 - mITP UAS. Fonte: Autor (2025)

Figura 5 - mITP smartphone. Fonte: Autor (2025).

Quanto à verificação da unificação geométrica dos dois conjuntos de dados, esta é feita no ambiente do Pix4Dmatic, em caso de não alinhamento do trecho das nuvem de pontos a cada adição de mITP e execução da função de otimização do software Pix4Dmatic é adicionado um novo conjunto de mITPs até obter um alinhamento visual das dois conjuntos de nuvem de pontos.

Um outro elemento importante que deve ser obtido durante o processamento das imagens é o relatório de qualidade, nele, encontram-se algumas informações importantes do processamento. Entre elas são apresentados o mapa de correspondência (Figura 6), que

fornece as linhas de correspondência entre câmeras. A opacidade das linhas indica o número de pontos-chave 2D correspondentes entre as câmeras. Linhas quase transparentes indicam ligações de feixes perspectivos fracas (poucas medições entre imagens com pouca correspondência de pontos entre as imagens). Esta informação alerta o operador de que deve-se adicionar e medir manualmente mais pontos de amarração, como os mITPs mostrados anteriormente (Pix4D, Ltd).

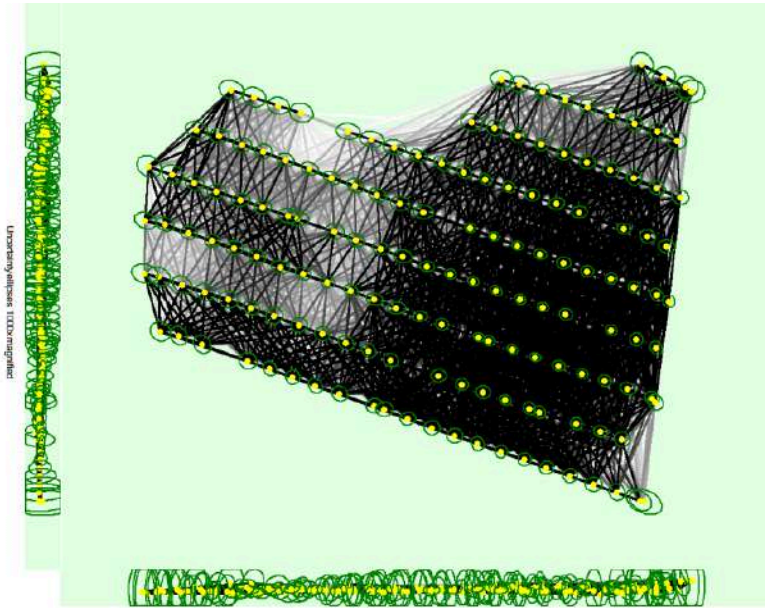


Figura 6 - Mapa de correspondência. Fonte: Autor (2025).

Ao analisar a integração dos dois conjuntos é o relatório de qualidade do processamento, procede-se de acordo com Forootan em 2021, utilizando a nuvem de pontos integrada, para gerar a malha 3D (mesh), que é uma representação geométrica de um objeto ou cena em três dimensões, composta por uma coleção de vértices, arestas e faces. Este procedimento, corresponde ao produto final da metodologia. A malha 3D consiste em uma estrutura de polígonos que simula com alta fidelidade a geometria e a textura do objeto real. Por fim, a malha é analisada para verificar a precisão, a qualidade e a fidelidade da representação digital, comparando-a com as dimensões e características do objeto original. São realizadas métricas aplicadas com medições no local comparadas com a representação digital.

## 4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

Na etapa de pré-processamento, verifica-se, conforme a Figura 4, os deslocamentos entre os dois conjuntos de nuvem de pontos. É possível observar (em vermelho) a posição da

nuvem de pontos obtida por levantamento tradicional com UAS, e a indicação, em azul, a obtida por smartphone.

As configurações utilizadas nesta etapa de processamento, foram:

- Algoritmo: Hardware acelerado
- Escala da imagem: 1/2
- Densidade: Alto
- Número mínimo de partidas: 3
- Multiescala: Ativado
- Filtro de ruído: Desativado
- Filtro do céu: Desativado
- Com reconhecimento de máscara: Desabilitado

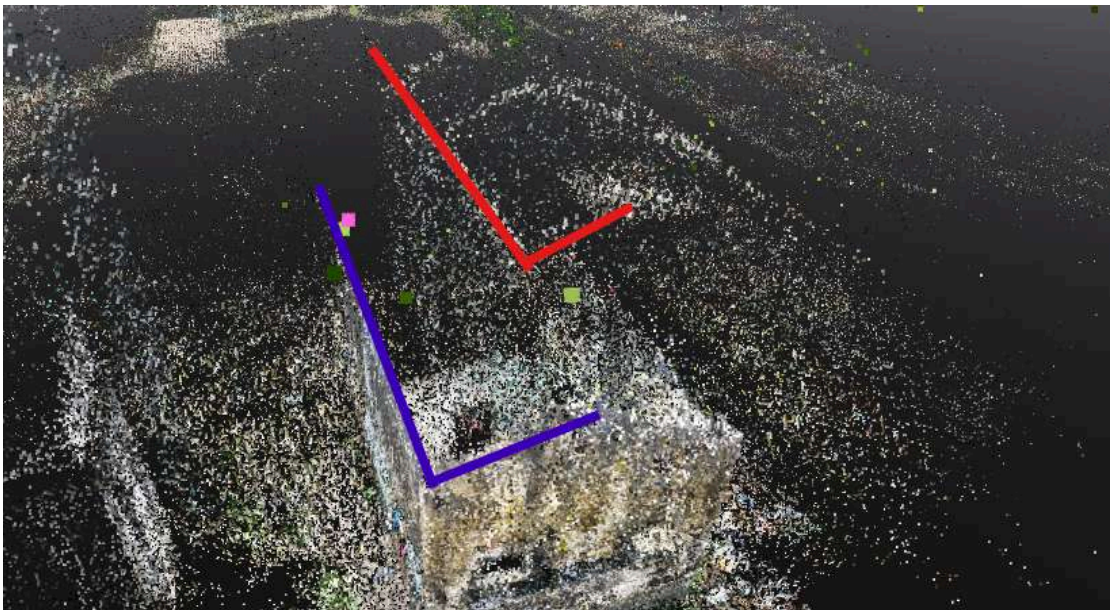


Figura 7 - Pré-alinhamento das nuvens de ponto. Fonte: Autor (2025).

Na Figura 8, percebe-se, após o alinhamento das nuvens de pontos a diferença de densidade de pontos entre UAS e smartphone, nota-se que, ao utilizar um levantamento terrestre com aparelho móvel, o detalhamento de estruturas é consideravelmente maior, logicamente pela curta distância de captura dos dados. Assim, pequenos objetos e detalhes presentes na lateral de estruturas, que seriam perdidos com um levantamento padrão, aparecem com definição e quase nenhuma distorção (Figura 8).

Figura 8- Alinhamento das nuvens de pontos. Fonte: Autor (2025).

O resultado do processamento tem-se como produto de apoio a malha tridimensional, ilustrada na Figura 9, tornando a estrutura visível, enquanto antes estaria oclusa por conta da vegetação. Com essa imagem torna-se evidente o deterioramento da estrutura, afetada pelo tempo e ação humana, como pichações, rachaduras e o crescimento de vegetação, dentro e fora das paredes.

Figura 9 - Malha tridimensional. Fonte: Autor (2025).

Pode-se visualizar pequenos objetos e detalhes presentes na lateral das janelas, que seriam omitidos com um levantamento padrão. Esses detalhes aparecem com definição e quase sem nenhuma distorção (Figura 10).

Figura 10 - Detalhamento da malha. Fonte: Autor (2025).

As dificuldades na primeira etapa de operação do processamento no Pix4Dmatic, foi o uso de ITPs (Intersection Tie Points), que se pensava que eram suficiente para unificar as duas nuvem e alinhá-las, entretanto, essa solução de ligação entre as nuvem de pontos, serviram apenas para as imagens do mesma do mesmo conjunto de dados, ou seja da mesma fonte de imagens (Figura 11). Dessa forma, não se conseguiu alinhar os dois conjuntos de nuvens de pontos de pontos, sendo a solução ideal incluir os mITPs (Figura 12), como descrito anteriormente, na metodologia.

Figura 11- ITP. Fonte: Autor (2025).

Figura 12- mITP. Fonte: Autor (2025).

Quanto à verificação da precisão atrelada à geometria da malha, foram feitas 17 medições lineares no resultado da nuvem integrada, conforme a Tabela 1. Como exemplo, tem-se as medidas realizadas na malha 3D, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14 e no local com trena (Figuras 15 e 16). Nestas duas medidas, constatou-se uma diferença de 0,017m na lateral da estrutura, onde o comprimento apontado no Pix4Dmatic foi de 4,554m enquanto a medida realizada com trena foi de 4,571m. Já a diferença de altura no batente foi de 0,006 m, sendo 0,085m no Pix4Dmatic e 0,091 no local. A métrica de verificação aplicada, baseia-se no cálculo do RMSE que foi de 0,009 m, com desvio padrão (Fórmula 2) de 0,010 m e erro máximo de 0,017 m. Entretanto, em futuras pesquisas, aconselha-se o uso de ferramentas mais precisas para a medição, como a estação total.

$$DP_{amostra} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Fórmula 2 – Desvio padrão da amostra

**Tabela 1 – Medidas e erros estruturais da malha**

| ID | Medida com Trena (m) | Medida no Digital (m) | Variação |
|---|---|---|---|
| 1 | 1,062 | 1,071 | -0,009 |
| 2 | 0,795 | 0,786 | 0,009 |
| 3 | 0,129 | 0,136 | -0,007 |
| 4 | 0,58 | 0,586 | -0,006 |
| 5 | 0,613 | 0,601 | 0,012 |
| 6 | 4,571 | 4,554 | 0,017 |
| 7 | 0,091 | 0,085 | 0,006 |
| 8 | 0,45 | 0,458 | 0,008 |
| 9 | 0,43 | 0,418 | -0,012 |
| 10 | 0,44 | 0,431 | -0,009 |
| 11 | 3,91 | 3,924 | 0,014 |
| 12 | 3,83 | 3,819 | -0,011 |
| 13 | 0,84 | 0,83 | -0,01 |
| 14 | 1,255 | 1,26 | 0,005 |
| 15 | 1,253 | 1,255 | 0,002 |
| 16 | 1,252 | 1,267 | 0,015 |
| 17 | 1,260 | 1,254 | -0,006 |
| | | RMSE | 0,009 |

| ID | Medida com Trena (m) | Medida no Digital (m) | Variação |
|---|---|---|---|
| | | DP | 0,010 |

Tabela 1 - Medidas e erros estruturais da malha. Fonte: Autor (2025)

Quanto às medições dos pontos de 14, 15 e 16 apresenta-se medidas e comparações com pouca alteração, devido a medida na lateral da construção, entre a janela e a extremidade da parede, evidenciando a pouca distorção neste objeto na transferência das informações, entre a medida de trena e as coordenadas no meio digital.

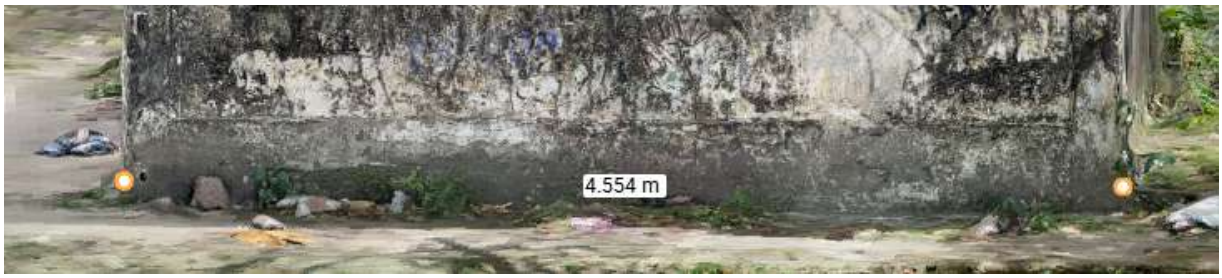



Figura 13 - Medida da frente na estrutura da malha 3D no ambiente Pix4Dmatic. Fonte: Autor (2025).

Figura 14 - Medida do batente na estrutura da malha 3D no ambiente Pix4Dmatic. Fonte: Autor (2025)

Figura 15 - Medida da frente da estrutura  in loco. Fonte: Autor (2025)

Figura 16 - Medida do batente da estrutura in loco. Fonte: Autor (2025).

A malha produzida a partir dos dados coletados conta com uma alta definição, como visto nas Figuras 9 e 10. Evidenciam-se detalhes muito bem ilustrados o estado de degradação do imóvel, com pintura (grafite, pichação ou pintura), marcas de tempo (vegetação entranhada em paredes, lodo, deterioração da estrutura). Com a minuciosa análise proporcionada pelo produto gerado, a documentação 3D, reduz o tempo necessário de idas a campo, para a tomada de algumas decisões envolvendo a preservação e restauração de estruturas, históricas ou não. Podendo dar acesso a informações detalhadas de forma digital, evitando deslocamento desnecessário. Esses resultados reforçam a viabilidade da metodologia híbrida para documentação de patrimônio histórico, com potencial de replicação em contextos urbanos com restrições físicas e visuais.

# 5 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a integração de nuvens de pontos obtidas por UAS com sistema GNSS PPK e por smartphone (*Pix4Dcatch*) é viável para documentação tridimensional de edificações históricas, garantindo precisão compatível com exigências normativas para escalas de até 1:1.000 na planimetria. Na altimetria, ainda faltam algumas investigações a serem realizadas.

A metodologia proposta permitiu ampliar a completude do modelo, incluindo detalhes não visíveis nas imagens aéreas, superando desafios comuns em áreas urbanas densas e encobertas por árvores. Os valores de RMSE obtidos confirmaram a hipótese inicial de que a integração dos dados manteria a precisão métrica adequada.

Quanto às limitações gerais de aplicação da metodologia, o uso de receptor GNSS interno do smartphone resultou em maiores diferenças entre os conjuntos de nuvem de pontos, também pode ser investigada a confiabilidade na componente vertical.

Quanto às limitações do uso de smartphones para aquisição de dados, tem-se as seguintes constatações: o modelo do aparelho móvel é importante, pois aparelhos sem giroscópio não são compatíveis com a solução *Pix4dCatch.* O número de imagens aumenta significativamente necessitando de software e hardware direcionados a esse processamento. Outro fator notável limitante é o de operação e segurança, que dependendo da localidade o operador pode acabar exposto a regiões insalubres ou com alta criminalidade. A limitação de segurança no local foi um dos fatores que reduziram a realização da completude do levantamento de toda a área e portanto da qualidade das imagens terrestres.

Em relação à literatura, Döş, Yiğit e Uysal (2021) apontam que a integração de dados aéreos e terrestres reduz falhas em superfícies verticais, especialmente em áreas urbanas densas, fenômeno igualmente verificado neste estudo. Além disso, a precisão alcançada foi compatível com trabalhos de Bessin *et al*., (2023), que obtiveram RMSE inferior a 0,12 m em mapeamento de fachadas.

Quanto às perspectivas futuras, recomenda-se testar diferentes dispositivos móveis, aplicar calibração de câmeras, e avaliar a metodologia em outros tipos de patrimônio histórico menos degradados. Sugere-se ainda a utilização de instrumentos de medição mais precisos que a trena como o uso de estações totais para validação da acurácia dos levantamentos, incluindo mais feições tridimensionais. Este trabalho contribui para o avanço de metodologias acessíveis de documentação de bens culturais, conciliando rigor técnico e viabilidade operacional. A solução proposta mostra-se promissora para a criação de modelos detalhados de estruturas de pequeno e médio porte, como fachadas de imóveis térreos e monumentos históricos. Além disso, o cadastro urbano pode ser enriquecido com detalhes de feições oclusas por vegetação ou por outras estruturas, assim como de elementos internos e benfeitorias presentes no local.

Nesse contexto, pesquisas futuras podem explorar o uso de outros tipos de câmeras de baixo custo ou outros modelos de smartphones para complementar nuvens de pontos obtidas por UASs em áreas com significativa presença de vegetação, avaliar a integração de algoritmos de fotogrametria móvel com nuvens aéreas para redução de lacunas em áreas oclusas e desenvolver protocolos de calibração simplificados para dispositivos móveis, garantindo maior confiabilidade dos resultados em levantamentos de campo. Sugere-se ainda testar levantamentos com o *Pix4DCatch* usando a solução integrada com suporte e uso de um GNSS RTK ou outros aplicativos de escaneamento ou tomada de fotos sequenciais.

# REFERÊNCIAS


ALEMÁN MONTES, Bryan *et al*. **Estimación de rendimiento en el cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) a partir de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (VANT).** Agronomía Costarricense, p. 67–80, 4 fev. 2021. Acesso em: 7 abr. 2025.

ARAUJO JUNIOR, Waldson; SATO, Simone. **Análise comparativa de produtos fotogramétricos obtidos através de smartphone e VANT.** XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. abril de 2025. Acesso em: 27 abr. 2025

BESSIN, Zoé *et al.* **Smartphone Structure-from-Motion Photogrammetry from a Boat for Coastal Cliff Face Monitoring Compared with Pléiades Tri-Stereoscopic Imagery and Unmanned Aerial System Imagery.** *Remote Sensing*, v. 15, n. 15, p. 3824, 31 jul. 2023. Acesso em: 5 abr. 2025.

DAHL, Ed. **ASPECTOS TEÓRICOS DA HISTÓRIA DA CARTOGRAFIA: UMA DISCUSSÃO DE CONCEITOS, ABORDAGENS E NOVAS DIREÇÕES**. *Espaço e Cultura*, n. 39, p. 207–208, 13 jun. 2016. Acesso em: 3 ago. 2024.

DINKOV, Davis Dinkov. **4D monitoring of mountain areas using the UAV-PPK workflow.** ***Silva Balcanica***, v. 24, n. 2, p. 13–35, 4 jul. 2023. Acesso em: 10 maio 2025.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre (ET-ADGV-Defesa F Ter)**, 2ª Edição-2016. Boletim do Exército nº 18, de 6 de maio de 2016. 10 de maio 2025.

DÖŞ, Mustafa Emre; YİĞİT, Abdurahman Yasin; UYSAL, Murat. **Documenting historical monuments using smartphones: a case study of Fakih Dede Tomb, Konya.** *Mersin Photogrammetry Journal*, v. 3, n. 2, p. 53–60, 30 dez. 2021. Acesso em: 7 abr. 2025.

FOROOTAN, Ehsan *et al.* **A functional modelling approach for reconstructing 3 and 4 dimensional wet refractivity fields in the lower atmosphere using GNSS measurements.** *Advances in Space Research*, v. 68, n. 10, p. 4024–4038, nov. 2021. Acesso em: 24 mar. 2025.

GONÇALVES, D. F. R. **Impact of image acquisition geometry and SfM-MVS processing parameters on the 3D reconstruction of coastal cliffs**. 2020. p. 76. Acesso em: 10 ago. 2025

HERÓDOTO. ***História: O relato clássico da guerra entre gregos e persas*.** [S.l: s.n.], 2001. . Acesso em: 3 ago. 2024.

JASIŃSKA, Aleksandra; PYKA, Krystian; PASTUCHA, Elżbieta; MIDTIBY, Henrik Skov. **A Simple Way to Reduce 3D Model Deformation in Smartphone Photogrammetry**. Sensors, vol. 23, no. 2, 2023.

JORNAL DO COMMERCIO. **“ Casarão secular da Várzea em ruínas”.** 21 de novembro de 2014. Acesso em: 3 jan. 2025.

LOWE, D. G**. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision**, 2004. v. 60, n. 2, p. 91–110.

MENEZES, Lucas de Santana; SANTOS, Mario Ricardo Rodrigues; SENRA, Aracy Sousa. **FOTOINTERPRETAÇÃO OBTIDA POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA) APLICADA EM MAPEAMENTO LITOESTRUTURAL DE ESCALA 1:800, AFLORAMENTO DO DOMÍNIO MACURURÉ, MUNICÍPIO DE CAPELA-SE.** *Geosciences = Geociências*, v. 38, n. 2, p. 483–493, 20 ago. 2019. Acesso em: 5 ago. 2024.

MOORE, G.E. Cramming More Components Onto Integrated Circuits. ***Proceedings of the IEEE***, v. 86, n. 1, p. 82–85, jan. 1998. Acesso em: 18 ago. 2024.

MOUSAVI, Vahid *et al.* **A New Multi-Criteria Tie Point Filtering Approach to Increase the Accuracy of UAV Photogrammetry Models. *Drones***, v. 6, n. 12, p. 413, 14 dez. 2022. Acesso em: 28 jul. 2025.

Nguyen, H. M., Wünsche, B., Delmas, P., & Lutteroth, C. (2012). **3D Models from the black box: Investigating the current state of image-based modeling. 20th International**

**Conference in Central Europe on Computer Graphics,** Visualization and Computer Vision, WSCG 2012 - Conference Proceedings, PART 2, 249–258.

OLIENSIS, John. **The Least-Squares Error for Structure from Infinitesimal Motion.** *International Journal of Computer Vision*, v. 61, n. 3, p. 1–41, fev. 2005. Acesso em: 23 jan. 2025.

PATONIS, Photis. **A Comparative Study on the Use of Smartphone Cameras in Photogrammetry Applications**. *Sensors*, v. 24, n. 22, p. 7311, 15 nov. 2024. Acesso em: 4 jun. 2025.

PIX4D, Ltd. ***Intersection Tie Points*** - *PIX4Dmatic* em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/9778756320669> Acesso em: 19 mar. 2025

PIX4D, Ltd. ***Quality report*** - *PIX4Dmatic* em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360040686852> Acesso em: 20 mar. 2025

PIX4D, Ltd. ***Transform your work with precise 3D scans and AR with PIX4Dcatch*.** Disponível em: <https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dcatch/>. Acesso em: 18 ago. 2024.

PITOMBEIRA, Kalima Mendes; REIS FILHO, Antonio Aderson dos. **Geração e análise de produtos cartográficos por fotogrametria com o uso de structure from motion - multi view stereo. [**S. l.: s. n.], 2020. Acesso em: 20 mar. 2025

PHOTOGRAMMETRY, American Society Of. ***Manual of Photogrammetry***. [S.l.]: American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 1980. . Acesso em: 10 jul. 2025.

RAPUCA, Almedina; MATOUŠKOVÁ, Eva. **TESTING OF CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING FOR EASY DOCUMENTATION OF**
**HISTORICAL OBJECTS AND BUILDINGS PARTS.** *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, v. 32, n. 4, p. 504–518, 31 dez. 2023. Acesso em: 3 ago. 2024.

RECIFE. Lei nº 17.511/2008 **Revisão do Plano Diretor do Município do Recife**. Cadernos do Poder Executivo, Edição 143, 30 de dezembro de 2008. Acessado em 7 abr. 2025

REMONDINO, F. *et al*. Dense image matching: Comparisons and analyses. [S.l.]: [s.n.], 2013. V. 1, p. 47–54. Acesso em: 15 ago. 2025.

RODRIGUES, João Paulo Santana. **Avaliação do uso de UAS equipado com PPK para geração de ortoimagens: Estudo de caso no Casarão da Várzea, Recife–PE**. TCC – Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Em andamento. Acesso em: 15 ago. 2025.

SAIF, Wahib; ALSHIBANI, Adel. **Smartphone-Based Photogrammetry Assessment in Comparison with a Compact Camera for Construction Management Applications.** *Applied Sciences*, v. 12, n. 3, p. 1053, 20 jan. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

SCHENK, Toni. **Introduction to photogrammetry.** The Ohio State University, Columbus, v. 106, n. 1, p. 1, 2005., n. 1, 28 fev. 2015. Acesso em: 31 ago. 2024.

SHAN, Jie *et al.* **Democratizing photogrammetry: an accuracy perspective.** *Geo-spatial Information Science*, v. 26, n. 2, p. 175–188, 3 abr. 2023. Acesso em: 11 ago. 2024.

STURZENEGGER, M.; STEAD, D. **Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts.** Engineering Geology, 12 jun. 2009. v. 106, n. 3–4, p. 163–182.

SULEYMANOGLU, B. *et al.* **ROAD INFRASTRUCTURE MAPPING BY USING IPHONE 14 PRO: AN ACCURACY ASSESSMENT.** *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLVIII-M-1–2023, p. 347–353, 21 abr. 2023. Acesso em: 3 ago. 2024.

SUNAGAWA, Walkíria Kazue; QUEIROZ FILHO, Alfredo Pereira De. **SOBRE AS**

**RELAÇÕES ENTRE CARTOGRAFIA, ARTE E DESIGN.** *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 1, 28 fev. 2015. Acesso em: 10 ago. 2024.

TAMIMI, R.; TOTH, C. **PERFORMANCE ASSESSMENT OF A MINI MOBILE MAPPING SYSTEM: IPHONE 14 PRO INSTALLED ON A E-SCOOTER.** *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLVIII-M-3–2023, p. 307–315, 17 out. 2023. Acesso em: 15 jan. 2025.

TAYLOR, John R.; THOMPSON, William. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. *Physics Today*, v. 51, n. 1, p. 57–58, 1 jan. 1998. Acesso em: 15 ago. 2025.

UTIMARA, E.Y, SOUZA, S.F**. Uso da Fotogrametria de Curta Distância e Imagens de Vídeo nos levantamentos de Sítios Arqueológicos.** Projeto Final Engenharia Cartográfica, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente, 1994. Acesso em: 31 ago. 2024.

WESTOBY MJ**,** Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, ReynoldsJM.**"Structure-from-motion" photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications.** Geomorphology. 2012;179: 300–14. Acesso em: 31 ago. 2024.

WOLF, P. E, DEWITT, B. A, WILKINSON, B. E., **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. Fourth Edition**. Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education. e-Book conversion by Cenveo® Publisher Services. ISBN: 978-0-07-176111-6. Acesso em: 5 abr. 2025

YU, Jiayong *et al.* Global **Navigation Satellite System‐based positioning technology for structural health monitoring: a review.** *Structural Control and Health Monitoring*, v. 27, n. 1, 30 out. 2019. Acesso em: 18 ago. 2024.

XIE, Linfu *et al.* **Optimal Self-Calibration Strategies in the Combined Bundle Adjustment of Aerial–Terrestrial Integrated Images.** *Remote Sensing*, v. 14, n. 9, p. 1969,

19 abr. 2022. Acesso em: 30 jul. 2025.

ZHONG, Haonan *et al.* **Influence of ground control point reliability and distribution on UAV photogrammetric 3D mapping accuracy**. *Geo-spatial Information Science*, p. 1–21, 17 jan. 2025. Acesso em: 17 jul. 2025.

# ANEXO A - RELATÓRIO PEC-PCD DADOS DO VOO PPK

**GeoPEC**
Software científico para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais

UFV

**RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DA ACURÁCIA POSICIONAL**

---

**DADOS DO PRODUTO**

---

Produto: VOO CASARÃO PPK
Local: Varzéa - RECIFE
Data: 02/12/2024
Responsável Técnico: JPSR

---

**CLASSIFICAÇÃO FINAL DO PRODUTO**

---

Padrão de acurácia utilizado: **Decreto n. 89.817/1984 - Análise Planimétrica**
Metodologia: ET-CQDG

O produto "VOO CASARÃO PPK", foi classificado com PEC-PCD **classe A**, na escala **1/1000**, 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.

Pontos de checagem utilizados: 15
RMS das discrepâncias (m): 0.110

---

Padrão de acurácia utilizado: **Decreto n. 89.817/1984 - Análise Altimétrica**
Metodologia: ET-CQDG

O produto "VOO CASARÃO PPK", foi classificado com PEC-PCD **classe B**, para a equidistância vertical de **1m**, 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.

Pontos de checagem utilizados: 15
RMS das discrepâncias (m): 0.271

---

**Relatório estatístico**

Padrão de acurácia utilizado: Decreto n. 89.817/1984
Análise planimétrica e altimétrica

**Processamento**

Escala de Referência: 1/1000
Equidistância vertical: 1m
Pontos de checagem inseridos: 15
Pontos de checagem utilizados: 15

**Estatísticas descritivas**

| Estatísticas | dX | dY | dZ | d2D | d3D |
|---|---|---|---|---|---|
| nº de pontos (n) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Média | -0.035 | -0.045 | 0.244 | 0.094 | 0.267 |
| Mediana | -0.005 | -0.043 | 0.224 | 0.069 | 0.264 |
| Min | -0.172 | -0.138 | 0.006 | 0.021 | 0.045 |
| Max | 0.059 | 0.054 | 0.448 | 0.201 | 0.453 |
| Desv.padrão | 0.082 | 0.054 | 0.122 | 0.059 | 0.125 |
| RMS | 0.086 | 0.069 | 0.271 | 0.110 | 0.293 |
| Q1 | -0.128 | -0.092 | 0.162 | 0.048 | 0.174 |
| Q3 | 0.026 | -0.004 | 0.351 | 0.140 | 0.402 |
| MAD | 0.071 | 0.043 | 0.104 | 0.050 | 0.105 |

**Outliers**

| Processamento | Método | Classe utilizada | Outliers detectados | Valor limite - detecção |
|---|---|---|---|---|
| Planimetria | Teste 3σ | Classe B | 0 | 0.900m |
| Altimetria | Teste 3σ | Classe B | 0 | 1.000m |

**Teste de normalidade**

Teste de normalidade Shapiro-Wilk com 95% de nível de confiança

| Componente | Estatística W | P-value | Resultado |
|---|---|---|---|
| X | 0.871 | 0.035 | **Amostra NÃO Normal** |
| Y | 0.986 | 0.995 | **Amostra Normal** |
| Z | 0.945 | 0.456 | **Amostra Normal** |
| 2D | 0.861 | 0.025 | **Amostra NÃO Normal** |
| 3D | 0.861 | 0.025 | **Amostra NÃO Normal** |

**Teste de tendência**

Teste t de Student com 90% de nível de confiança

| Componente | t tabelado | t calculado | Resultado |
|---|---|---|---|
| X | 1.761 | -1.639 | **Não há tendência** |
| Y | 1.761 | -3.253 | **Tendência** |
| Z | 1.761 | 7.728 | **Tendência** |

Estatistica espacial

| Somatório sen(Az) | Somatório cos(Az) | Média direcional | Variância circular | Resultado |
|---|---|---|---|---|
| -1.215 | -6.642 | 190.37º | 0.550 | **Não Tendencioso** |

**Teste de precisão**

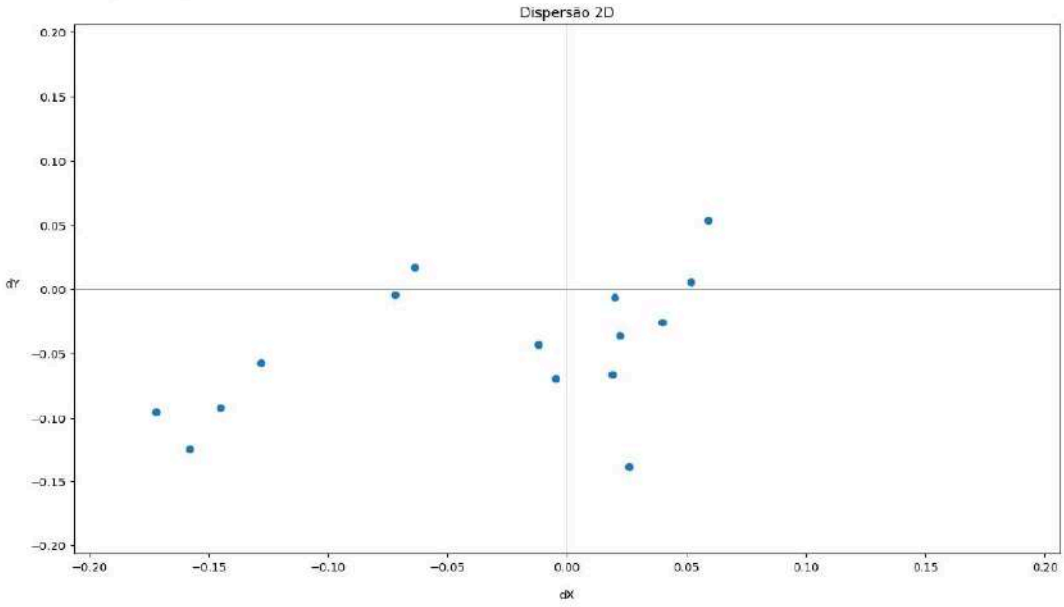
| Processamento | PEC(m) | EP(m) | %di <= PEC | Resultado |
|---|---|---|---|---|
| Planimetria | 0.280 | 0.170 | 100.000 | **Classe A** |
| Altimetria | 0.500 | 0.333 | 100.000 | **Classe B** |

Nota: **"%di <= PEC"** corresponde a porcentagem de discrepâncias menores ou iguais ao PEC da classe utilizada.

---

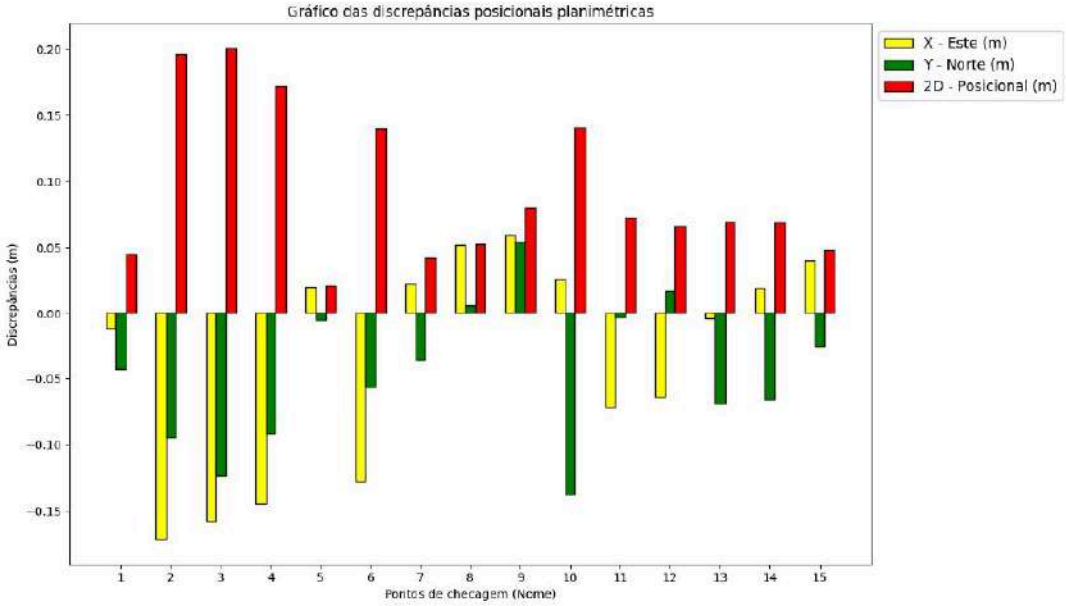
## Gráficos

### Dispersão planimetria



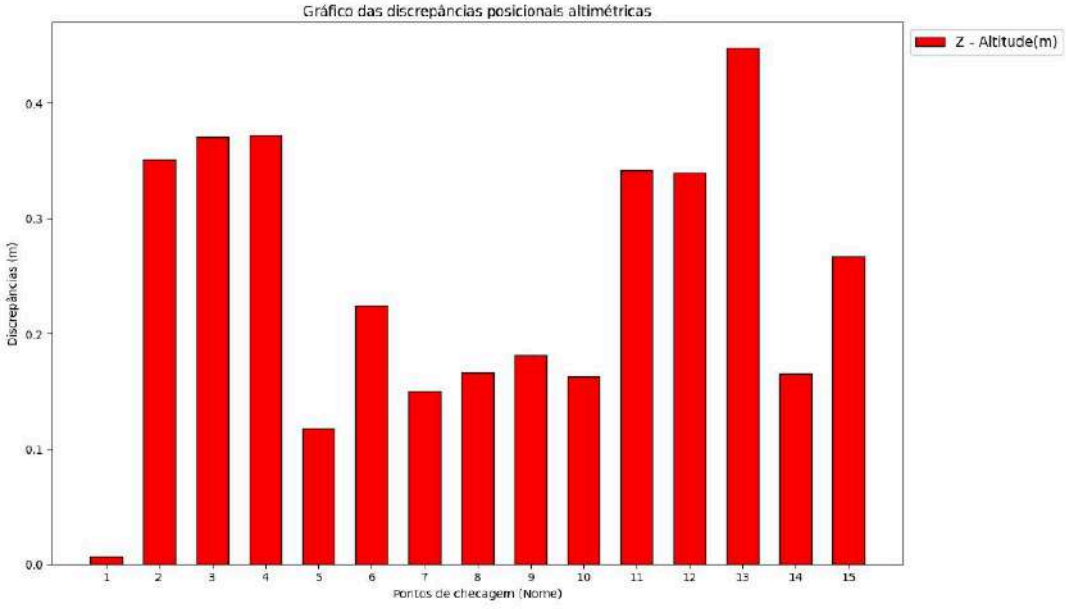
## Discrepâncias planimetria

Gráfico das discrepâncias posicionais planimétricas



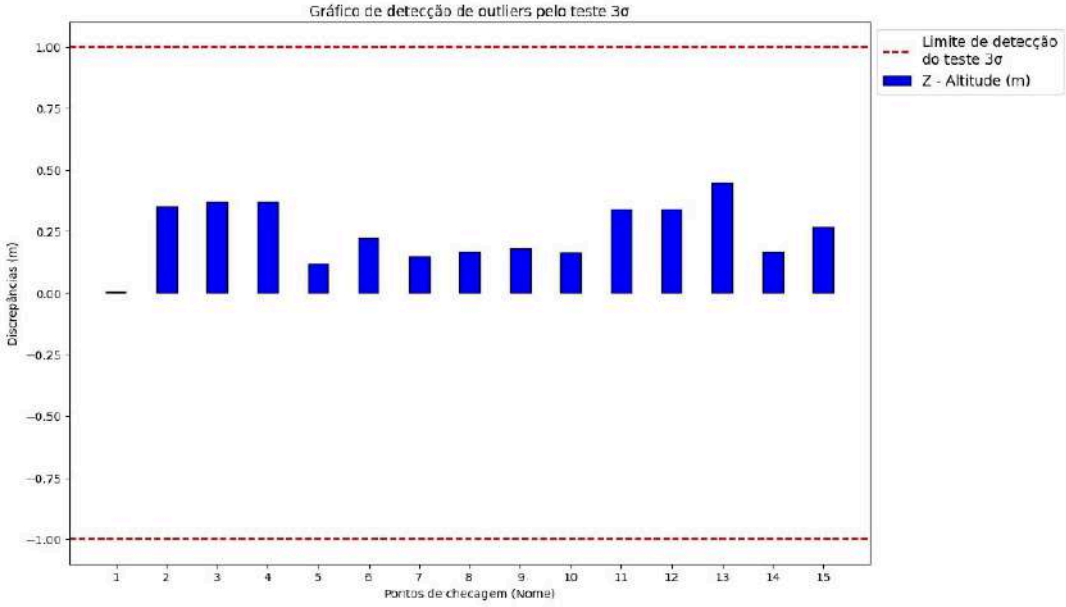

## Discrepâncias altimetria

Gráfico das discrepâncias posicionais altimétricas



Outliers planimetria

Outliers altimetria



**Discrepâncias - Pontos de checagem**

| ID | dX | dY | dZ | d2D | d3D | Azim.2D | Outlier | Excluido |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.012 | -0.043 | 0.006 | 0.045 | 0.045 | 195.593 | Não | Não |
| 2 | -0.172 | -0.095 | 0.351 | 0.196 | 0.402 | 241.087 | Não | Não |
| 3 | -0.158 | -0.124 | 0.371 | 0.201 | 0.422 | 231.875 | Não | Não |
| 4 | -0.145 | -0.092 | 0.372 | 0.172 | 0.410 | 237.606 | Não | Não |
| 5 | 0.020 | -0.006 | 0.118 | 0.021 | 0.120 | 106.699 | Não | Não |
| 6 | -0.128 | -0.057 | 0.224 | 0.140 | 0.264 | 245.996 | Não | Não |
| 7 | 0.022 | -0.036 | 0.150 | 0.042 | 0.156 | 148.570 | Não | Não |
| 8 | 0.052 | 0.006 | 0.166 | 0.052 | 0.174 | 83.418 | Não | Não |
| 9 | 0.059 | 0.054 | 0.181 | 0.080 | 0.198 | 47.534 | Não | Não |
| 10 | 0.026 | -0.138 | 0.162 | 0.140 | 0.214 | 169.330 | Não | Não |
| 11 | -0.072 | -0.004 | 0.342 | 0.072 | 0.350 | 266.820 | Não | Não |
| 12 | -0.064 | 0.017 | 0.340 | 0.066 | 0.346 | 284.876 | Não | Não |
| 13 | -0.005 | -0.069 | 0.448 | 0.069 | 0.453 | 184.145 | Não | Não |
| 14 | 0.019 | -0.066 | 0.165 | 0.069 | 0.179 | 163.940 | Não | Não |
| 15 | 0.040 | -0.026 | 0.267 | 0.048 | 0.271 | 123.024 | Não | Não |

Relatorio gerado em: 07/08/2025 - 17:12:13
Plugin GeoPEC - versão 1.0 - 2024

# APÊNDICE A - ARTIGO ELABORADO DURANTE O TCC

## ANÁLISE COMPARATIVA DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE SMARTPHONE E VANT

*Waldson Lemos Araujo Junior [1], Simone Sayuri Sato [2]*

[1] Universidade Federal de Pernambuco, waldson.lemosj@ufpe.br; [2] Universidade Federal de Pernambuco, simone.sato@ufpe.br.

**RESUMO**

Nesta pesquisa foi avaliada a usabilidade de Smartphones no que diz respeito a captura e, a posteriori, o processamento das imagens usando soluções structure from motion (SfM). O projeto tomou como base uma ortoimagem da área levantada anteriormente usando VANT (Phantom 4 Advanced), como dado comparativo e de referência base, com um levantamento realizado com com smartphone. Os dois dados da mesma área, serviram de parâmetro para comparar a diferença qualitativa dos dois produtos gerados. Os elementos analisados como: precisão, forma e representação tridimensional dos objetos em cena, Uma metodologia foi elaborada para verificar o resultado do processamento realizado em dois tipos de softwares, neste caso Pix4Dmatic e Pix4Dmapper. Os resultados apresentados mostraram a viabilidade de uso de smartphones para projetos fotogramétricos e quanto ao uso do software Pix4Dmatic revelou melhor performance e qualidade em relação ao Pix4Dmapper, conforme documentação da empresa Pix4D.

***Palavras-chave*** *- Smartphone, VANT, Fotogrametria.*

***ABSTRACT***

*This research aims to evaluate the usability of smartphones in terms of capturing and subsequently processing images using structure from motion (SfM) solutions. The project took as a base an orthoimage of the area previously surveyed using a UAV (Phantom 4 Advanced), as comparative data and a base reference, with a survey performed using a smartphone. These two data sets of the same area provided parameters for comparing the qualitative difference between the two products generated. The elements analyzed, such as: precision, shape and three-dimensional representation of the objects in the scene, A methodology was developed to verify the results of the processing achieved with two types of software, in this case Pix4Dmatic and Pix4Dmapper. The results presented showed the feasibility of using smartphones for photogrammetric projects and the use of Pix4Dmatic software revealed better performance and quality than Pix4Dmapper, according to documentation from the Pix4D company.*

***Keywords —*** *Smartphone, VANT, Photogrammetry*

### 1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica é uma das maiores constantes da humanidade na atualidade. Foi dito por [1] que o poder computacional mais que dobra a cada ano. Na atual conjuntura o avanço tecnológico tornou as ciências cartográficas uma pioneira nesse quesito fazendo jus às afirmações de [1]. Essa evolução se estendeu à fotogrametria que se beneficiou com a crescente qualidade das câmeras em smartphones e dos avanços da visão computacional, potencializando a captura e processamento de imagens fotogramétricas por meio de smartphones. O presente trabalho parte das seguintes formulações de pesquisa: (a) Smartphones, com suas capacidades de imagem cada vez mais sofisticadas e de fácil acesso, podem substituir ou suplementar efetivamente os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e equipamentos profissionais de fotogrametria em determinadas aplicações? Esta pesquisa investiga a viabilidade e a precisão do uso de smartphones para projetos fotogramétricos, comparando os resultados obtidos com um smartphone com os obtidos usando um VANT (Phantom 4 Advanced). Especificamente, a hipótese é que, embora a fotogrametria baseada em smartphones possa não atingir o mesmo nível de precisão que os sistemas baseados em VANTs, ela pode oferecer uma alternativa acessível e econômica para aplicações que exigem menos rigor em termos de precisão. Ao assumir que smartphones possam gerar produtos fotogramétricos de qualidade comparável aos de VANTs em aplicações específicas, especialmente com o suporte de softwares fotogramétricos

específicos para esse tipo de processamento como Pix4Dmatic.

No que diz respeito, a qualidade das câmeras de smartphones e seu potencial de uso em aplicações fotogramétricas, são vistos em [2] e [3]. Em continuidade sobre as demais aplicações foram levantando alguns exemplos em [3] como, inspeções de ferrovias, mapeamento de falésias [4], aplicando a gerenciamento de riscos [5] e ganhando popularidade nas aplicações da fotogrametria, podendo se tornar uma ferramenta de medição simples por praticamente todos os usuários de smartphones [6]. Com essas afirmações dos autores, é nítido que a fotogrametria e a cartografia se tornará mais acessível para um público geral, mesmo que menos abrangente, os Smartphones seriam a opção mais vantajosa.

Portanto, os objetivos deste estudo, ainda na fase preliminar, incluem: gerar modelos 3D e ortofotos a partir de dados de smartphones e VANTs da mesma área e comparar a precisão, a forma e a representação tridimensional dos objetos na cena produzidos pelos dois métodos e analisar o desempenho e a qualidade do Pix4Dmatic e do Pix4Dmapper no processamento de imagens de smartphones[7].

Esse estudo é motivado pela necessidade de democratizar o acesso à fotogrametria, permitindo que usuários com recursos limitados realizem levantamentos tridimensionais precisos e eficientes. A pesquisa está na fase preliminar, mas tentará mostrar alguns benefícios detectados num dos primeiros experimentos realizados.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudo

O estudo foi conduzido nas dependências da Universidade Federal de Pernambuco, especificamente no campus Recife (Figura 1) devido à disponibilidade de levantamentos topográficos e acervos cartográficos que serviram como base comparativa. Na Figura 2, é apresentando uma imagem que mostra uma parte da área representando parte do local de estudo que buscou representar a condição de relevo e nível de arborização da área.

**Figura 1. Mapas localização, Proximidades do Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE campus Recife**

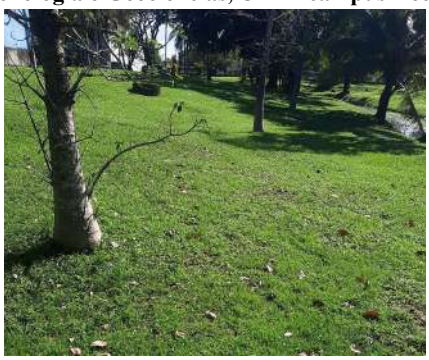


**Figura 2. Local de estudo, Proximidades do Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE campus Recife**

### 2.2. Equipamentos e Software

- Smartphone: Samsung Galaxy A51, equipado com o aplicativo Pix4Dcatch para captura automatizada de imagens.
- Softwares de Processamento: Pix4Dmapper e Pix4Dmatic foram utilizados para processar as imagens e gerar modelos tridimensionais e ortoimagens.
- Dados de Referência: Ortoimagem obtida por VANT adquiridas por um Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) [8] - Phantom 4 Advanced. Este material foi elaborado em julho de 2018, com pixel de 0,01m, por meio de 110 imagens obtidas a partir de atividade elaborada pelos alunos de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura com orientação da professora da disciplina de Fotogrametria.

### 2.3. Coleta de Dados

Foram capturadas 1.400 imagens da área de estudo utilizando o smartphone. Durante o processamento das imagens, optou-se pela geração de modelos digitais tridimensionais, dada sua adequação às técnicas fotogramétricas em relação às distâncias de captura das imagens em relação à câmera e suas variações de altitudes, bem como os cuidados quanto às sobreposições entre as imagens. Essas diretrizes de captura de imagens e dificuldades de tomada de fotos manuais, foram relatadas no estudo de utilização de smartphones para recriação 3D de monumentos históricos [2]. Entretanto com a utilização da solução digital Pix4Dcatch se consegue automatizar a tomada de fotos em relação a velocidade e tempo de tomada de fotos, de modo a transpassar essa barreira, por se tratar de uma ferramenta voltada especificamente para o uso da fotogrametria nesses aparelhos como foi demonstrado por Suleymanoglu, B. *et al* [4].

### 2.4. Procedimentos de Análise dos Dados

Os dois processamentos foram realizados em dois softwares: Pix4DMapper e Pix4DMatic, os procedimentos em destaque foram:

- Alinhamento das imagens manual: utilizou-se de tie points para melhoria no alinhamento, dispensando pontos de controle externos nesta fase inicial;
- Comparação de coordenadas: foram analisados cinco pontos de amostra entre os produtos gerados por smartphone e os dados de referência. As diferenças de coordenadas Norte (y) e Leste (x) foram calculadas no sistema SIRGAS 2000 (fuso 25S).
- Cálculo e Análise das Métricas baseado no RMSE: foi utilizado o Root Mean Square Error (RMSE) resultante das diferenças quadráticas médias entre as coordenadas calculadas dos cinco pontos comparadas com as de referência (medições de distâncias lineares (medidas na ortofoto e a ortoimagem gerada usando imagens processadas do smartphone).

## 3. RESULTADOS

Por meio dos dois processamentos realizados nos softwares Pix4Dmapper e Pix4Dmatic, gerou-se: nuvem densa de pontos, modelo 3D, ortoimagens. A segunda solução de softwares, apresentou facilidade de manuseio e maior velocidade de processamento e, resultou modelo 3D e ortoimagem com nitidez superior a solução anterior,

Um dos produtos gerados, a representação tridimensional da superfície denominada *mesh* (Figuras 3 e 4), descreve como sobreposição das imagens sobre a nuvem densa de pontos gerando uma superfície com forma aproximada ao real objeto ou terreno [5].

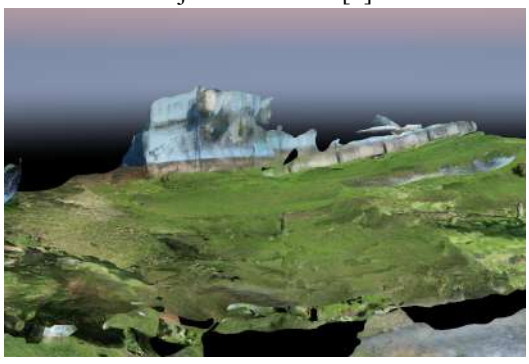


**Figura 3. Representação Tridimensional Pix4Dmapper**

**Figura 4. Representação Tridimensional Pix4Dmatic**

O ortomosaico gerado a partir das imagens obtidas possui um GSD de 0,5 cm[/pix (Figura 5), enquanto que na ortoimagem com VANT, tem-se um centímetro. Para averiguar se existe algum grau de precisão relativa planimétrica, foram retiradas amostras de ambas as ortoimagens em locais identificados (Figura 6). Tomando o produto realizado por drone (dados de referência) como certo, o cálculo das coordenadas foram utilizadas distâncias lineares, como proposto em [10]. Portanto, as diferenças entre as coordenadas Norte (y) e Leste (x) no sistema de coordenadas SIRGAS2000 com fuso em 25S, foram solucionadas pela equação 1, e os resultados de diferenças entre coordenadas são apresentados na Tabela 1.

Como resultado métrico, obteve um Root Mean Square Error (RMSE) de 0,58 metros. Embora a metodologia não incluísse pontos de controle terrestres e pontos de checagem, estabelecidos usando um receptor GNSS de alta precisão, foram incorporados na metodologia a inclusão de pontos de ligação (tie points) manualmente. Esses pontos foram estrategicamente posicionados e identificados para melhorar a precisão relativa do processamento, aprimorando o alinhamento das imagens. Os próximos experimentos devem levar em consideração pontos de controle e pontos de checagem para avaliar a acurácia posicional alcançada.

**Figura 5.Ortoimagem gerada por smartphone, UFPE campus Recife**

$$\Delta = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

**Fórmula 1. Distância entre os pontos**

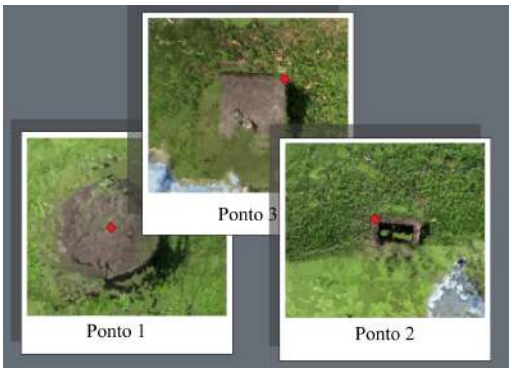



**Figura 6. Pontos coletados para comparação.**

| ΔPonto 1 | ΔPonto 2 | ΔPonto 3 |
|---|---|---|
| 0,34 | 0,45 | 1,08 |

**Tabela 1. diferenças calculadas entre os pontos em metros**

## 4. DISCUSSÃO

O detalhamento decorrido da obtenção das mais de 1400 imagens se mostrou mais do que satisfatório, tanto em questão de qualidade quanto em tempo de aquisição e processamento. Entretanto se fez notável a diferença entre os softwares usados, enquanto foi necessário um maior número de interações utilizando a solução Pix4Dmapper, enquanto na ferramenta da mesma empresa, o Pix4Dmatic, apenas uma interação foi necessária para adquirir o modelo demonstrado nas figuras 3 e 4.

Um fator de aprimoramento recomendado é a velocidade e posicionamento da câmera (operador) durante a tomada de cenas, evitando a presença de sombras presentes na ortoimagem, conforme apresentada na figura 5, propõe-se atenção a detalhes de angulação solar, podendo agregar a qualidade dos produtos gerados.

Quanto a comparação entre os produtos produzidos em 2018 e 2023, este último gerado por smartphone, obteve-se uma diminuição do pixel em 50%, indo de 1 cm para 0,5 cm. Proporcionando assim uma resolução superior ao produto padrão produzido por VANT (Figura 7).

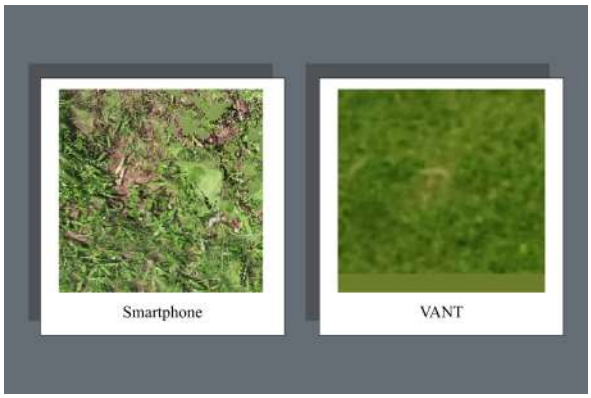



**Figura 7.Comparação de resolução Smartphone x VANT**

## 5. CONCLUSÕES

Na construção deste artigo, pôde-se constatar que haveria melhoras dos resultados obtidos, conforme estudos da literatura consultada. Uma revisão da metodologia poderia proporcionar maiores vantagens como: aumento de produtividade do processamento, melhoria na forma de aquisição de dados e precisão.

Uma forma de elevar a qualidade dos materiais obtidos seria a adição de pontos de checagem e controle (artificiais ou naturais), que agregaria qualidade posicional absoluta, sendo altamente viável para mapeamentos de terrenos. Outras potenciais aplicações possíveis seriam: cadastro imobiliário, avaliação de drenagem em pequenas áreas, mesmo com a presença de obstruções que inviabilizam levantamentos com VANTs.

A precisão encontrada na ortoimagem, foi maior do que esperado, visto que o levantamento foi feito sem qualquer apoio em pontos previamente coletados com precisão atestada por métodos como Precise Point Positioning (PPP) [11]. Suportado apenas pelo GPS do Smartphone se chegou aos resultados da Tabela 1, onde se obteve um RMS de 0,58 metros.

## 8. REFERÊNCIAS

[1] G. E Moore. *Cramming More Components Onto Integrated Circuits.* Proceedings of the IEEE, v. 86, n. 1, p. 82–85, jan. 1998. Acesso em: 20 de Setembro de 2024.

[2] A. Rapuca, ; *Matoušková, Eva. Testing Of Close-Range Photogrammetry And Laser Scanning For Easy Documentation Of Historical Objects And Buildings Parts*. Stavební obzor - Civil Engineering Journal, v. 32, n. 4, p. 504–518, 31 dez. 2023.Acesso em: 21 de Setembro de 2024.

[3] F. I. Apollonio, F. Fantini, S. Garagnani, and M. Gaiani, "A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets," Remote Sens., vol. 13, no. 3, p. 486, Jan. 2021, doi: 10.3390/rs13030486.

[4] B, Suleymanoglu. *et al. Road Infrastructure Mapping By Using Iphone 14 Pro: An Accuracy Assessment.* The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLVIII-M-1–2023, p. 347–353, 21 abr. 2023. Acesso em: 19 de Setembro de 2024.

[5] E. Forootan, *et al*. A functional modelling approach for reconstructing 3 and 4 dimensional wet refractivity fields in the lower atmosphere using GNSS measurements. Advances in Space Research, v. 68, n. 10, p. 4024–4038, nov. 2021. Acesso em: 8 out. 2024.

[6] I. Bubniak; A. Bubniak; Y. Shylo; M. Oliinyk; M. Bihun; Geodesy, *Cartography and Aerial Photography.* Geodesy, Cartography and Aerial Photography, v. 95,2023, n. 95, p. 13–21, 28 jun. 2022. Acesso em: 30 set. 2024.

[7] V. B, SILVA; E, FORTES. O *uso de produtos de sensoriamento remoto na análise espaço-temporal*. Terra Didática, v. 18, p. 429, 16 dez. 2022. Acesso em: 29 set. 2024.

[7] PIX4D, Ltd. *Transform your work with precise 3D scans and AR with PIX4Dcatch.* Disponível em: <https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dcatch/>. Acesso em: 20 de Setembro de 2024.

[8] N. Pricope . *Multi-Sensor Assessment Of The Effects Of Varying Processing Parameters On USA Product Accuracy And Quality In Coastal Region*S. em: Geological Society of America Abstracts with Programs. Geological Society of America; 2019. Acessado em 14 de Setembro de, 2024. http://dx.doi.org/10.1130/abs/2019se-325931

[10] CRECRAFT, David; GERGELY, Stephen. *Analog Electronics: Circuits, Systems and Signal Processing*. [S.l.]: Elsevier, 2002. . Acesso em: 21 dez. 2024.

[11] W. Saif; A. Alshibani. *Smartphone-Based Photogrammetry Assessment in Comparison with a Compact Camera for Construction Management Applications*. Applied Sciences, v. 12, n. 3, p. 1053, 20 Jan. 2022. Acesso em: 21 de Setembro de 2024.