

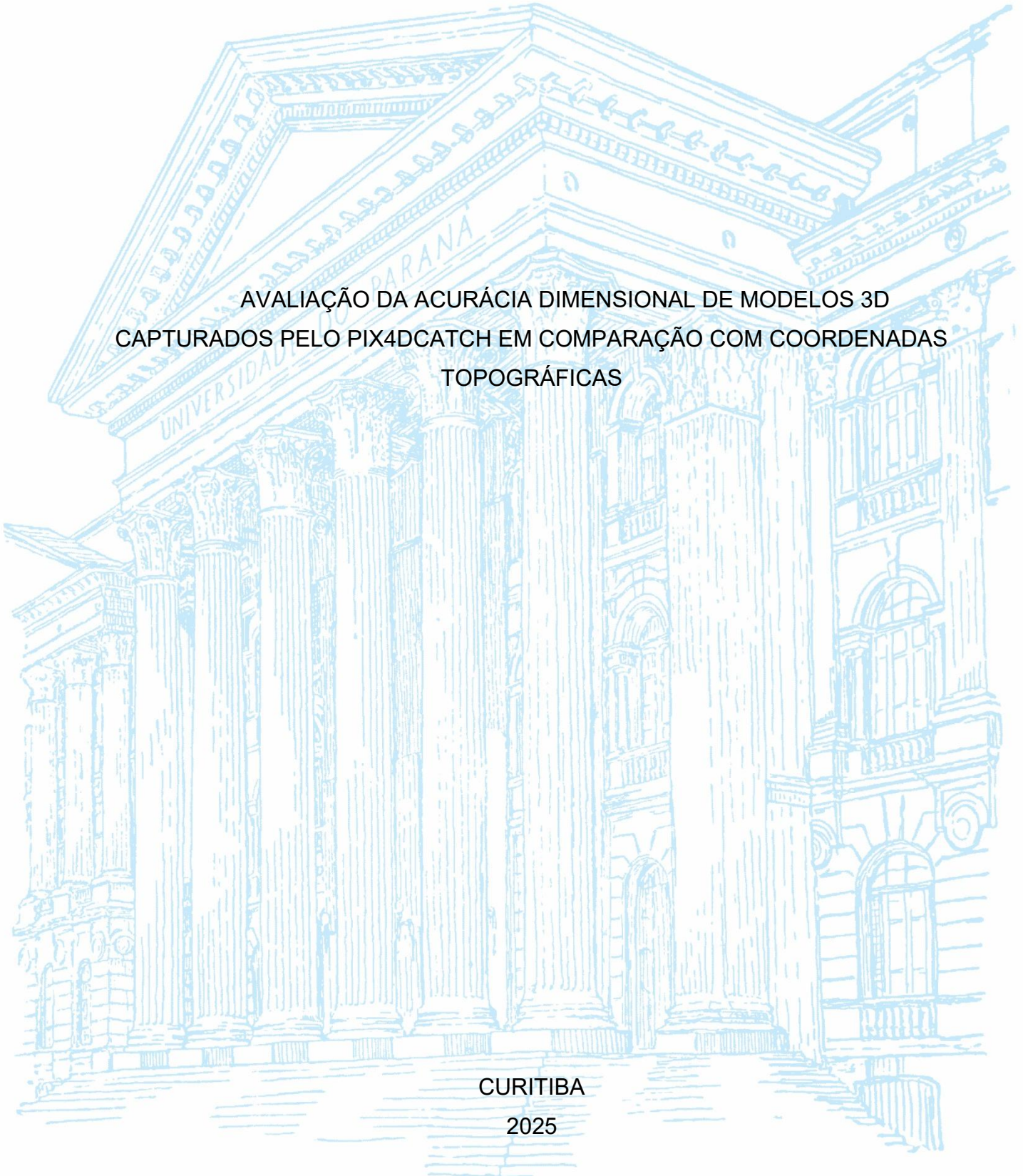
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WELINTON OLIVEIRA SILVA

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DIMENSIONAL DE MODELOS 3D  
CAPTURADOS PELO PIX4DCATCH EM COMPARAÇÃO COM COORDENADAS  
TOPOGRÁFICAS

CURITIBA

2025



WELINTON OLIVEIRA SILVA

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DIMENSIONAL DE MODELOS 3D  
CAPTURADOS PELO PIX4DCATCH EM COMPARAÇÃO COM COORDENADAS  
TOPOGRÁFICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho

Coorientadora: Profa. Dra. Luciene Stamato Delazari

CURITIBA

2025



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências da Terra  
Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

## TERMO DE APROVAÇÃO

WELINTON OLIVEIRA SILVA

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DIMENSIONAL DE MODELOS 3D CAPTURADOS PELO PIX4DCATCH  
EM COMPARAÇÃO COM COORDENADAS TOPOGRÁFICAS

O Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, foi APROVADO como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Profº Leonardo Ercolin Filho - DGEOM/UFPR

Profª Luciene Stamato Delazari - DGEOM/UFPR

Profº Tiago Lima Rodrigues- DGEOM/UFPR

**VIDEOCONFERÊNCIA**  
Patrick Otto Bush

Curitiba, 4 de julho de 2025.

À minha mãe, meu pai (*in memoriam*) e aos meus irmãos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por conceder forças e sabedoria ao longo desta etapa.

Agradeço à minha mãe Sirlei, aos meus irmãos Alex e Karol, pelo apoio ao longo da minha trajetória.

À Yasmin Mayara Santos, pelo companheirismo, incentivo e presença constante.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho e Profa. Dra. Luciene Stamato Delazari, pelas contribuições fundamentais para a realização deste trabalho e em toda trajetória acadêmica.

Ao Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação por ceder a estrutura necessária para elaboração deste trabalho.

À empresa Guandalini Posicionamento, pela cessão de equipamentos utilizados nesta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Geomática da UFPR, pelo ensino, apoio e dedicação ao longo do curso.

À coordenação do curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da UFPR, pelo suporte acadêmico e institucional durante a graduação.

Aos colegas que auxiliaram de forma direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

Afirmações extraordinárias requerem evidências extraordinárias. (Carl  
Edward Sagan)

## RESUMO

A crescente necessidade por métodos de aquisição de dados mais eficientes, precisos e economicamente viáveis nas áreas de Arquitetura, Agrimensura, Topografia, Planejamento Urbano e Conservação de Monumentos Históricos impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias de representação do mundo real em ambientes digitais, como por exemplo a criação de gêmeos digitais por meio de processos avançados de captura da realidade. Nesse cenário, destaca-se o PIX4Dcatch, uma solução desenvolvida pela empresa PIX4D, por meio de um aplicativo para dispositivos iOS, integra Fotogrametria terrestre móvel com câmeras de alta definição, sensores de perfilamento LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e georreferenciamento através do GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Essa nova tecnologia permite a geração de modelos tridimensionais em tempo real, utilizando como principal ferramenta um dispositivo móvel com uma abordagem prática e eficiente. Contudo, para que os resultados obtidos com essa tecnologia possam ser utilizados em diferentes aplicações métricas, a validação da acurácia e a identificação das limitações desses produtos em relação aos métodos convencionais de mensuração, como a Topografia tradicional, são fundamentais. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo analisar a acurácia dimensional dos modelos 3D gerados pelo PIX4Dcatch e processados pelo software PIX4DMatic, permitindo a comparação de medidas lineares horizontais, verticais (desníveis) e inclinadas com dados obtidos via Topografia convencional, utilizando diferentes configurações e distâncias materializadas em um campo de testes. Através dos resultados obtidos na acurácia dimensional, foi possível avaliar a aplicabilidade da tecnologia no contexto da captura da realidade, evidenciando seu potencial como alternativa acessível a um público mais amplo, integrando dispositivos inicialmente destinados ao mercado de consumo.

Palavras-chave: PIX4Dcatch; Fotogrametria Móvel; LiDAR; Topografia; Captura da Realidade; Gêmeos Digitais.

## **ABSTRACT**

The growing need for more efficient, accurate, and cost-effective data acquisition methods in fields such as Architecture, Surveying, Topography, Urban Planning, and Historical Monument Conservation has driven the development of new technologies for representing the real world in digital environments, such as the creation of digital twins through advanced reality capture processes. In this context, PIX4Dcatch stands out as a solution developed by the company PIX4D, available as an iOS application, which integrates mobile terrestrial photogrammetry with high-definition cameras, LiDAR (Light Detection and Ranging) sensors, and georeferencing via GNSS (Global Navigation Satellite System). This innovative technology enables the real-time generation of three-dimensional models using a mobile device as its main tool, providing a practical and efficient approach. However, for the results generated by this technology to be used in various metric applications, it is essential to validate their accuracy and identify the limitations of these products when compared to conventional measurement methods such as traditional surveying. This study analyzed the dimensional accuracy of 3D models created by PIX4Dcatch and processed with PIX4DMatic, comparing horizontal, vertical, and spatial measurements with conventional surveying data from a test field. Based on the dimensional accuracy results, it was possible to assess the applicability of the technology in the context of reality capture, highlighting its potential as an accessible alternative for a broader audience by integrating consumer-grade mobile devices.

**Keywords:** PIX4Dcatch; Mobile Photogrammetry; LiDAR; Topography; Reality Capture; Digital Twins.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - AQUISIÇÃO AVANÇADA DE DADOS .....	18
FIGURA 2 - LEVANTAMENTO POR IRRADIAÇÃO .....	17
FIGURA 3 - FOTOGRAMETRIA TERRESTRE .....	18
FIGURA 4 - MÉTODO <i>TIME-OF-FLIGHT</i> .....	20
FIGURA 5 - MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE FASE .....	21
FIGURA 6 - POSICIONAMENTO RELATIVO ESTÁTICO .....	23
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO LEVANTAMENTO RTK TRADICIONAL .....	24
FIGURA 8 - FUNCIONAMENTO DO PROTOCOLO NTRIP EM LEVANTAMENTOS GNSS RTK .....	25
FIGURA 9 - COMPONENTES DO NTRIP .....	25
FIGURA 10 - CONCEITOS DE PRECISÃO E ACURÁCIA .....	27
FIGURA 11 - OPERAÇÃO PIX4DCATCH .....	30
FIGURA 12 - MODELO DE <i>AUTOTAGS</i> .....	31
FIGURA 13 - LEVANTAMENTO COM PIX4DCATCH E <i>AUTOTAGS</i> .....	32
FIGURA 14 - MODELO TRIDIMENSIONAL (SUPERFÍCIE) .....	33
FIGURA 15 - MODELO TRIDIMENSIONAL (CONSTRUÇÕES) .....	33
FIGURA 16 - EMLID REACH RX .....	37
FIGURA 17 - IPHONE 15 PRO MAX .....	37
FIGURA 18 - EMLID REACH RS2 .....	38
FIGURA 19 - SANDING ARC 5 PRO .....	38
FIGURA 20 - MATERIALIZAÇÃO DOS PONTOS .....	39
FIGURA 21 - SOFTWARE GTOPO .....	40
FIGURA 22 - APLICATIVO PIX4DCATCH .....	40
FIGURA 23 - SOFTWARE PIX4DMATIC .....	41
FIGURA 24 - SOFTWARE EXCEL .....	41
FIGURA 25 - FLUXOGRAMA: ETAPAS DE TRABALHO .....	42
FIGURA 26 - ÁREA DE ESTUDO .....	43
FIGURA 27 - DISTÂNCIA RBMC E ÁREA DE ESTUDO .....	44
FIGURA 28 - ALVOS ADESIVOS FIXADOS .....	45
FIGURA 29 - PIQUETES DE MADEIRA .....	46
FIGURA 30 - PARAFUSOS METÁLICOS .....	46

FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS .....	47
FIGURA 32 - INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO TOTAL .....	49
FIGURA 33 - BIPÉ COM MINIPRISMA.....	50
FIGURA 34 - VISADA DE ALVO ADESIVO .....	51
FIGURA 35 - CONFIGURAÇÃO DO PIX4DCATCH .....	52
FIGURA 36 - LINHAS DE COLETAS .....	53
FIGURA 37 - ALOCAÇÃO DAS AUTOTAGS.....	54
FIGURA 38 - PONTO MATERIALIZADO (PARAFUSO METÁLICO).....	54
FIGURA 39 - SOLUÇÃO DURANTE CAMINHAMENTO .....	55
FIGURA 40 - ETAPAS DO PROCESSAMENTO DO PIX4DCATCH .....	55
FIGURA 41 - PONTOS DE LIGAÇÃO (ATPS – AUTOMATIC TIE POINTS) .....	56
FIGURA 42 - VISÃO INTERNA DA NUVEM DE PONTOS DENSA.....	59
FIGURA 43 - VISÃO GERAL DA NUVEM DE PONTOS DENSA .....	60
FIGURA 44 - IDENTIFICAÇÃO DO CENTRO DAS AUTOTAGS.....	61
FIGURA 45 - ALINHAMENTO 1 (P3-P9) .....	62
FIGURA 46 - ALINHAMENTO 2 (P5-P1) .....	63
FIGURA 47 - ALINHAMENTO 3 (P6-PR2).....	63
FIGURA 48 - ALINHAMENTO 4 (P7-PR1).....	64
FIGURA 49 - ALINHAMENTO 5 (P8-PR3).....	64
FIGURA 50 - ALINHAMENTO 6 (P6-P2) .....	65
FIGURA 51 - ALINHAMENTO 7 (P8-P4) .....	65
FIGURA 52 - ALINHAMENTO 8 (PR3-PR2) .....	66
FIGURA 53 - PONTOS IDENTIFICADOS (NUVEM DE PONTOS).....	69

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - ERRO ABSOLUTO EM DISTÂNCIAS HORIZONTAIS.....	71
GRÁFICO 2 - ERRO ABSOLUTO EM DISTÂNCIAS VERTICAIS .....	72
GRÁFICO 3 - ERRO ABSOLUTO EM DISTÂNCIAS INCLINADAS.....	74

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PONTOS MATERIALIZADOS .....	44
TABELA 2 - CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTO .....	57
TABELA 3 - COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS (TOPOGRAFIA).....	68
TABELA 4 - COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS (NUVEM DE PONTOS) .....	69
TABELA 5 - DISTÂNCIAS HORIZONTAIS .....	70
TABELA 6 – DISTÂNCIAS VERTICAIS .....	72
TABELA 7 - DISTÂNCIAS INCLINADAS .....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

TLS	- <i>Terrestrial Laser Scanning</i>
LiDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
IMU	- <i>Inertial Measurement Unit</i>
RTK	- <i>Real-Time Kinematic</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
ISPRS	- <i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
TOF	- <i>Time-of Flight</i>
INCRA	- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária Paraná
NTRIP	- <i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
POE	- Parâmetros de orientação exterior
POI	- Parâmetros de orientação interior
POI	- Raiz do erro médio quadrático

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVO GERAL .....	19
1.2.1 Objetivos específicos.....	19
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 TÉCNICAS DE CAPTURA DA REALIDADE .....	16
2.1.1 Topografia Convencional.....	16
2.1.2 Fotogrametria e LiDAR.....	17
2.1.3 Técnicas de Levantamento GNSS .....	22
2.1.3.1 Posicionamento Relativo Estático.....	22
2.1.3.2 Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real .....	23
2.1.4 Acurácia na captura da realidade.....	26
2.2 INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA MODELAGEM 3D .....	29
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1 MATERIAIS .....	36
3.2 METODOLOGIA.....	42
3.2.1 Área de Estudo e Materialização dos Pontos.....	42
3.2.2 Levantamento GNSS .....	47
3.2.3 Levantamento Topográfico.....	48
3.2.4 Levantamento LiDAR, GNSS e Fotogramétrico utilizando o PIX4Dcatch .....	51
3.2.5 Fluxo de trabalho pós levantamento .....	55
3.2.5.1 Refinamento do Georreferenciamento RTK .....	56
3.2.5.2 Geração da Nuvem de Pontos Densa .....	57
3.2.5.3 Fusão de Nuvem Fotogramétrica de Pontos com Dados LiDAR.....	57
3.2.5.4 Parâmetros Utilizados.....	57
3.2.6 Cálculo da Acurácia Dimensional.....	61
<b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
4.1 COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS – TOPOGRAFIA .....	68
4.2 COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS – NUVEM DE PONTOS.....	68
4.3 DISTÂNCIAS HORIZONTAIS .....	70
4.4 DISTÂNCIA VERTICAL.....	71
4.5 DISTÂNCIAS INCLINADAS .....	73

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>75</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	76
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>
<b>APÊNDICE 1 – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO GERADO PELO PIX4DMATIC</b> .....	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O termo Gêmeo Digital (*Digital Twin*) tem ganhado destaque crescente nos últimos anos, sendo amplamente utilizado em diversas áreas industriais e de planejamento urbano (BACHER, 2022). Trata-se da representação virtual do mundo físico em um momento específico (Momento da captura), e seus dados devem ser atualizados regularmente (FRANZINI; CASELLA; MONTI, 2023). O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto tem proporcionado novas ferramentas para captura e processamento de dados geoespaciais com propósitos como esse.

A captura da realidade desempenha um papel fundamental no processo de modelagem tridimensional e análise geoespacial. Esse conceito refere-se à aquisição digital de informações sobre superfícies, edificações e terrenos, permitindo a reconstrução detalhada do ambiente físico em um ambiente virtual (FOBIRI; MUSONDA; MULEYA, 2022). O uso de modelos 3D evoluiu de uma ferramenta de representação para uma plataforma central de colaboração, visualização e tomada de decisão (Jin et al., 2020). Dentre as diversas tecnologias de captura da realidade, destacam-se soluções como TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), Fotogrametria aérea e terrestre e a integração desses meios. O TLS utiliza um sensor ativo LiDAR (*Light Detection and Ranging*) que permite a criação de modelos tridimensionais utilizando-se de princípios de medição de distância por tempo de voo (*Time-of Flight*) ou por fase, permitindo medir milhões de pontos em minutos, tornando-se uma solução com aplicações em Arquitetura, Engenharia, Construção e Gestão de Instalações (AEC/FM), como criação de documentações as-built, monitoramento de atividades de construção, controle dimensional de qualidade, monitoramento de ativos, engenharia reversa, registro de patrimônio cultural de planejamento urbano (ARYAN; BOSCHÉ; TANG, 2021). A Fotogrametria permite a criação de modelos tridimensionais a partir de fotografias, um processo que envolve a captura de imagens de um objeto sob diferentes perspectivas, posteriormente processadas por softwares especializados que geram o modelo 3D (Cardoso et al., 2023). Essa metodologia tem se consolidado como uma alternativa viável para produção de nuvens de pontos tridimensionais nas diversas aplicações citadas assim como o TLS.

Com isso, cresce a necessidade de integração dessas tecnologias para geração de modelos 3D mais completos, unificando a precisão geométrica do LiDAR com informações visuais da Fotogrametria (Maskeliūnas et al., 2025), possibilitando o

desenvolvimento de novas soluções, incluindo o uso de dispositivos móveis como smartphones para essas finalidades. O uso de smartphones especialmente vem se tornando cada vez mais usual, uma vez que permitem coleta de dados de forma mais rápida a partir da multimodalidade e integração de sensores como, câmeras de alta resolução, IMU (*Inertial Measurement Unit*), LiDAR e sensores adicionais como acelerômetros e magnetômetros (Tavani et al., 2022). Porém a acurácia e precisão dos modelos obtidos a partir desses sensores em dispositivos móveis tem sido objeto de investigações. Abdel-Majeed, H. M. *et al.* (2024) abordou em seu trabalho uma comparação de modelos gerados por sensores LiDAR de um Ipad Pro 2021 e de um scanner a laser Trimble TX8 em um hall de um campus universitário com aquisição dinâmica e estática. Os experimentos demonstraram que as precisões variaram de acordo com o comprimento do objeto escaneado. A aquisição dinâmica apresentou um REQM (Raiz do Erro Quadrático Médio) de 16,17 cm, variando  $\pm 1-2$  cm para objetos até 4 metros e diminui  $\pm 30$  cm para objetos com comprimento superior a 4 metros. A aquisição estática mostrou melhores resultados, com REQM de 2,84 cm variando  $\pm 1-2$  cm independente do comprimento do objeto. Apesar disso, aplicações com algoritmos dedicados e softwares de pós processamento prometem melhorar a qualidade de dados, tornando esses dispositivos uma alternativa, apesar de suas limitações comparados a dispositivos dedicados a captura da realidade.

Nesse contexto, o PIX4Dcatch (<https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dcatch/>) é um sistema de Fotogrametria móvel terrestre desenvolvido para dispositivos iOS **equipados** com sensores LiDAR e câmeras de alta resolução. Por meio da combinação de imagens e dados de perfilamento, o sistema permite a geração de nuvens de pontos e modelos texturizados que representam a superfície ou objetado visualizado, os tornando georreferenciados com a integração de dados de posicionamento com o sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*), viabilizado com o uso de um receptor de mão e a técnica RTK (*Real Time Kinematic*). Ao final da aquisição de dados, o algoritmo denominado *GeoFusion* combina dados de orientação exterior das imagens, sensores do dispositivo móveis e dados de GNSS para melhorar a precisão dos dados (Strecha et.al, 2024). Essa abordagem possibilita a obtenção de dados e visualização em tempo real, sendo amplamente aplicada em engenharia, construção civil, arqueologia e monitoramento ambiental. O sistema integra-se ao PIX4DMatic (<https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dmatric-large-scale-Fotogrametria-software/>)

que é a plataforma responsável pelo processamento das imagens e pela reconstrução dos modelos em 3D, possibilitando a extração de medidas e a análise de terrenos e estruturas.

A adoção do PIX4Dcatch como alternativa às técnicas tradicionais de levantamento topográfico, como Topografia convencional, varredura a laser terrestre (TLS) e Fotogrametria aérea com drones, deve-se a diversos fatores como agilidade, acessibilidade e flexibilidade da tecnologia. A Topografia convencional, realizada com estação total e receptores GNSS, proporciona alta precisão e acurácia em seus levantamentos, entretanto, pode ser um processo demorado e oneroso, exigindo equipamentos com alto custo comercial. Além disso, a necessidade de posicionamento físico dos operadores em determinados pontos do terreno pode dificultar levantamentos em áreas de difícil acesso ou com grande extensão.

Nesse contexto, o grande diferencial do PIX4Dcatch está na capacidade de gerar modelos tridimensionais com resultados que se aproximam dos obtidos com perfilamento lidar, utilizando apenas um dispositivo móvel como equipamento principal.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A Topografia convencional é uma técnica amplamente utilizada em mapeamentos da superfície terrestre por oferecer acurácia e precisão milimétrica na determinação de coordenadas tridimensionais através da medição de distâncias e ângulos, sendo uma metodologia confiável e consolidada. No entanto, essa técnica demanda um tempo maior de execução, especialmente em áreas de grande extensão ou com terrenos de difícil acesso e com grande nível de detalhes. Outra limitação importante é a relativa baixa densidade de dados coletados, uma vez que cada ponto precisa ser medido individualmente, o que não permite a geração de um volume de informações tão abrangente quanto o obtido por tecnologias mais recentes, como a Fotogrametria com drones ou varredura com LiDAR. Assim, embora a Topografia convencional continue sendo fundamental em muitos contextos, sua aplicação pode ser menos eficiente em projetos que exigem levantamento de grandes áreas em pouco tempo ou com alta densidade de dados.

O levantamento GNSS, o perfilamento LiDAR e a Fotogrametria são métodos consolidados para captura da realidade e proporcionam acurácia em nível

centimétrico e grande volume de informações. O GNSS permite a obtenção com precisão milimétrica das coordenadas de pontos específicos, fundamental para controle topográfico e estabelecimento de referências geodésicas. O LiDAR utiliza tecnologia a laser para capturar nuvens densas de pontos tridimensionais, possibilitando a modelagem detalhada da superfície terrestre e de objetos. Já a Fotogrametria utiliza imagens aéreas ou terrestres para reconstruir modelos tridimensionais, oferecendo uma alternativa eficiente para a geração de dados topográficos com alta densidade. Essas técnicas se apoiam no conhecimento de métodos tradicionais e contribuem para aquisição avançada de dados (Figura 1).

FIGURA 1 - AQUISIÇÃO AVANÇADA DE DADOS



Fonte: Adaptado de Geo Week News (2017).

Considerando esse cenário, o PIX4Dcatch se destaca como uma solução inovadora, pois permite que o operador com um dispositivo iOS compatível capture dados tridimensionais com rapidez e simplicidade, comparados às outras metodologias citadas. Além disso, a integração com o Pix4DMatic facilita o processamento e análise dos dados, tornando o fluxo de trabalho mais eficiente.

Essa tecnologia é especialmente vantajosa para aplicações que exigem levantamentos rápidos e frequentes, como inspeções de obras, mapeamento de pequenas áreas e análises preliminares de terreno, além da possibilidade de visualização dos dados em tempo real. Porém, se faz necessário uma análise cautelosa dos dados finais para validar as informações obtidas, pois sua qualidade pode ser afetada por vários fatores como por exemplo, perda temporária de sinal GNSS e movimentações abruptas do operador. Dessa forma, torna-se necessário um estudo voltado à verificação da acurácia dimensional dos modelos tridimensionais gerados, por meio da avaliação de medidas lineares horizontais e verticais, com o objetivo de identificar possíveis distorções do modelo no processo de representação da realidade. Essa análise pode ser realizada por meio da comparação com métodos convencionais, como GNSS RTK ou estação total, permitindo, assim, a identificação dos potenciais e das limitações dessa ferramenta relacionados a hardware, tempo de processamento e limitações físicas do local que possam interferir no uso da ferramenta.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a acurácia dimensional de medidas lineares de distâncias horizontais, verticais e inclinadas de modelos tridimensionais gerados com o sistema PIX4Dcatch em comparação com medidas obtidas com Topografia convencional.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- a) Criar um campo de testes com alvos materializados;
- b) Realizar a coleta de coordenadas tridimensionais utilizando diferentes métodos: Topografia convencional e Geodésia (Estação total e GNSS), levantamento fotogramétricos e LiDAR utilizando o PIX4Dcatch;
- c) Gerar modelos tridimensionais de representação do campo de testes com dados do PIX4Dcatch;
- d) Calcular valores de distâncias horizontais, inclinadas e desníveis de vetores entre os diferentes métodos;

- e) Calcular índice de similaridade do modelo tridimensional a partir do erro absoluto e relativo;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura apresentada tem por objetivo demonstrar os métodos utilizados neste trabalho para coleta de dados, bem como outros conceitos relacionados. Serão abordados tópicos sobre técnicas de captura da realidade e integração de tecnologias para modelagem 3D.

### 2.1 TÉCNICAS DE CAPTURA DA REALIDADE

#### 2.1.1 Topografia Convencional

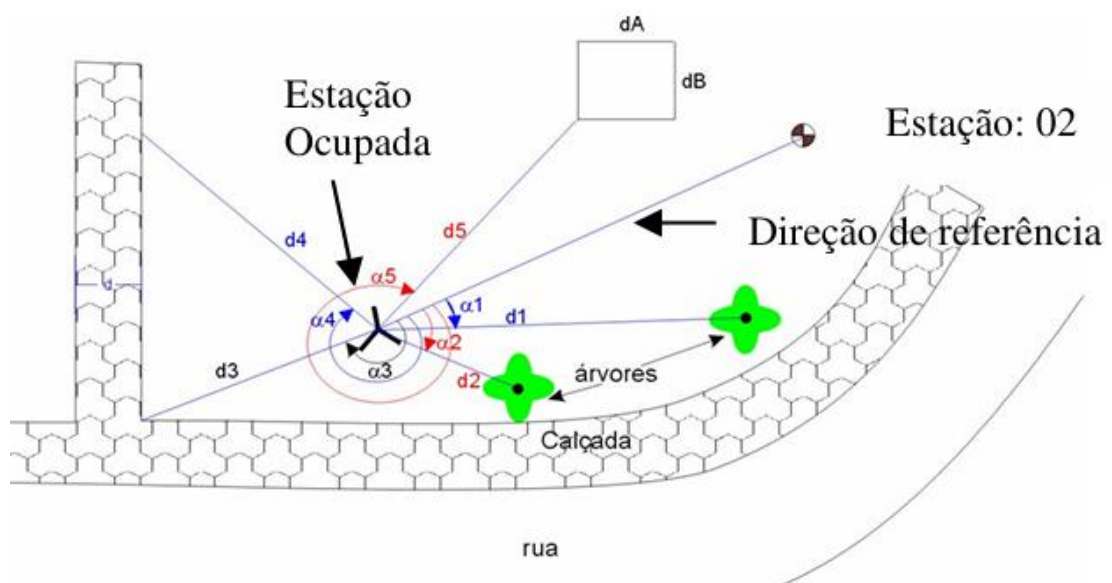
A Topografia, segundo Espartel (1987), “tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre”. Essa definição evidencia o caráter local do levantamento topográfico, que busca representar fielmente a realidade física de uma área com alto nível de detalhamento e precisão. A NBR 13133 (ABNT, 1991) define um levantamento topográfico como: “Conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. A estes pontos se relacionam os pontos de detalhe visando a sua exata representação planimétrica numa escala pré-determinada e à sua representação altimétrica por intermédio de curvas de nível, com equidistância também pré-determinada e/ou pontos cotados.”. Essa definição ressalta a importância da precisão nas medições e da correta materialização dos pontos no terreno, elementos fundamentais para garantir a fidelidade da representação espacial e altimétrica em projetos de engenharia, planejamento urbano e estudos ambientais.

Ao longo dos anos, o levantamento topográfico evoluiu do uso de métodos analógicos, como trenas, níveis e teodolitos, para técnicas mais modernas baseadas em tecnologias digitais. A integração de estações totais e receptores GNSS transformou significativamente a forma como as informações espaciais são coletadas em campo, permitindo maior agilidade e precisão (Gonçalves et al., 2024).

Entre os métodos utilizados no levantamento de campo, destaca-se a irradiação (Figura 2). Essa técnica consiste em, a partir de uma linha de referência conhecida (base geodésica ou ponto com coordenadas já determinadas), medir um

ângulo e uma distância até o ponto de interesse. O princípio é semelhante ao de um sistema de coordenadas polares. A distância pode ser obtida por meio de uma trena, distanciômetro eletrônico, estação total ou métodos taqueométricos. Este método é amplamente utilizado para o levantamento de detalhes topográficos, como edificações, muros, árvores e demais elementos presentes no terreno (VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2012).

FIGURA 2 - LEVANTAMENTO POR IRRADIAÇÃO



Fonte: VEIGA; ZANETTI; FAGGION (2012).

O método de irradiação, portanto, representa uma técnica consolidada na Topografia moderna, sendo especialmente útil para levantamentos de precisão em áreas com elementos complexos ou de difícil acesso.

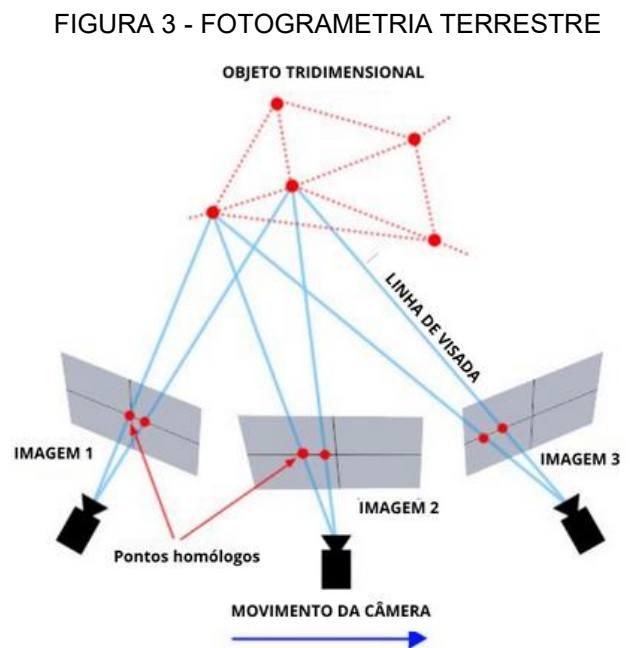
### 2.1.2 Fotogrametria e LiDAR

A Fotogrametria tem como foco principal a extração de informações métricas e geométricas de objetos e superfícies a partir de imagens fotográficas, geralmente obtidas por câmeras posicionadas em diferentes pontos de vista, podendo ser dividida em Fotogrametria terrestre ou Fotogrametria aérea. A ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) define Fotogrametria como: "Fotogrametria e Sensoriamento Remoto é a arte, ciência, e tecnologia de obtenção de informações

confiáveis a partir de sistemas de imageamento ou outros sensores, sobre a Terra e seu meio ambiente, e outros objetos físicos, e processos por meio da gravação, medição, análise e representação”. Ou seja, a Fotogrametria não abrange apenas a obtenção de imagens, mas todo o processo fotogramétrico envolvendo registro, medição, análise e representação de informações sobre uma determinada superfície ou objetos físicos sem contato direto. Dentro da definição de Fotogrametria, é possível identificar duas áreas possíveis: A Fotogrametria métrica e interpretativa.

Na Fotogrametria métrica o objetivo é realizar medições a partir de fotos ou outras fontes de informação para determinar a posição relativa de pontos, permitindo encontrar distâncias, altitudes, dimensões e formas de objetos representados nas imagens. Na Fotogrametria interpretativa o principal objetivo é o reconhecimento e identificação de objetos (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Segundo Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014) na Fotogrametria terrestre (Figura 3) as imagens são capturadas com câmeras posicionadas no solo, podendo ter sua posição e orientação medidas no momento da captura. Uma ampla variedade de câmeras pode ser usada, desde modelos comerciais simples até equipamentos especialmente projetados. Atualmente, sensores digitais são o padrão, embora algumas câmeras analógicas ainda sejam utilizadas.



Fonte: Traduzido de The Haskins Society (2025).

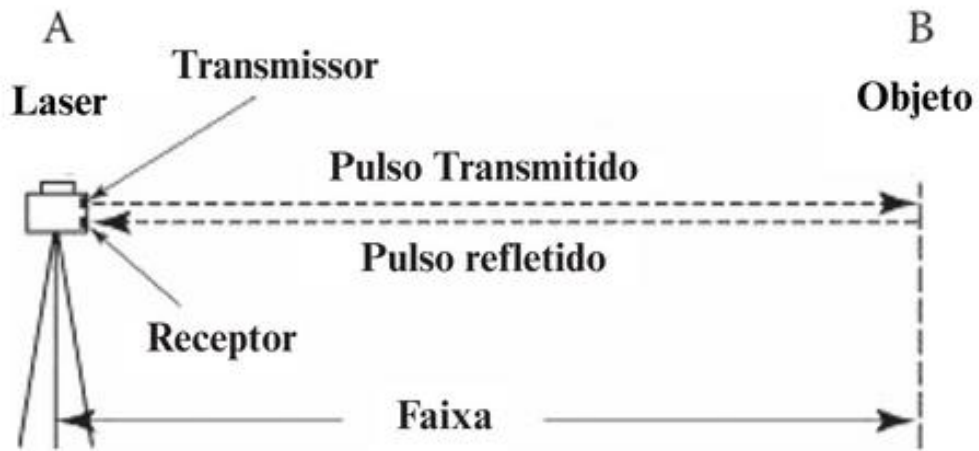
A Fotogrametria aérea, as imagens podem ser verticais ou oblíquas. As verticais são feitas com o eixo da câmera o mais próximo possível da vertical. Quando o eixo está perfeitamente vertical, a imagem é chamada de fotografia verdadeiramente vertical. No entanto, inclinações pequenas (geralmente inferiores a  $3^\circ$ ) são comuns devido a movimentos da aeronave, originando fotografias inclinadas. Para aplicações práticas, métodos simplificados para fotos verticais podem ser aplicados mesmo em fotos levemente inclinadas, sem perda significativa de precisão. Equipamentos e técnicas específicos foram desenvolvidos para corrigir essas inclinações com exatidão.

Já o LiDAR atua por meio de pulsos de laser emitidos e refletidos pela superfície, permitindo a obtenção direta de medidas de distância com alta acurácia, inclusive em condições de baixa luminosidade ou em superfícies com pouca textura. Esse tipo de equipamento possui duas variáveis possíveis, sendo um sistema estático ou dinâmico.

O uso de lasers na Topografia teve início nas décadas de 1960 e 1970, inicialmente em instrumentos que mediam distâncias por comparação de fase ou pulso e eco. Com o tempo, essa tecnologia foi incorporada às estações totais, permitindo a medição simultânea de distâncias e ângulos. O desenvolvimento de lasers compactos e seguros viabilizou medições sem refletor e a criação de perfiladores a laser portáteis. A partir disso, surgiram os scanners a laser terrestres (LiDAR), que capturam dados tridimensionais com alta precisão, podendo operar em modo estático (em tripés) ou dinâmico (em veículos ou manuais) (SHAN; TOTH, 2018).

A obtenção das medidas de distâncias é dependente da mensuração precisa do tempo entre o envio e retorno do sinal ao sensor, sendo possível por meio de duas principais técnicas: TOF (*Time-of-Flight*) ou método de comparação de fase.

A técnica TOF (Figura 4) consiste em medir com precisão o tempo que um pulso de laser, curto e intenso, leva para sair do equipamento de medição, atingir o objeto alvo, refletir nele e retornar ao instrumento.

FIGURA 4 - MÉTODO *TIME-OF-FLIGHT*

Fonte: Traduzido de SHAN; TOTH (2018).

É dado pela seguinte relação:

$$R = \frac{v \cdot t}{2}, \quad (1)$$

onde:

$R$  é a distância inclinada ou alcance;

$v$  é a velocidade da radiação eletromagnética, que é um valor conhecido;

$t$  é o intervalo de tempo medido.

Derivando, temos a seguinte relação:

$$\Delta R = \frac{\Delta v \cdot t}{2} + \frac{v \cdot \Delta t}{2}, \quad (2)$$

onde:

$\Delta R$  é a precisão do alcance (distância);

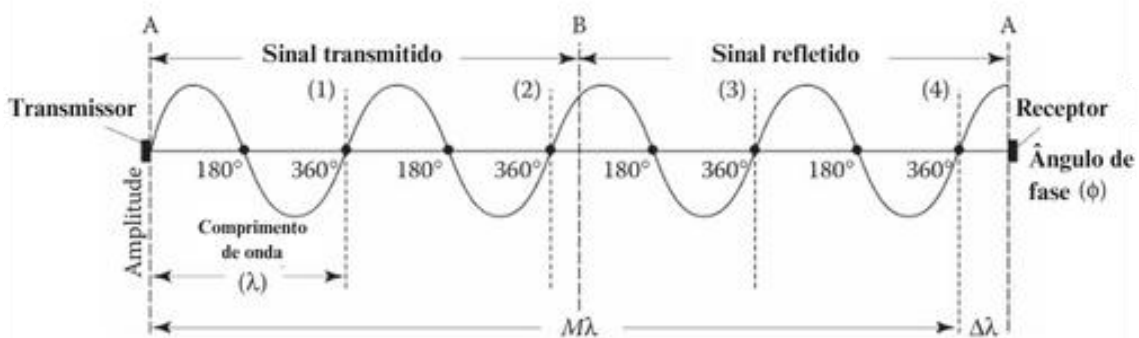
$\Delta v$  é a precisão da velocidade;

$\Delta t$  é o valor correspondente da precisão na medição do tempo.

O método de comparação de fase (Figura 5) é baseado em laser de onda contínua (CW). Nele, a distância até um objeto é determinada pela medição da

diferença de fase entre o sinal senoidal emitido e o sinal refletido. Como o comprimento de onda do laser é muito curto, um sinal de modulação com frequência mais baixa é sobreposto para facilitar a medição. A diferença de fase permite calcular a parte fracionária da distância, enquanto a alteração do padrão de modulação possibilita estimar o número inteiro de comprimentos de onda, resultando na distância total.

FIGURA 5 - MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE FASE



Fonte: Traduzido de SHAN; TOTH (2018).

É dado pela seguinte relação:

$$R = \frac{(M\lambda + \Delta\lambda)}{2}, \quad (3)$$

onde:

$M$  é o número inteiro de comprimento de onda;

$\lambda$  é o valor conhecido do comprimento de onda;

$\Delta\lambda$  é a parte fracionária do comprimento de onda, dada por  $\Delta\lambda = \left(\frac{\phi}{2\pi}\right) \cdot \lambda$ , onde  $\phi$  é o ângulo de fase.

A precisão e acurácia dessa tecnologia está diretamente relacionada com os componentes do sistema, quando há um descompasso temporal na sincronização entre os componentes e esse atraso não é identificado, ocorre um erro na variável analisada. Esse erro se torna mais significativo à medida que cresce a frequência das medições relativas (DALMOLIN; SANTOS, 2003).

### 2.1.3 Técnicas de Levantamento GNSS

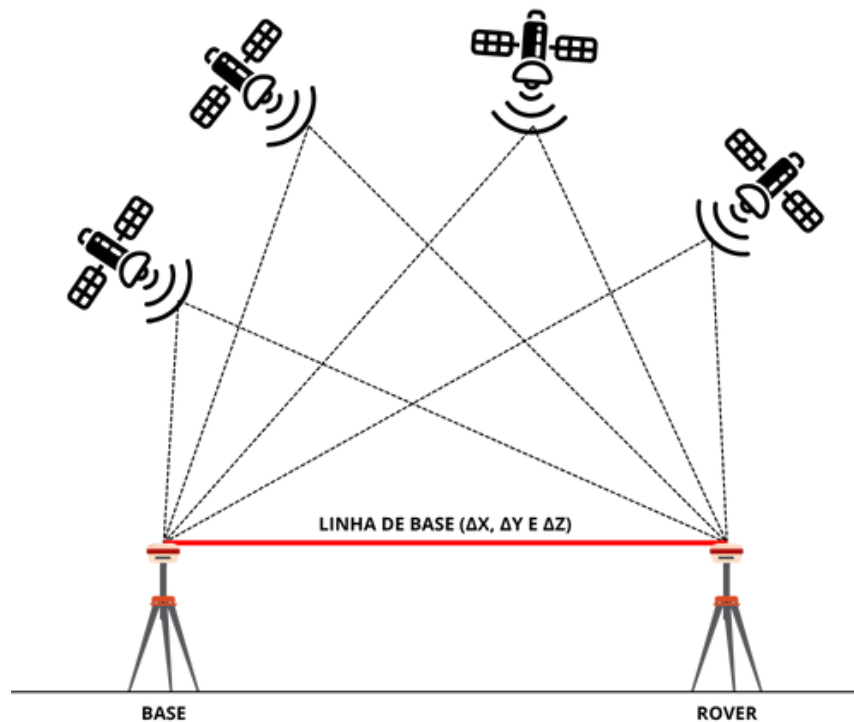
O princípio básico do posicionamento por GNSS é o cálculo das distâncias entre os satélites e o receptor, utilizando dados transmitidos por micro-ondas. Para isso, é necessário, no mínimo, o sinal de quatro satélites (Monico, 2008). Ao longo dos anos, foram desenvolvidos diversos sistemas baseados nesses princípios, sendo o principal deles o NAVSTAR-GPS (Global Positioning System), criado nos Estados Unidos no início dos anos 1970. Esse sistema possui abrangência global e fornece ao usuário o número mínimo de satélites necessário para o posicionamento. Ele é composto por três segmentos principais: Espacial, de Controle e do Usuário (Monico, 2008). De forma similar, outros sistemas de posicionamento foram desenvolvidos, como o GLONASS, da antiga União Soviética; o Galileo, da União Europeia; e mais recentemente o sistema BeiDou/Compass, desenvolvido pela China.

O posicionamento utilizando GNSS pode ser realizado por métodos absolutos ou relativos, seja para objetos em repouso ou em movimento (Monico, 2008). Neste trabalho, foram utilizadas algumas dessas metodologias, que serão abordadas nos tópicos a seguir.

#### 2.1.3.1 Posicionamento Relativo Estático

Esse método baseia-se na observação simultânea de sinais GNSS por dois ou mais receptores durante um intervalo mínimo de 20 minutos até várias horas, sendo um deles fixo (estação base) com coordenadas conhecidas e os demais móveis (*rovers*) cujas coordenadas são incógnitas (Figura 6). A realização de diferenças entre observáveis que neste caso são coletadas simultaneamente, permitem reduzir alguns tipos de erros. A confiabilidade da solução depende do tempo de coleta, pois a mesma somente é obtida após as coordenadas e ambiguidades se estabilizarem, e as observações adicionais contribuem para a solução (Monico, 2008).

FIGURA 6 - POSICIONAMENTO RELATIVO ESTÁTICO



Fonte: O autor (2025).

A metodologia se baseia principalmente no uso da observável de diferença de fase de batimento da onda portadora cuja precisão é maior do que a oferecida pela pseudodistância que também pode ser utilizada de forma isolada ou integrada para se obter melhores resultados. Além disso o uso das pseudodistâncias se torna necessária, pois as mesmas são empregadas no pré-processamento para estimação do erro do relógio do receptor e instante aproximado de transmissão do sinal pelo satélite GNSS (Monico, 2008).

O método permite obter precisão da ordem de 1,0 a 0,1 ppm, porém em casos em que a linha de base seja maior que 15 km recomenda-se a utilização de receptores de dupla frequência (Monico, 2008).

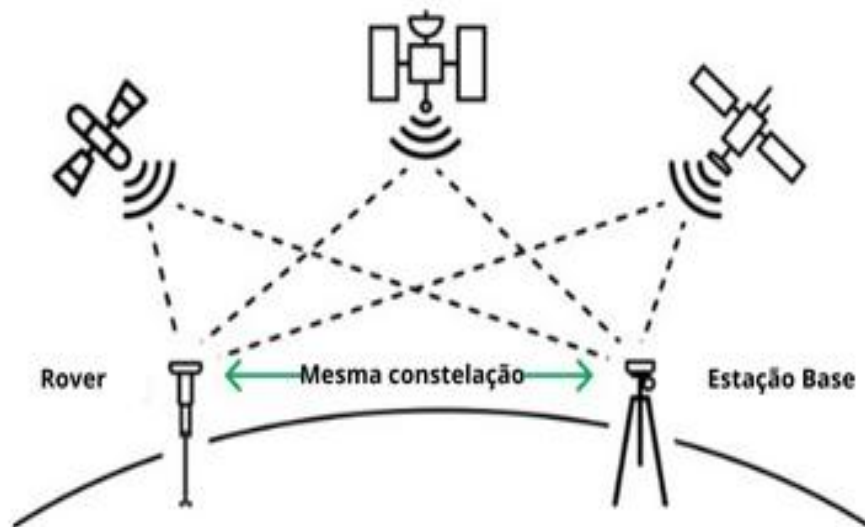
### 2.1.3.2 Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real

O posicionamento relativo cinemático em tempo real é também chamado de RTK (*Real-Time Kinematic*). Trata-se de um método de posicionamento GNSS que permite a obtenção de coordenadas com alta acurácia em tempo real. Essa

metodologia se baseia-se na presença simultânea de uma estação base fixa, localizada em um ponto com coordenadas conhecidas e estáveis, que coleta continuamente dados de posicionamento e os transmite para o receptor móvel (rover) através de um canal de comunicação, como link de rádio, internet ou outras formas de transmissão de dados.

O receptor móvel, equipado com software especializado, realiza o processamento em tempo real dessas informações corrigidas, que incluem as fases dos sinais de satélites, possibilitando a rápida solução das ambiguidades inerentes aos sinais GNSS (Monico, 2008). Esse processo permite obter coordenadas com precisão centimétrica em tempo real, o que é fundamental para aplicações que demandam alta acurácia, como o levantamento topográfico, mapeamento detalhado e modelagem tridimensional (Figura 7).

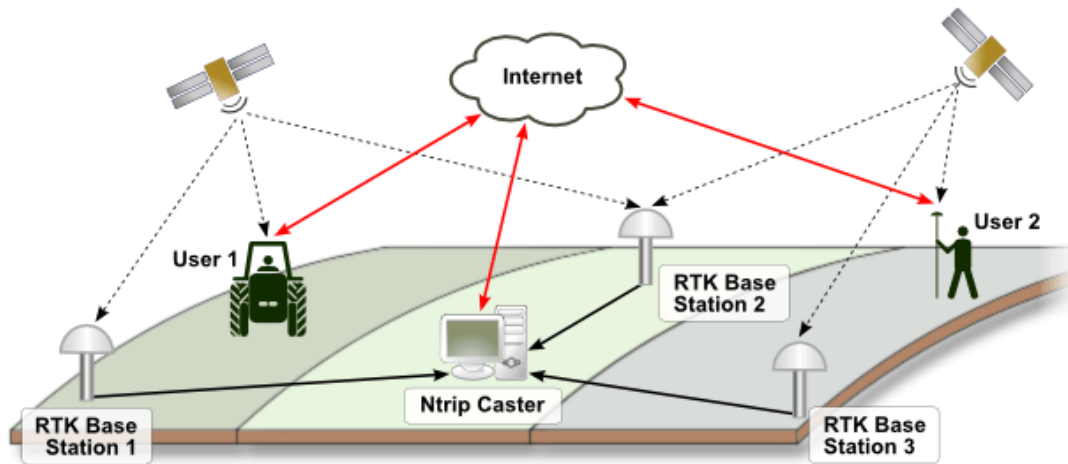
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO LEVANTAMENTO RTK TRADICIONAL



Fonte: Traduzida de PointOne (2024).

Além da utilização do método RTK convencional, existe a possibilidade da utilização dessa metodologia com transmissão de dados em rede, onde o rover recebe dados de correções de uma estação base via internet, como por exemplo de um servidor NTRIP Caster (Figura 8).

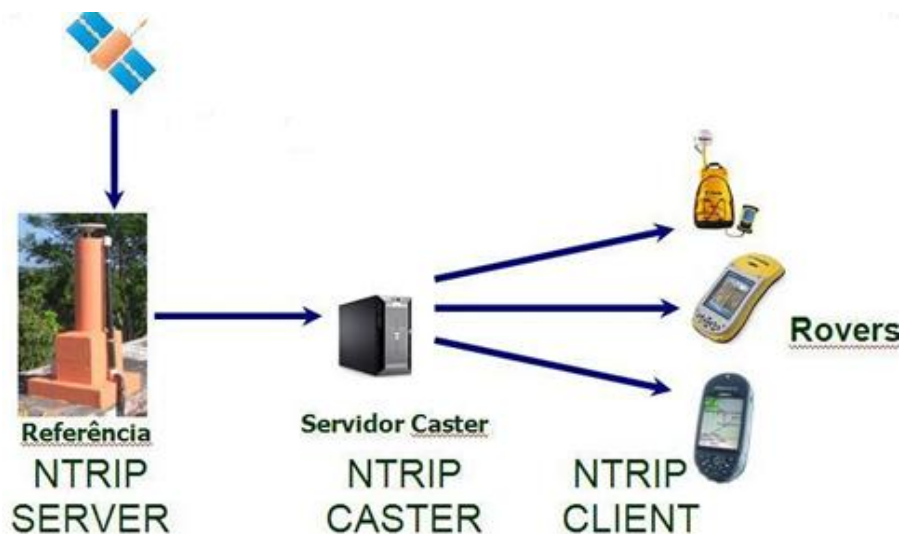
FIGURA 8 - FUNCIONAMENTO DO PROTOCOLO NTRIP EM LEVANTAMENTOS GNSS RTK



Fonte: PIX4D (2025).

O protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) é amplamente utilizado para a transmissão de dados de correção em levantamentos com posicionamento cinemático em tempo real (RTK). Para garantir a precisão desse tipo de levantamento, é necessário que uma estação base, posicionada em um local com coordenadas previamente conhecidas, envie correções em tempo real para um receptor móvel (PIX4D, 2025). É composto por três principais componentes, sendo eles: NTRIP Server, NTRIP Caster e NTRIP Client (Figura 9).

FIGURA 9 - COMPONENTES DO NTRIP



Fonte: COSTA et al., 2008.

A estação base monitora continuamente os sinais dos satélites GNSS, processa essas informações e gera dados de correção, que são transmitidos ao rover em intervalos regulares, geralmente a cada segundo. Com base nessas correções e nos sinais recebidos diretamente dos satélites, o rover consegue calcular sua posição com maior acurácia e precisão.

#### 2.1.4 Acurácia na captura da realidade

Diversos estudos apontam que a acurácia dos modelos tridimensionais gerados é influenciada por fatores como o tipo de dispositivo, o método de captura, as condições do ambiente (interno ou externo), a qualidade do sinal GNSS e a presença ou ausência de pontos de controle no terreno (*Ground Control Point*) (Turner; Lucieer; Watson, 2012; Teo; Yang, 2023; Fortes; Coelho, 2023). A ausência de pontos de controle pode comprometer a acurácia absoluta do modelo, ainda que a precisão relativa entre os pontos internos se mantenha elevada. Qualquer observação que contribua para geração de um modelo tridimensional é afetada por erros. Um erro é definido como a diferença entre um valor obtido em uma medição e o valor verdadeiro ou aceito como correto. Sempre que uma medição é realizada, especialmente de uma grandeza física contínua, como distância, o resultado estará sujeito a certo nível de erro. Esses erros podem ser classificados em erros aleatórios, erros sistemáticos e enganos, conforme definido por Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014). A identificação e mitigação desses erros são fundamentais para garantir a confiabilidade dos dados obtidos, principalmente em aplicações que demandam alta precisão e acurácia.

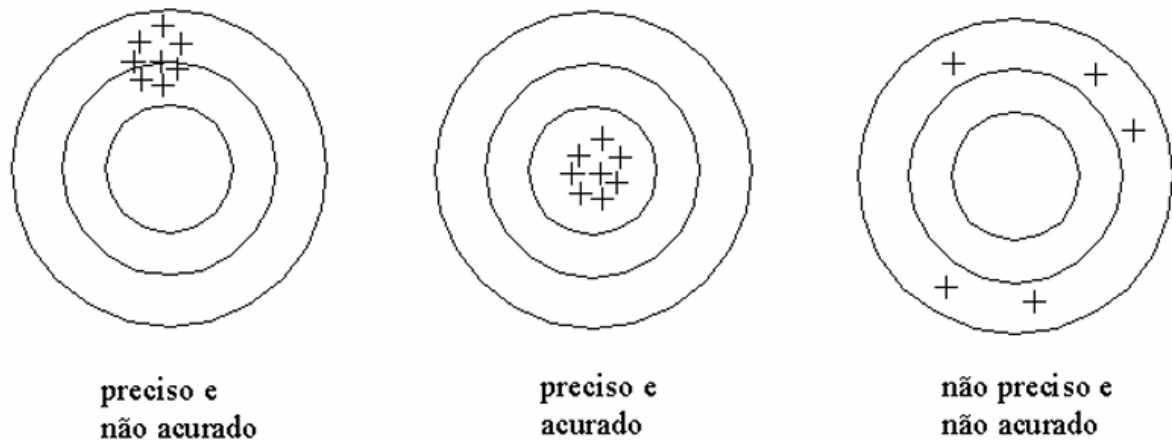
A precisão e a acurácia são dois conceitos fundamentais na avaliação da qualidade de medições, especialmente em estudos que envolvem análise de modelos tridimensionais, como no caso da Fotogrametria e LiDAR. A precisão está relacionada à repetibilidade dos resultados, ou seja, à consistência entre medições sucessivas realizadas sob as mesmas condições. Trata-se de um parâmetro vinculado exclusivamente aos efeitos aleatórios, refletindo o quão próximos estão os valores entre si, independentemente de estarem ou não próximos do valor verdadeiro (Gemael, 2015).

Por outro lado, a acurácia refere-se ao grau de aderência das observações ao valor real, englobando tanto os efeitos aleatórios quanto os sistemáticos. Assim, uma medição pode ser precisa (valores repetidos) sem ser acurada (valores distantes do

real), e vice-versa (Gemael, 2015). Monico et.al (2009) destaca que o termo ‘acurácia’ é a combinação de precisão (erros aleatórios) com tendência (erro sistemático). No caso da tendência poder ser estimada, os resultados podem ser melhorados, aumentando a acurácia dos dados e possibilitando que valores de precisão sejam similares aos de acurácia. Na ausência de um valor de referência para avaliação da tendência, utiliza-se valor de precisão como um indicativo de acurácia, ressaltando que não significa a ausência de tendência, mas apenas o desconhecimento dela.

A distinção simplificada entre esses dois conceitos (Figura 10) é essencial para a interpretação correta dos dados obtidos em levantamentos geométricos e para a avaliação da confiabilidade dos resultados. A compreensão adequada de ambos os parâmetros permite identificar falhas nos métodos de aquisição de dados e orientar melhorias nos processos de medição.

FIGURA 10 - CONCEITOS DE PRECISÃO E ACURÁCIA



Fonte: VEIGA; ZANETTI; FAGGION (2012).

Para avaliar a acurácia de produtos cartográficos gerados por diferentes técnicas de captura da realidade, é comum a utilização de análises realizadas entre pontos homólogos no produto e de referência coletados em campo, porém uma das alternativas a essa metodologia usual é a utilização de medidas de feições lineares (SANTOS et al., 2016). Os pontos de referência podem ser obtidos por métodos topográficos convencionais e servem como base para as dimensões extraídas do modelo digital. A comparação entre as distâncias medidas em campo e aquelas

obtidas no modelo permite quantificar os erros dimensionais, fornecendo uma estimativa objetiva da acurácia geométrica do produto gerado. Dessa forma, esse procedimento oferece uma alternativa para verificar se o modelo produzido está coerente com os valores de referência obtidos por métodos consolidados, como a Topografia convencional. Com a definição de pontos coletados no produto cartográfico e homólogos em campo (Valores de referência), define-se vetores e então calcula-se as discrepâncias posicionais horizontais ( $D_H$ ), vertical ( $D_V$ ) ou inclinadas ( $D_I$ ). Isso é possível a partir das seguintes equações:

$$D_H = \sqrt{(X_M - X_R)^2 + (Y_M - Y_R)^2}, \quad (4)$$

$$D_V = Z_M - Z_R, \quad (5)$$

$$D_I = \sqrt{(X_M - X_R)^2 + (Y_M - Y_R)^2 + (Z_M - Z_R)^2}, \quad (6)$$

onde:

$X_M$ ,  $Y_M$  e  $Z_M$  são coordenadas medidas no modelo;

$X_R$ ,  $Y_R$  e  $Z_R$  são coordenadas de referência;

O uso do cálculo de distâncias entre pares de pontos é uma metodologia eficaz para a avaliação da acurácia posicional de nuvens de pontos. Segundo Gonçalves e Albarici (2024), essa abordagem foi aplicada para comparar modelos tridimensionais gerados por sensores LiDAR incorporados em smartphones com medidas de referência obtidas por levantamento topográfico com estação total. Ressalta-se que, neste estudo, não foram utilizados dados GNSS; a nuvem de pontos foi importada para o software *CloudCompare*, onde foi alinhada com pontos de controle topográficos previamente medidos. Os autores destacam que os resultados apresentaram uma acurácia média de aproximadamente 2 cm, com discrepâncias geralmente inferiores a 8,5 cm, o que evidencia a viabilidade do uso desses dispositivos em aplicações na engenharia e nas geociências.

O padrão brasileiro de acurácia posicional é regulamentado pelo Decreto-lei nº 89.817/1984, que estabelece critérios para a avaliação da precisão em dados espaciais, tradicionalmente focados no uso de feições pontuais como referência (Santos et al., 2015). Esses critérios foram atualizados nas normas técnicas mais recentes, como a ET-ADGV, que introduziu o Padrão de Exatidão Cartográfica para

Produtos Digitais (PEC-PCD), mais adequado às demandas dos produtos digitais. Embora essa abordagem seja amplamente adotada, o uso de métodos baseados em feições lineares surge como uma alternativa promissora para o controle de qualidade posicional.

## 2.2 INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA MODELAGEM 3D

Com os avanços recentes na tecnologia de sensoriamento remoto, na miniaturização de sensores e na popularização de sistemas GNSS embarcados, tornou-se cada vez mais viável a integração de diferentes métodos de aquisição de dados geoespaciais em dispositivos móveis. No contexto da modelagem tridimensional, a combinação de LiDAR, Fotogrametria e GNSS tem se mostrado uma abordagem promissora, unindo a precisão geométrica do LiDAR, a riqueza de texturas e detalhes visuais da Fotogrametria e dados georreferenciados com acurácia proporcionada pelo GNSS.

Miranda Neto et al. (2023), abordam o uso do escaneamento a laser (LIDAR) e da Fotogrametria como técnicas distintas de captura da realidade, destacando suas vantagens. Enfatiza que a integração dessas técnicas proporciona a rapidez e precisão do LiDAR com a riqueza de detalhes da Fotogrametria, utilizando a fusão de sensores, muitas vezes por meio de drones, para criar representações tridimensionais altamente detalhadas de ambientes complexos. Foi realizada uma avaliação comparativa da captura da realidade utilizando modelos obtidos por meio do método de nuvem de pontos gerada pela integração das metodologias, comparando-os com modelos de modelos tradicionais ou de outras técnicas, como a modelagem paramétrica manual. O estudo conclui que tanto o escaneamento a laser (LiDAR) quanto a Fotogrametria oferecem vantagens específicas, sendo a combinação apresentada como uma abordagem promissora para obter modelos tridimensionais com alto nível de precisão e detalhe. O trabalho evidencia que essa integração pode superar as limitações de cada método individual, contribuindo para uma melhor representação da realidade em projetos de infraestrutura, como usinas e subestações elétricas.

O aplicativo PIX4Dcatch se apresenta como uma alternativa que permite a coleta e o processamento em tempo real de dados de nuvem de pontos gerados pelo sensor LiDAR integrado ao smartphone. Embora essa nuvem forneça uma visualização

preliminar, um pós-processamento é realizado para a obtenção de uma nuvem de pontos de alta resolução. Essa melhoria é possível graças à integração dos dados LiDAR com imagens adicionais captadas pela câmera do dispositivo móvel (Suleymanoglu et al., 2023).

Além disso, a integração do dispositivo com um rover Emlid Reach RX (Figura 11) possibilita o georreferenciamento dos modelos tridimensionais capturados, ou seja, o posicionamento em tempo real utilizando técnicas RTK convencionais ou em rede (NTRIP).

FIGURA 11 - OPERAÇÃO PIX4DCATCH

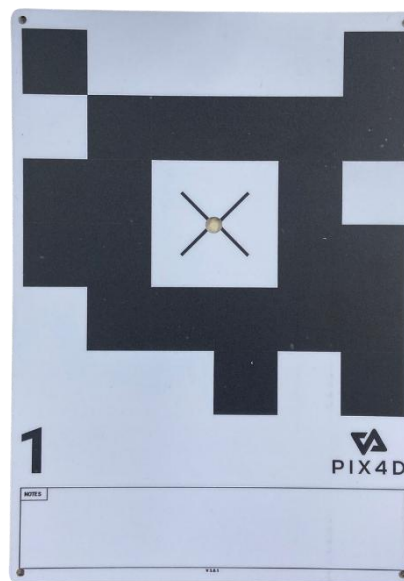


Fonte: PIX4D (2023)

O funcionamento do aplicativo baseia-se na captura de imagens por meio da câmera do dispositivo enquanto o usuário se movimenta ao redor do objeto ou da área de interesse. Em dispositivos móveis compatíveis, como iPhones equipados com sensor LiDAR ou smartphones Android com sensor *Time-of Flight*, o aplicativo também captura informações de profundidade, o que enriquece a reconstrução tridimensional, especialmente em superfícies com baixa textura, como paredes lisas ou solos homogêneos. Durante a coleta, o aplicativo fornece resposta visual em tempo real, orientando o usuário sobre a cobertura dos dados e evitando falhas na captura (PIX4D, 2021).

Somado a isso, o aplicativo PIX4Dcatch oferece uma funcionalidade avançada que permite a realização do levantamento de pontos diretamente no campo, dispensando a necessidade de um pós-processamento, podendo ou não ser utilizado pelo usuário. Essa abordagem é possível graças à identificação automática das chamadas *AutoTags*, componentes físicos que acompanham o kit do sistema (Figura 12).

FIGURA 12 - MODELO DE AUTOTAGS



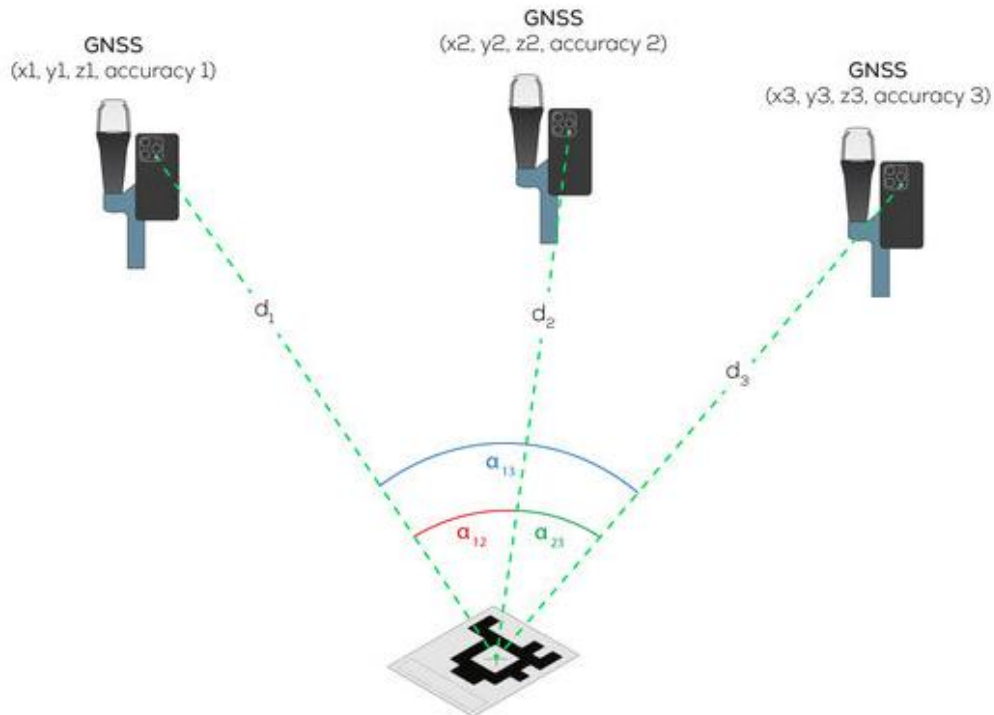
Fonte: O autor (2025)

Cada vez que o dispositivo reconhece uma *AutoTag* em uma imagem, é feito o registro da posição geográfica do ponto utilizando os dados do rover GNSS, que opera com correção RTK para garantir alta acurácia no posicionamento. Paralelamente, o sensor LiDAR integrado ao dispositivo calcula uma estimativa da distância entre o centro perspectivo da câmera e o ponto correspondente à *Tag*, contribuindo para a modelagem tridimensional do objeto ou área estudada. Essa integração entre sensoriamento ativo (LiDAR), posicionamento GNSS em tempo real e processamento fotogramétrico garante um levantamento rápido, acurada e eficiente, fundamental para aplicações em Topografia, engenharia e monitoramento ambiental.

A figura 13 demonstra a configuração de um levantamento baseado em um dispositivo móvel, onde cada imagem capturada na qual uma *AutoTag* é detectada possui a sua própria posição GNSS, e o LiDAR do iPhone fornece uma estimativa da distância entre o centro da câmera e o ponto de levantamento. Além disso, a detecção

da AutoTag nas imagens fornece ângulos relativos e distâncias via triangulação fotogramétrica (Strecha et al., 2025).

FIGURA 13 - LEVANTAMENTO COM PIX4DCATCH E AUTOTAGS



Fonte: STRECHA et al. (2025).

Dessa forma, o uso das *AutoTags* no PIX4Dcatch promove maior agilidade no fluxo de trabalho, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade dos dados coletados em campo, especialmente em ambientes onde o acesso para medições tradicionais é limitado ou trabalhoso. Essa abordagem não será aplicada neste trabalho, pois o mesmo tem como objetivo demonstrar o comportamento do modelo na forma mais simples de uso.

Outro ponto que deve ser destacado na utilização de equipamentos é a atenção a boas práticas de utilização para garantir o bom funcionamento e qualidade dos modelos gerados. A fabricante PIX4D aconselha que na captura de estoques, torna-se importante caminhar levemente em torno do objeto, mantendo o dispositivo em um ângulo constante para capturar os detalhes sem comprometimento do modelo final. Nas superfícies planas deve-se evitar curvas fechadas e movimentos bruscos, preferindo trajetos lineares com viradas suaves e com o dispositivo levemente

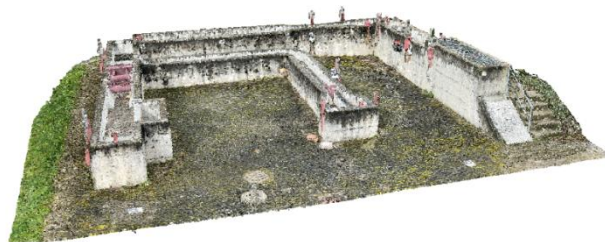
inclinado, nunca apontado diretamente abaixo, especialmente em casos de utilização do RKT. Na captura de declives, é importante caminhar paralelamente à inclinação, com dispositivo ligeiramente inclinado para frente, garantindo que todo o relevo esteja no campo de visão. A fabricante aborda também sobre sua utilização para digitalização de estruturas, onde deve-se caminhar em volta da construção em movimento circular, mantendo o ângulo do aparelho fixo e, se necessário, realizar múltiplas passagens com variações de altura e ângulo para obter uma cobertura completa e evitar duplicações. Esses cuidados no uso do equipamento são fundamentais para capturas eficazes e resultados confiáveis na Fotogrametria terrestre. Após a aquisição, os dados podem ser processados em softwares como o PIX4Dmatic, onde são convertidos em modelos tridimensionais (Figuras 14 e 15).

FIGURA 14 - MODELO TRIDIMENSIONAL (SUPERFÍCIE)



Fonte: PIX4D (2025).

FIGURA 15 - MODELO TRIDIMENSIONAL (CONSTRUÇÕES)



Fonte: PIX4D (2025).

Nos últimos anos, o uso de ferramentas comerciais para modelagem tridimensional de afloramentos e relevo tem se tornado cada vez mais comum entre geocientistas. Contudo, a acurácia dessas tecnologias muitas vezes é aceita sem uma validação específica para cada local de estudo, o que pode comprometer os resultados (CORRADETTI et al., 2023). O estudo de Corradetti et al. (2023) destacou que, apesar dos avanços em dispositivos móveis, como o iPhone 13 Pro com sensor LiDAR, erros significativos ainda podem ocorrer, impactando a confiabilidade dos dados obtidos. Neste estudo, foi avaliada a acurácia de diferentes métodos para geração de modelos 3D em geociências, incluindo Fotogrametria aérea e terrestre, além do sensor LiDAR do iPhone 13 Pro com os aplicativos 3D Scanner App e PIX4Dcatch. A coleta de dados ocorreu em uma vala de 20 metros de largura, seguida pelo processamento em softwares especializados para gerar modelos georreferenciados. A análise comparativa revelou que, embora existam erros inerentes a cada método, o PIX4Dcatch apresentou os melhores resultados em termos de escala e orientação dos modelos. No entanto, o trabalho ressaltou que o aplicativo PIX4Dcatch apresentou resultados promissores, gerando nuvens de pontos, com dimensões e proporções compatíveis com o ambiente real bem como orientadas, com georreferenciamento consistente, o que reforça o potencial dessa ferramenta para aplicações geocientíficas. Tendo em vista essas conclusões, o presente estudo busca aprofundar a avaliação da acurácia dimensional dos modelos gerados pelo PIX4Dcatch, complementando e ampliando as análises previamente realizadas.

No estudo de Büyükmiççi, Akşehirlioğlu e Koca (2023), o Ali Cafer Kumbet, localizado em Kayseri, foi capturado com o aplicativo PIX4DCatch em um dispositivo iOS com sensor LiDAR. Os autores destacam que o levantamento de dados realizado com o aplicativo e uma antena ViDOC RTK é eficiente para estruturas de pequena escala, graças ao seu baixo custo, mobilidade, simplicidade no fluxo de trabalho. No entanto, sua aplicação em edifícios de médio e grande porte pode ser limitada, sendo recomendada a utilização complementar de equipamentos como o LiDAR aéreo para estruturas altas e complexas. Também é ressaltado que a grande quantidade de pontos gerados requer uma limpeza detalhada da nuvem de pontos, para a qual o aplicativo PIX4Dcatch pode ser utilizado, e que o processamento dos dados se beneficia do uso de computadores de alto desempenho. Esses aspectos demonstram a importância da escolha adequada dos métodos de captura da realidade de acordo com as características da área ou estrutura a ser estudada.

O presente trabalho busca contribuir para essa discussão, avaliando a acurácia dimensional do PIX4Dcatch em um contexto específico de levantamento geoespacial.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados para a execução deste trabalho. Serão descritos os equipamentos, softwares e técnicas aplicadas na coleta, processamento e análise dos dados, buscando garantir o correto entendimento das etapas realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 MATERIAIS

Para realização deste trabalho, foram utilizados equipamentos e softwares que possibilitaram a coleta e análise de dados com foco na avaliação da acurácia dimensional de modelos tridimensionais gerados a partir do dispositivo móvel. São detalhados os instrumentos utilizados no contexto do PIX4Dcatch, bem como aqueles necessários para o levantamento topográfico e geodésico, com o objetivo de obtenção das medidas de referência. Ressalta-se que todos os materiais e equipamentos empregados na pesquisa foram cedidos pelo CEPAG-UFPR e pela empresa Guandalini Posicionamento, que disponibilizaram os recursos necessários para viabilizar a realização do presente trabalho. A listagem dos equipamentos está disponível abaixo:

- 1 Receptor GNSS Emlid Reach RX (Figura 16): Rover que opera em rede, compatível com serviços NTRIP para correções em tempo real. Suporta o protocolo RTCM3. (<https://www.guandalinibr.com/produtos/receptor-gnss/gnss-emlid-reach-rx/>)

FIGURA 16 - EMLID REACH RX



Fonte: Emlid Store

- Iphone 15 Pro Max (Figura 17): Smartphone utilizado como ferramenta de aquisição de dados e imagens em campo. Equipado com sistema de câmeras avançado (incluindo sensor LiDAR e compatibilidade com aplicações de mapeamento e Fotogrametria. (<https://www.apple.com/br/iphone/compare/?modelList=iphone-15-pro-max,iphone-15-plus>)

FIGURA 17 - IPHONE 15 PRO MAX



Fonte: Apple Inc.

- Reach RS2 (Emlid) (Figura 18): Receptor GNSS multifrequencial de dupla banda (L1/L2) com suporte aos principais sistemas de navegação por satélite (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou). (<https://www.guandalinibr.com/produtos/receptor-gnss/gps-emlid-reach-rs2/>)

FIGURA 18 - EMLID REACH RS2



Fonte: Emlid Store

- Sanding Arc 5 Pro (Figura 19): Estação total eletro-óptica utilizada para levantamentos topográficos com alta precisão. ([https://www.sandinginstrument.com/en/product\\_con.html?top=&c=FlagshipTS&short\\_url=Arc5PRO](https://www.sandinginstrument.com/en/product_con.html?top=&c=FlagshipTS&short_url=Arc5PRO))

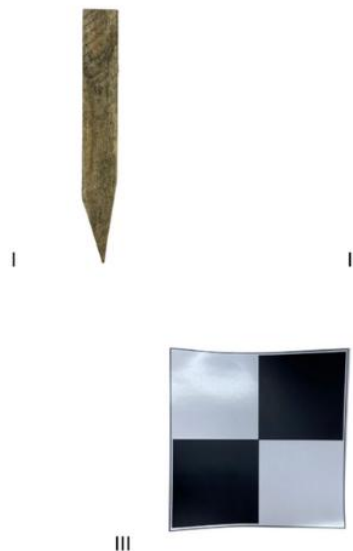
FIGURA 19 - SANDING ARC 5 PRO



Fonte: Sanding Optic-Electrics Instrument CO., LTD

- Materialização dos pontos (Figura 20): Para a materialização dos pontos de levantamento, foram utilizados três tipos de marcadores adequados às características do terreno e do ambiente:
  - Piquete de Madeira (Figura 20 – I): fixado diretamente no solo, garantindo fácil identificação e estabilidade;
  - Parafuso (Figura 20 – II): colocado em calçadas, proporcionando maior durabilidade em áreas urbanas pavimentadas;
  - Alvo adesivo 10x10 cm (Figura 20 – III): fixado em paredes, facilitando a identificação visual dos pontos em superfícies verticais onde a fixação permanente era necessária.

FIGURA 20 - MATERIALIZAÇÃO DOS PONTOS



Fonte: O autor (2025)

- GTOPO (Figura 21): Permite processar arquivos de observações estáticas e cinemáticas tanto da base quanto do rover, integrando dados RTK e pós-processados para maior precisão. (<http://gtopo.guandalinibr.com/>)

FIGURA 21 - SOFTWARE GTOPO



Fonte: Guandalini Posicionamento (2025)

- PIX4Dcatch (Figura 22): Aplicativo móvel utilizado para aquisição de imagens e dados espaciais com sensores de smartphones e tablets. Permite a captura de imagens georreferenciadas com auxílio de sensores LiDAR (quando disponíveis) e GNSS, gerando automaticamente trilhas de coleta e visualização em tempo real. (<https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dcatch/>)

FIGURA 22 - APLICATIVO PIX4DCATCH



PIX4D**catch**

Fonte: Pix4D SA (2025)

- PIX4Matic (Figura 23): Software de Fotogrametria avançada desenvolvido para o processamento eficiente de grandes volumes de imagens, especialmente provenientes de drones e dispositivos móveis com sensores LiDAR. (<https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dmatric-large-scale-fotogrametria-software/>)

FIGURA 23 - SOFTWARE PIX4DMATIC



Fonte: Pix4D SA (2025)

- Microsoft Excel (Figura 24): Software de planilha eletrônica utilizado para organização, análise e visualização de dados. É empregado para o pré-processamento e análise de dados coletados em campo, como coordenadas, elevações e atributos descritivos, além de facilitar a integração com outros softwares por meio de formatos compatíveis como CSV e XLSX.

FIGURA 24 - SOFTWARE EXCEL



Fonte: Microsoft (2025)

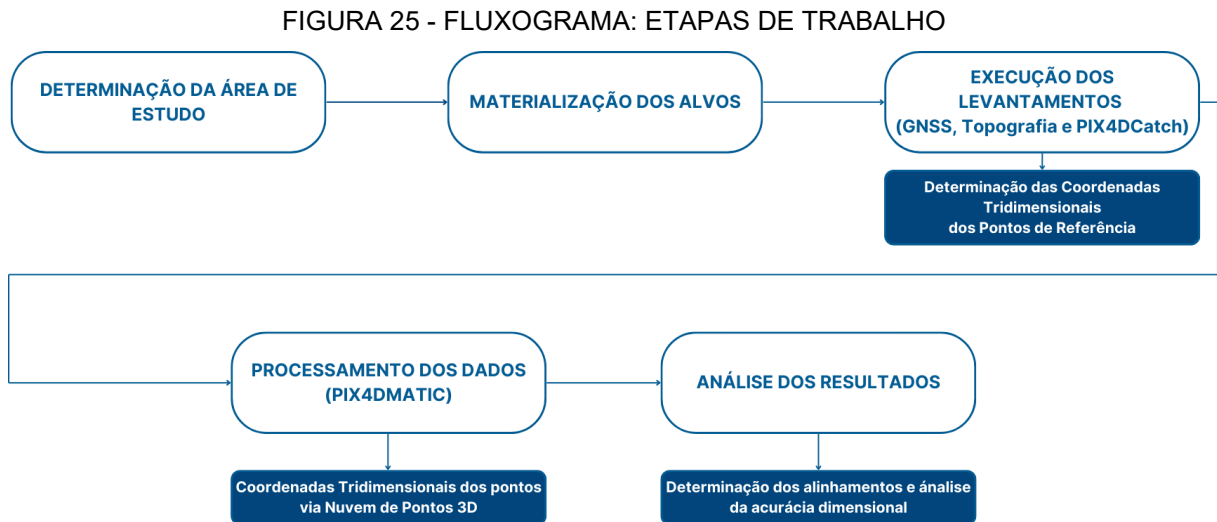
Serviços utilizados:

- RBMC-IP - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16332-rbmc-ip-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-em-tempo-real.html>

### 3.2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em etapas, com o objetivo de permitir a coleta, o processamento e a análise dos dados de forma organizada e coerente com os objetivos propostos. Inicialmente, foi realizada a definição de um campo de testes, materializados os pontos, captura dos dados por meio do aplicativo PIX4Dcatch, seguida da obtenção de dados de referência por levantamento topográfico. Em seguida, os dados foram processados e comparados, conforme descrito nos tópicos a seguir e na ilustração abaixo (Figura 25).

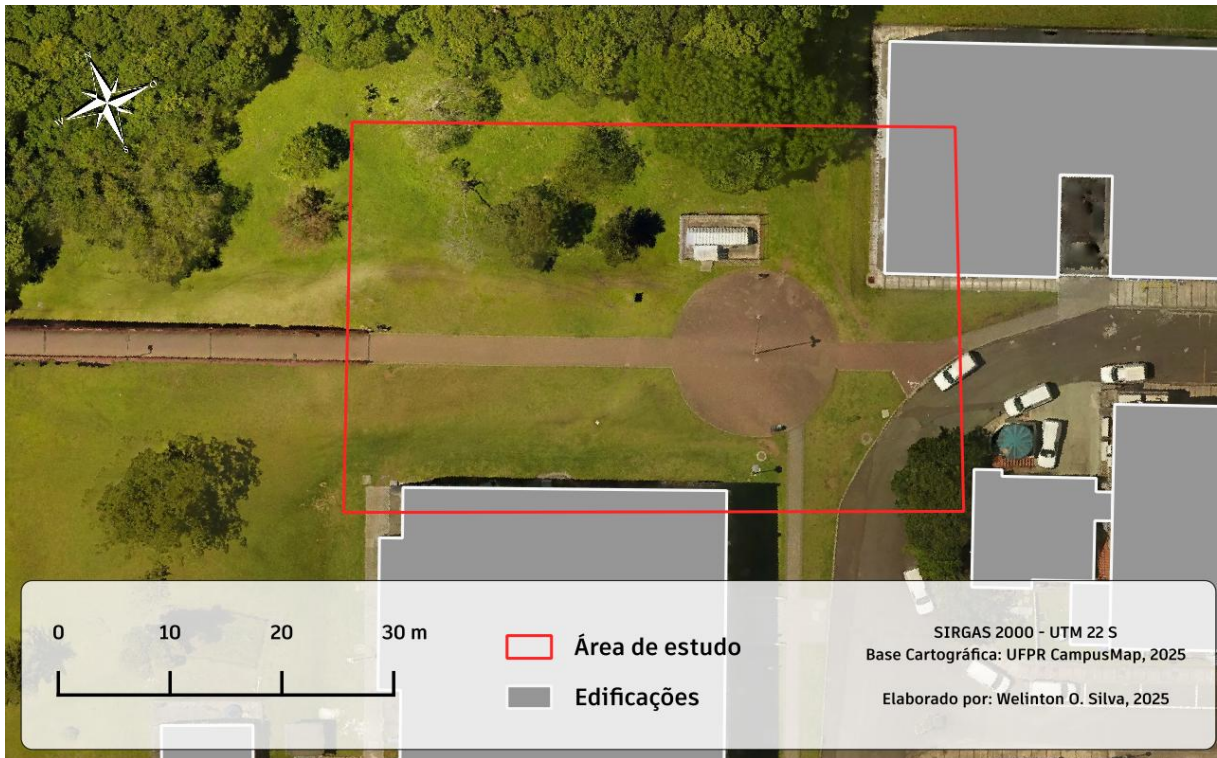


Fonte: O autor (2025)

#### 3.2.1 Área de Estudo e Materialização dos Pontos

A área selecionada para este trabalho está localizada no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), próximo aos edifícios de engenharia de bioprocessos e biotecnologia e engenharia química (Figura 26). Embora o fabricante do Pix4Dcatch recomende a captura de dados em ambientes amplos e totalmente abertos para garantir maior precisão, optou-se por um local com características mais desafiadoras, apresentando detalhes de calçamento, relevo variável e paredes que possibilitam a fixação de pontos de controle. Essa escolha permite avaliar o desempenho e a acurácia dimensional dos modelos 3D gerados em condições reais e menos ideais.

FIGURA 26 - ÁREA DE ESTUDO



Fonte: O autor (2025)

Um diferencial importante é a proximidade, de aproximadamente 350 metros, de uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo de GNSS (RBMC-IBGE), especificamente a 93970 – UFPR ([https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rbmc/relatorio/Descritivo\\_UFPR.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/relatorio/Descritivo_UFPR.pdf)), o que facilita a utilização do serviço NTRIP no kit Pix4Dcatch para correção em tempo real dos dados GNSS devido a curta distância de linha de base, ideal para minimizar erros relativos ao processo de rastreamento utilizando esse serviço, contribuindo para uma melhoria na precisão centimétrica dos posicionamentos capturados, mesmo em um ambiente considerado não ideal pelo fabricante (Figura 27).

FIGURA 27 - DISTÂNCIA RBMC E ÁREA DE ESTUDO



Fonte: O autor (2025)

Para a realização dos levantamentos, foram materializados 15 pontos de controle (Tabela 1), distribuídos estrategicamente de modo a abranger diferentes planos e elevações da cena.

TABELA 1 - PONTOS MATERIALIZADOS

Nº	Ponto	Fixação	Materialização
1	T1	Solo	Piquete Madeira
2	T2	Solo	Piquete Madeira
3	P01	Solo	Parafuso Metálico
4	P02	Solo	Parafuso Metálico
5	P03	Solo	Piquete Madeira
6	P04	Solo	Piquete Madeira
7	P05	Solo	Parafuso Metálico
8	P06	Solo	Piquete Madeira
9	P07	Solo	Piquete Madeira
10	P08	Solo	Parafuso Metálico
11	P09	Solo	Piquete Madeira
12	PR1	Parede	Alvo Adesivo
13	PR2	Parede	Alvo Adesivo
14	PR3	Parede	Alvo Adesivo
15	PR4	Parede	Alvo Adesivo

Fonte: O autor (2025)

Do total de pontos, dois foram destinados ao apoio topográfico, sendo utilizados como base (estação – T2) e orientação (ré – T1) para o posicionamento e irradiação dos demais pontos com o uso de estação total.

Quatro pontos foram fixados nas paredes das edificações, utilizando alvos adesivos de 10x10 cm (Figura 28), permitindo a detecção precisa por sensores ópticos e LiDAR do dispositivo utilizado com o aplicativo PIX4Dcatch. A posição elevada e vertical desses pontos teve como objetivo verificar a acurácia do modelo em superfícies verticais e inclinadas, que representam desafios típicos em reconstruções 3D.

FIGURA 28 - ALVOS ADESIVOS FIXADOS



Fonte: O autor (2025)

Os nove pontos restantes foram instalados no solo, utilizando piquetes de madeira cravados no terreno e parafusos metálicos fixados em áreas de calçamento (Figura 29 e 30), garantindo estabilidade e visibilidade para os métodos de mensuração topográfica, valores utilizados com referência posteriormente. Os pontos no solo foram posicionados em diferentes distâncias e ângulos (Figura 31), compondo alinhamentos que serviram posteriormente como base para os cálculos de acurácia dimensional, considerando diferentes dimensões métricas de feições.

FIGURA 29 - PIQUETES DE MADEIRA



Fonte: O autor (2025)

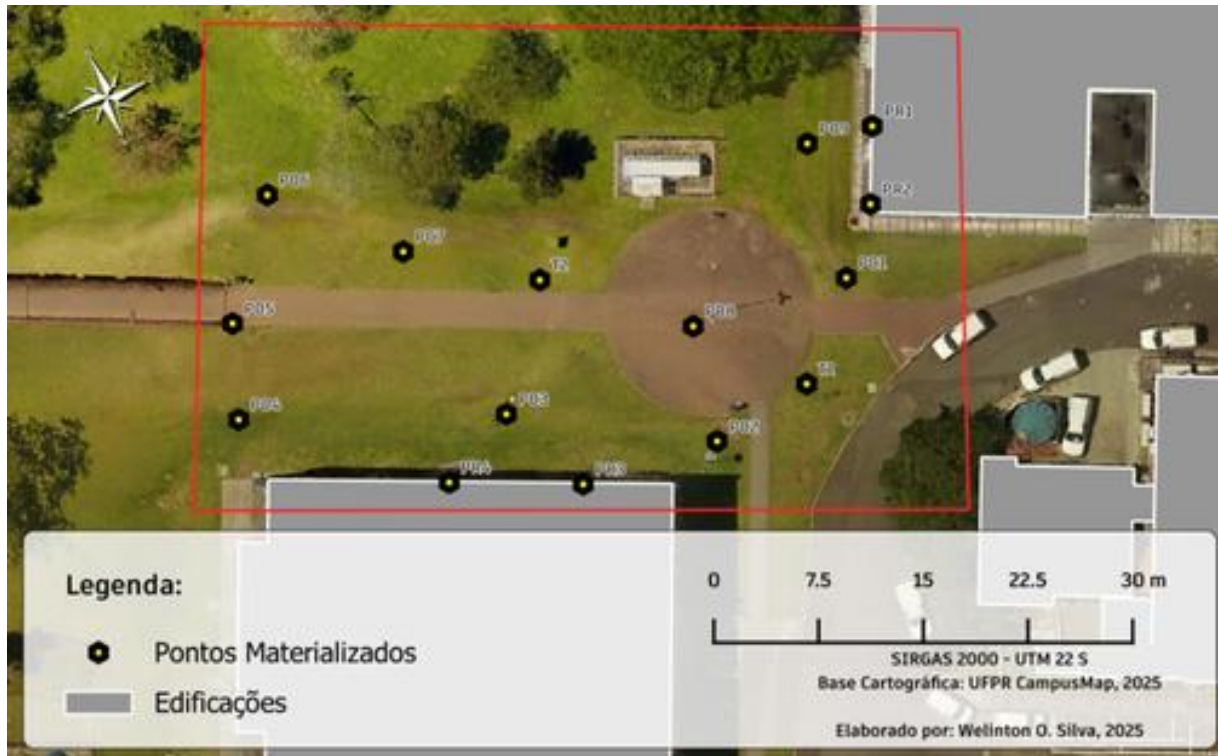
FIGURA 30 - PARAFUSOS METÁLICOS



Fonte: O autor (2025)

A escolha dos materiais de marcação buscou garantir durabilidade, visibilidade e compatibilidade com os diferentes métodos de medição, assegurando o uso dos mesmos alvos tanto na coleta topográfica convencional quanto no escaneamento com o dispositivo móvel.

FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS



Fonte: O autor (2025)

### 3.2.2 Levantamento GNSS

A etapa de levantamento de dados GNSS foi necessária para a implantação de dois pontos denominados T1 e T2, cujas coordenadas foram utilizadas para a orientação da estação total e posterior irradiação dos demais pontos empregados no trabalho. Foi utilizado um receptor multifrequência Emlid Reach RS2, configurado para registrar dados brutos dos observáveis GNSS durante 30 minutos, com o objetivo de realizar o pós-processamento estático para obtenção de coordenadas tridimensionais com qualidade milimétrica. Esse processamento foi realizado no software GTOPO, utilizando os dados da estação 93970 – UFPR da RBMC com intervalos de 1 e 15 segundos. Nessa etapa, os dados da estação foram definidos como base, enquanto os dados coletados na área de estudo foram configurados como rover. Foi adotada uma máscara de elevação de 15°, e, ao final de ambos os processamentos, obteve-se uma solução FIX para o vetor de ambiguidades, indicando que as ambiguidades de fase foram resolvidas com sucesso durante o pós-processamento.

Simultaneamente, também foram coletados dados em tempo real por meio do método RTK via NTRIP. As coordenadas tridimensionais foram determinadas a partir

da média aritmética (equações 7, 8 e 9) e análise do desvio padrão (equação 10) dos resultados obtidos pelos três métodos, estratégia que contribui para reduzir possíveis erros pontuais e aumentar a confiabilidade do posicionamento final.

$$X_P = \frac{X_{NTRIP} + X_{PP15s} + X_{PP1s}}{3}, \quad (7)$$

$$Y_P = \frac{Y_{NTRIP} + Y_{PP15s} + Y_{PP1s}}{3}, \quad (8)$$

$$Z_P = \frac{Z_{NTRIP} + Z_{PP15s} + Z_{PP1s}}{3}, \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (10)$$

onde:

$X_P, Y_P$  e  $Z_P$  são as coordenadas finais UTM tridimensionais dos pontos;

$X_{NTRIP}, Y_{NTRIP}$  e  $Z_{NTRIP}$  são as coordenadas UTM tridimensionais coletadas em tempo real por RTK (NTRIP);

$X_{PP15}, Y_{PP15}$  e  $Z_{PP15}$  são as coordenadas UTM tridimensionais obtidas do pós processamento estático com dados de 15";

$X_{PP1}, Y_{PP1}$  e  $Z_{PP1}$  são as coordenadas UTM tridimensionais obtidas do pós processamento estático com dados de 1";

$S$  desvio padrão das observações;

$x_i$  cada valor do conjunto de dados;

$\bar{x}$  média dos valores;

$n$  número total de valores.

O uso de diferentes técnicas para o cálculo das coordenadas foi adotado com o objetivo de representar de forma mais realista a variabilidade dos resultados. Concluída a etapa de obtenção das coordenadas dos pontos de apoio por meio dos métodos GNSS, foi possível avançar para a próxima fase do trabalho, voltada ao levantamento topográfico.

### 3.2.3 Levantamento Topográfico

A etapa de levantamento topográfico foi realizada com o objetivo de obter as coordenadas tridimensionais dos pontos de controle que, posteriormente, foram

utilizados para comparação com a nuvem de pontos gerada no modelo 3D pelo aplicativo PIX4Dcatch.

Para isso, utilizou-se uma estação total Sanding 5 ARC Pro, devidamente instalada e nivelada sobre o ponto T2 (Figura 32), previamente determinado na etapa descrita no item 3.2.2. A orientação da estação foi realizada a partir do ponto T1, garantindo o referenciamento adequado da estação.

FIGURA 32 - INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO TOTAL



Fonte: O autor (2025)

A obtenção das coordenadas tridimensionais foi realizada com o método de irradiação, sendo realizadas leituras de pares conjugados, isto é, pontaria direta (PD) e inversa (PI) em um miniprisma instalado em um bipé (Figura 33), cuja altura foi definida como 1,775 metros. A utilização de leituras por pares conjugados teve como objetivo aumentar a redundância das informações coletadas, sendo a coordenada final definida como a média entre as duas leituras.

FIGURA 33 - BIPÉ COM MINIPRISMA



Fonte: O autor (2025)

A estação total utilizada possui a funcionalidade de realizar mensurações sem a necessidade de prisma, recurso que foi empregado para os pontos fixados nas paredes por meio de alvos adesivos (Figura 34). Nesses alvos, aplicou-se a mesma técnica de observações conjugadas, pontaria direta (PD) e pontaria inversa (PI), para a determinação com precisão das coordenadas tridimensionais. A definição de cada componente das coordenadas finais (Este, Norte e Altitude) é dada pela seguinte relação (equação 11):

$$C_{final} = \frac{C_{PD} + C_{PI}}{2}, (11)$$

onde:

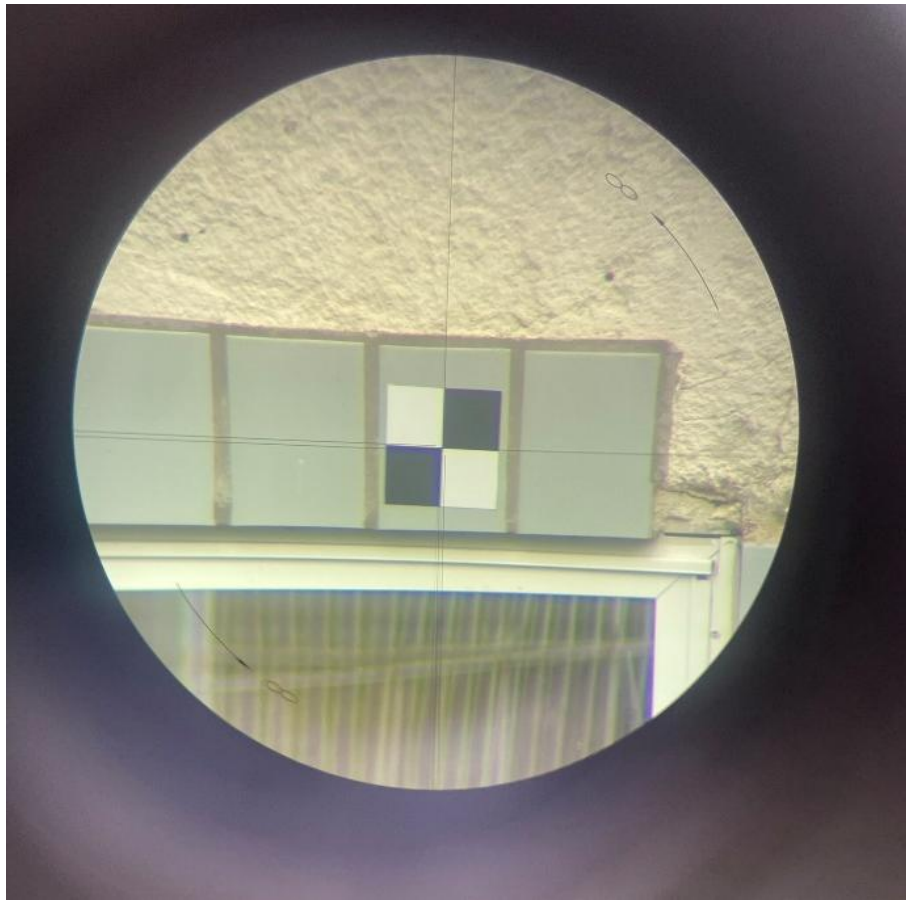
$C_{final}$  coordenada definitiva;

$C_{PD}$  coordenada obtida pela pontaria direta;

$C_{PI}$  coordenada obtida pela pontaria inversa.

Essa abordagem visa manter a consistência metodológica e garantir maior confiabilidade nos dados obtidos, especialmente em pontos de difícil acesso onde o uso do prisma convencional seria inviável ou impreciso.

FIGURA 34 - VISADA DE ALVO ADESIVO



Fonte: O autor (2025)

#### 3.2.4 Levantamento LiDAR, GNSS e Fotogramétrico utilizando o PIX4Dcatch

O levantamento com o aplicativo PIX4Dcatch foi realizado utilizando um dispositivo móvel compatível com sensor LiDAR, aliado ao receptor GNSS Emlid Reach RX. Inicialmente, foi realizada a montagem do kit PIX4DCath (Figura 35) e configurado o sistema de referência no aplicativo como SIRGAS 2000 – UTM zona 22 Sul, assegurando a compatibilidade com os demais dados geoespaciais do projeto. Em seguida, foi estabelecida a conexão entre o PIX4Dcatch e o *rover* GNSS externo via bluetooth, possibilitando a configuração do protocolo NTRIP para a obtenção de correções em tempo real (RTK). Foi adotada uma metodologia de trabalho sem aplicação de recursos adicionais como, pontos de controle e RTK convencional.

FIGURA 35 - CONFIGURAÇÃO DO PIX4DCATCH



Fonte: O autor (2025)

Antes do início das aquisições, foi aguardada a obtenção da solução fixa (FIX), garantindo que os dados oriundos tivessem a melhor qualidade possível em tempo real. A coleta foi então iniciada com base no alcance e nas condições ideais de varredura do sensor LiDAR do dispositivo, seguindo as boas práticas indicadas pelo fabricante, inclinando levemente o dispositivo para baixo e nos casos de declives alterando o ângulo para garantir o campo de visão do dispositivo. A figura 36 mostra as linhas de coletas formadas ao fim da coleta.

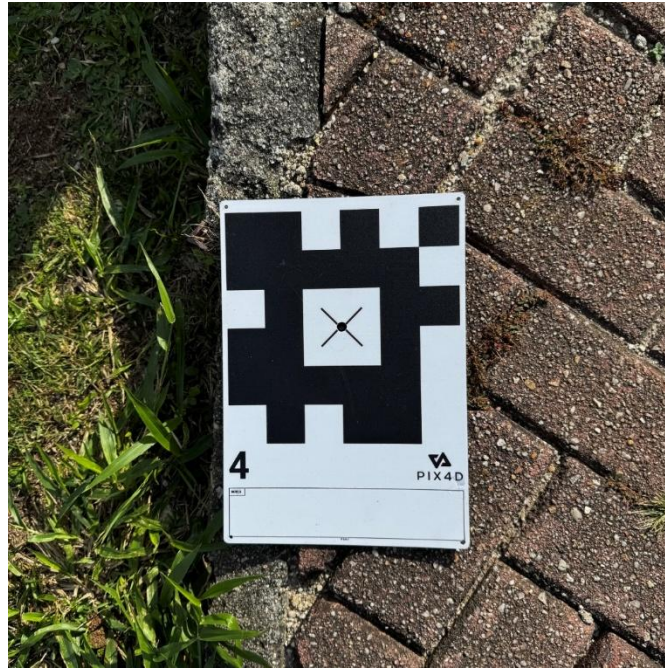
FIGURA 36 - LINHAS DE COLETAS



Fonte: O autor (2025)

O levantamento seguiu a técnica de caminhada contínuo, com pausas programadas sempre que a solução FIXA era perdida por um intervalo prolongado de tempo. Essa estratégia teve como objetivo evitar registros com precisão degradada e assegurar a qualidade geométrica do modelo tridimensional gerado posteriormente. Para auxiliar na identificação dos pontos materializados na nuvem de pontos posteriormente, as *Autotags* do kit foram posicionadas sobre eles (Figura 37), pois devido as dimensões dos itens utilizados para materialização sua visualização seria difícil ou até mesmo imperceptível (Figura 38). Neste caso, a opção de identificação automática do aplicativo foi desativada, pois havia interesse apenas na visualização dos pontos.

FIGURA 37 - ALOCAÇÃO DAS AUTOTAGS



Fonte: O autor (2025)

FIGURA 38 - PONTO MATERIALIZADO (PARAFUSO METÁLICO)



Fonte: O autor (2025)

Ao exportar o projeto, é possível observar o log de posições GNSS, onde foram obtidos os dados das coordenadas e solução durante o caminhar (Figura 39). Foi possível observar que 84,6% do caminhar ocorreu com solução FIXA.

FIGURA 39 - SOLUÇÃO DURANTE CAMINHAMENTO

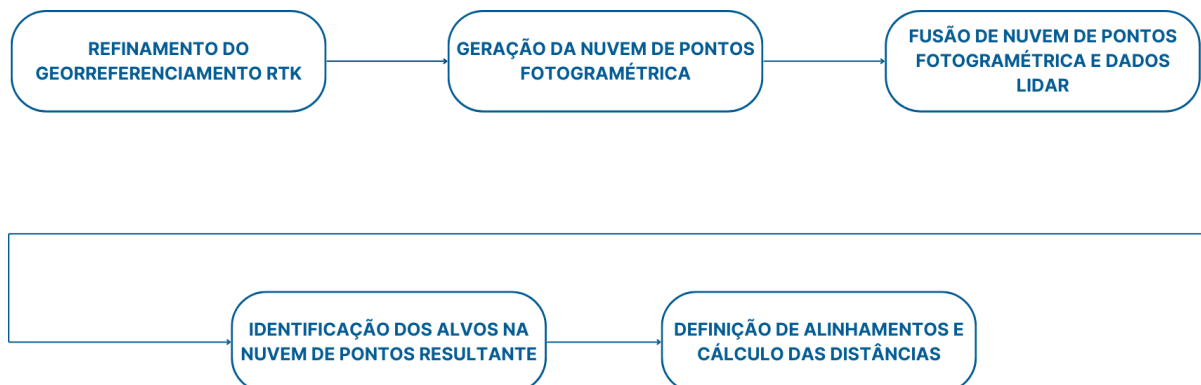


Fonte: O autor (2025)

### 3.2.5 Fluxo de trabalho pós levantamento

Após a aquisição dos dados em campo utilizando o aplicativo PIX4Dcatch, o processamento das informações foi realizado no software PIX4Dmatic, seguindo um fluxo de trabalho estruturado em etapas específicas. Abaixo, descreve-se cada fase do processamento.

FIGURA 40 - ETAPAS DO PROCESSAMENTO DO PIX4DCATCH



Fonte: O autor (2025)

### 3.2.5.1 Refinamento do Georreferenciamento RTK

A etapa denominada pelo software como 'Calibração' tem como objetivo o ajustamento da posição, orientação e escala do modelo (Parâmetros de orientação exterior) e calibração dos parâmetros intrínsecos da câmera (Parâmetros de orientação interior). Consiste em principalmente na extração de pontos de ligação (*Time Points*) e seus correspondentes entre diferentes imagens para ajustamento do bloco de imagens. Nesse processo, foram gerados 844.432 mil pontos de ligação (Figura 41).

FIGURA 41 - PONTOS DE LIGAÇÃO (ATPS – *AUTOMATIC TIE POINTS*)



Fonte: O autor (2025)

### 3.2.5.2 Geração da Nuvem de Pontos Densa

Com o modelo calibrado, procede-se à geração da nuvem de pontos densa, onde milhões de pontos 3D são reconstruídos com base na sobreposição e paralaxe entre as imagens. Para essa etapa, foi adotada a configuração de alta densidade, na qual um ponto tridimensional é calculado para cada segundo pixel da imagem original. Essa nuvem de pontos densa representa com alto nível de detalhe a geometria da superfície capturada.

### 3.2.5.3 Fusão de Nuvem Fotogramétrica de Pontos com Dados LiDAR

Na fase seguinte, o software executa a fusão entre a nuvem de pontos derivada das imagens e os dados de profundidade provenientes do sensor LiDAR do dispositivo móvel. Esse processo, denominado profundidade e fusão densa, resulta em uma nuvem de pontos mais completa, que combina as vantagens de ambos os métodos de captura.

Durante essa etapa, o algoritmo avalia a distância mínima entre os pontos gerados pelas imagens e os pontos LiDAR, utilizando esse critério para integrar os dados. O parâmetro de distância mínima varia conforme a unidade de medida adotada no projeto (metros ou centímetros, por exemplo), sendo ajustável conforme o nível de detalhamento desejado e as características do levantamento.

### 3.2.5.4 Parâmetros Utilizados

A tabela a seguir (Tabela 2), demonstra os parâmetros utilizados no software para se chegar aos resultados obtidos nesse trabalho.

TABELA 2 - CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTO

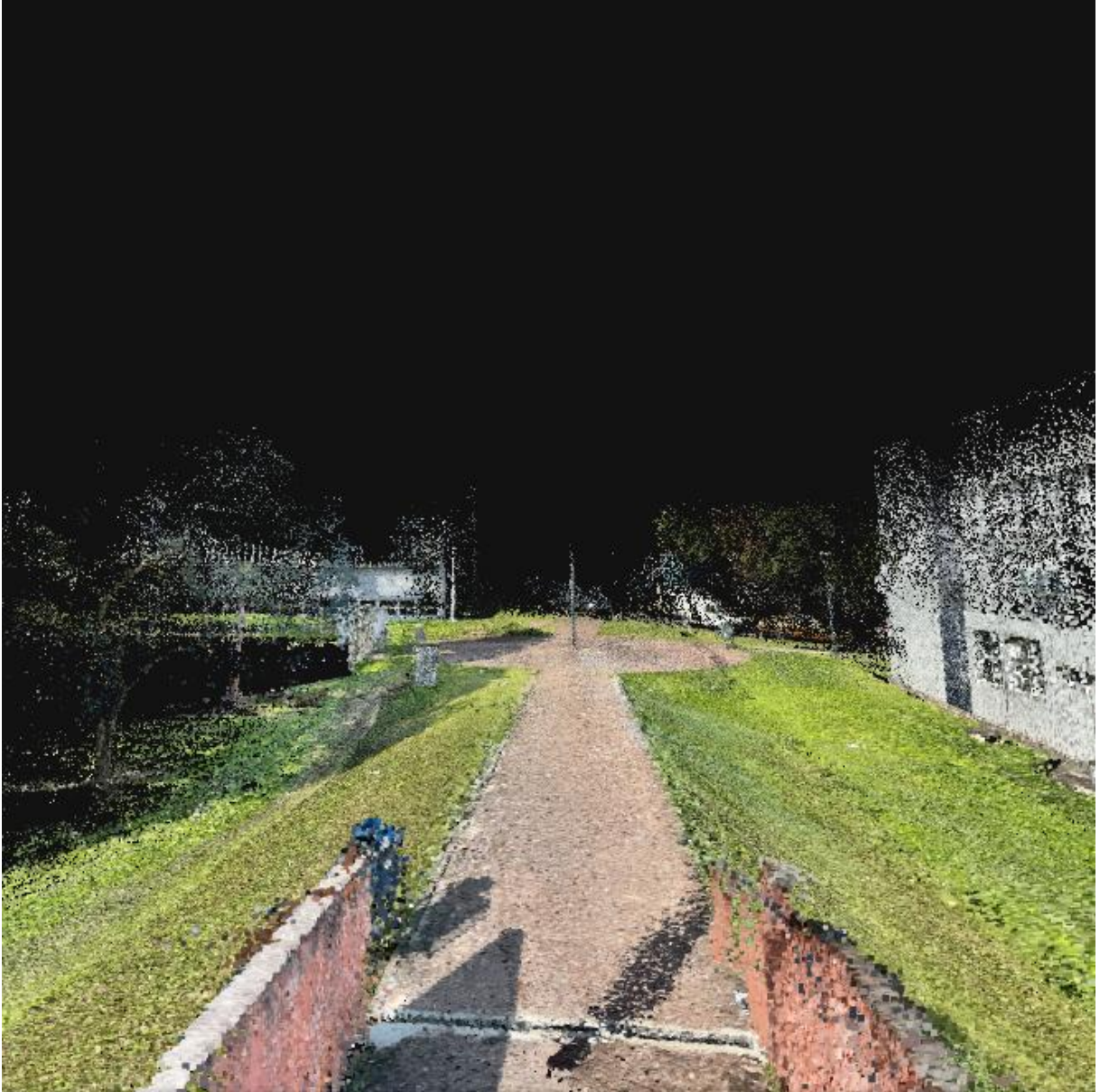
<b>Calibração</b>	<b>Nuvem de Pontos Densa</b>	<b>Profundidade e Fusão densa</b>
<b>Modelo:</b> PIX4Dcatch <b>Pipeline:</b> Localização e orientação confiáveis <b>Escala da imagem:</b> 1 <b>Confiança interna:</b> Baixo <b>Confiança externa:</b> Padrão	<b>Algoritmo:</b> Hardware acelerado <b>Escala da imagem:</b> ½ <b>Densidade:</b> Alto <b>Número mínimo de correspondências:</b> 3	<b>Distância: 0,025 m</b>

<b>Otimiza os parâmetros internos com os pontos de ligação:</b> Desabilitado <b>Máximo de pontos-chave extraídos:</b> Automático <b>Use mapas de profundidade:</b> Ativado <b>Use ITPs (<i>Intersection Tie Points</i>) automáticos:</b> Desativado	<b>Multiescala:</b> Ativado <b>Filtro de ruído:</b> Ativado <b>Filtro do céu:</b> Ativado <b>Com reconhecimento de máscara:</b> Desabilitado	
--	---	--

Fonte: O autor (2025)

Como resultante, se chegou a uma nuvem de pontos (Figura 42 e 43) com 51.501.429 pontos, apresentando uma riqueza de detalhes, possibilitando a identificação dos pontos materializados em campo com auxílio das *AutoTags* (Figura 44).

FIGURA 42 - VISÃO INTERNA DA NUVEM DE PONTOS DENSA



Fonte: O autor (2025)

FIGURA 43 - VISÃO GERAL DA NUVEM DE PONTOS DENSA



Fonte: O autor (2025)

FIGURA 44 - IDENTIFICAÇÃO DO CENTRO DAS AUTOTAGS



Fonte: O autor (2025)

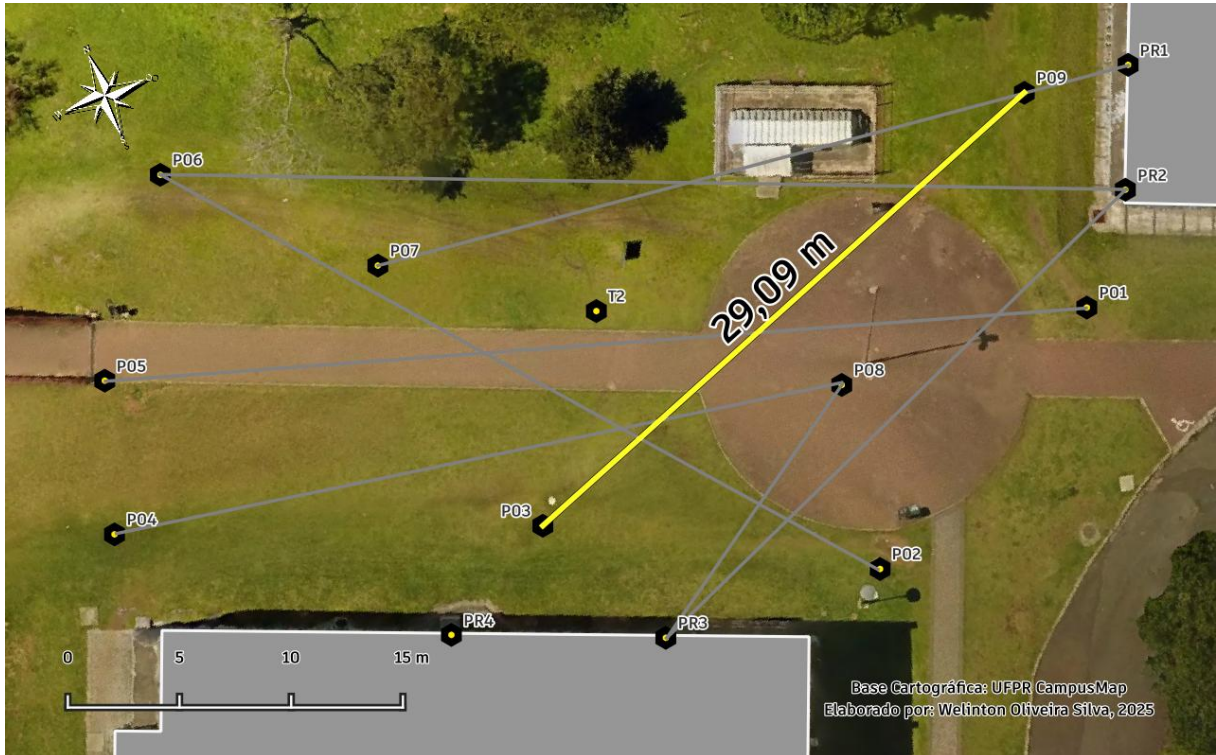
### 3.2.6 Cálculo da Acurácia Dimensional

Com o objetivo de avaliar a acurácia dimensional do modelo tridimensional gerado pelo aplicativo PIX4Dcatch, foi realizada uma comparação direta entre distâncias horizontais, inclinadas e desníveis obtidos a partir da nuvem de pontos e aquelas medidas por métodos convencionais de alta precisão, como GNSS (RTK) e levantamento topográfico com estação total. Para essa análise, foram utilizados pontos homólogos (presentes tanto na nuvem de pontos quanto nas medições de referência), e definidos oito alinhamentos representativos, a fim de contemplar diferentes comprimentos e variações altimétricas. Destaca-se que no processo de localização dos pontos na nuvem de pontos e cálculo de distâncias, incertezas relacionadas a precisão das coordenadas não foram considerados.

Esses alinhamentos foram estrategicamente escolhidos para abranger distâncias curtas, médias e longas, além de diferentes configurações espaciais,

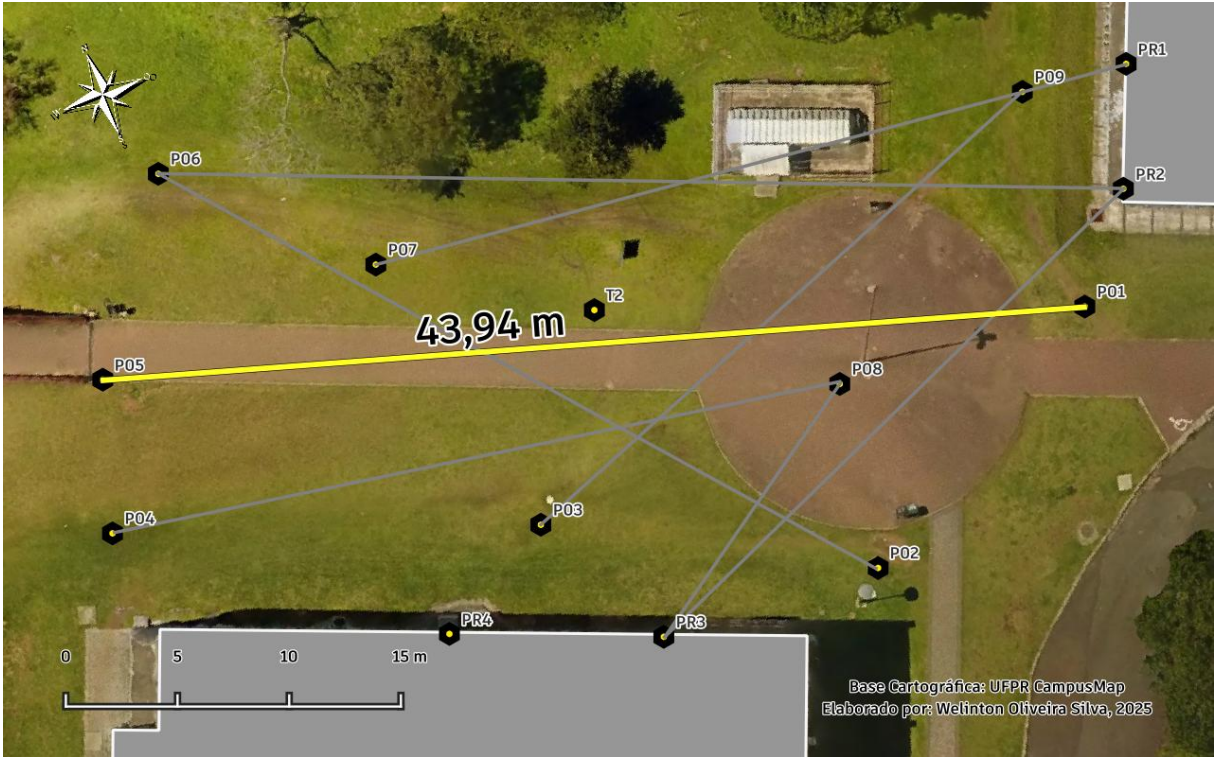
possibilitando observar o comportamento geométrico do modelo 3D sob variadas condições. As Figuras 45 a 52 mostram os alinhamentos e suas distâncias inclinadas no modelo tridimensional de referência.

FIGURA 45 - ALINHAMENTO 1 (P3-P9)



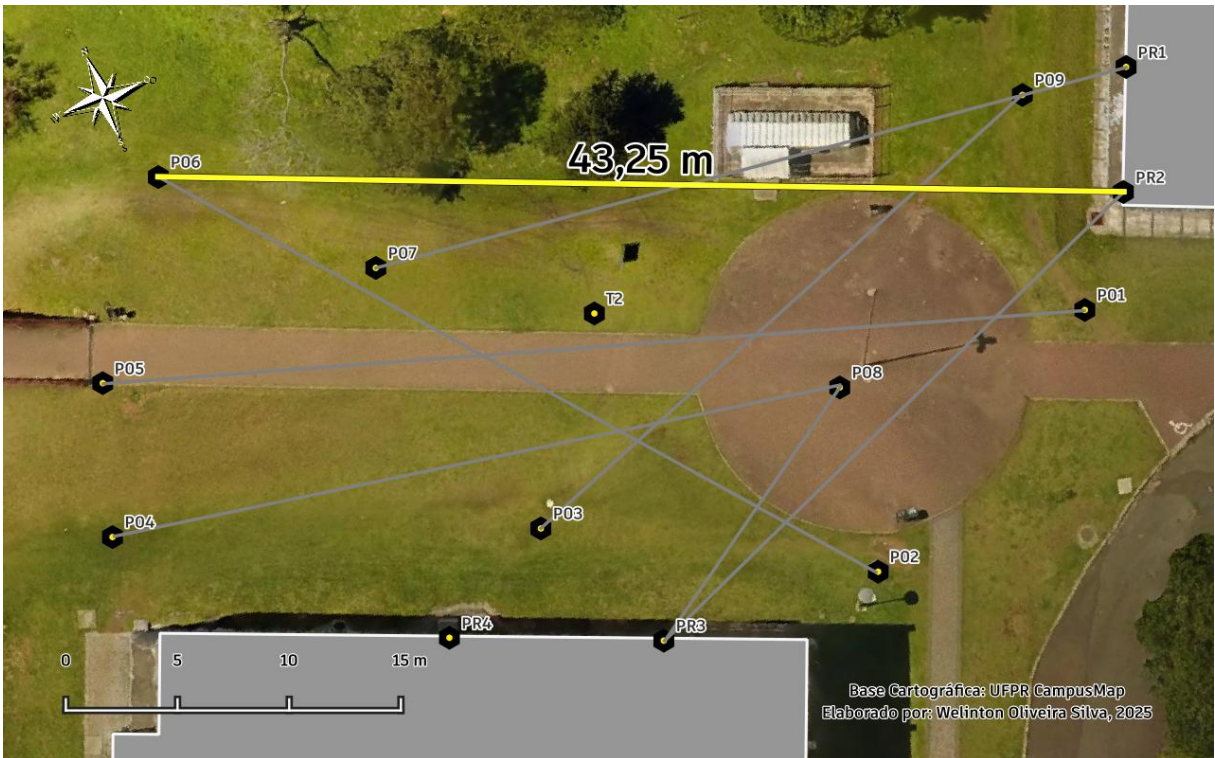
Fonte: O autor (2025)

FIGURA 46 - ALINHAMENTO 2 (P5-P1)



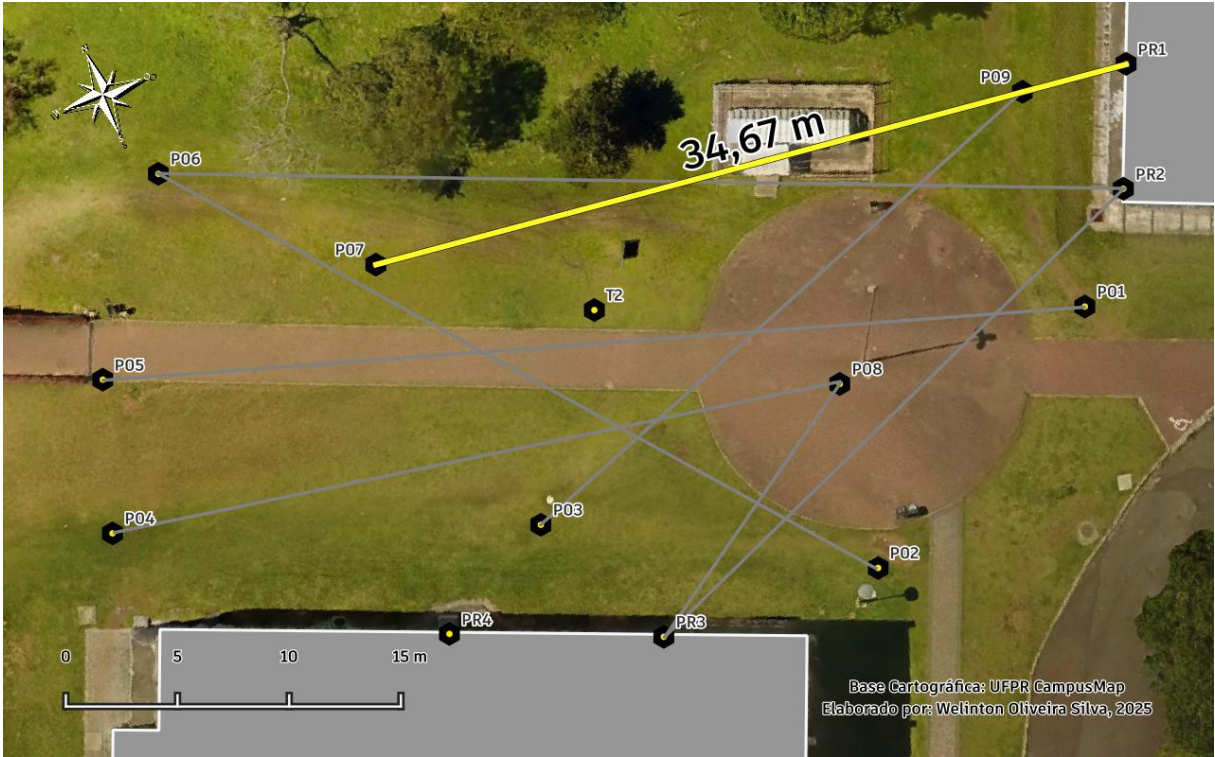
Fonte: O autor (2025)

FIGURA 47 - ALINHAMENTO 3 (P6-PR2)



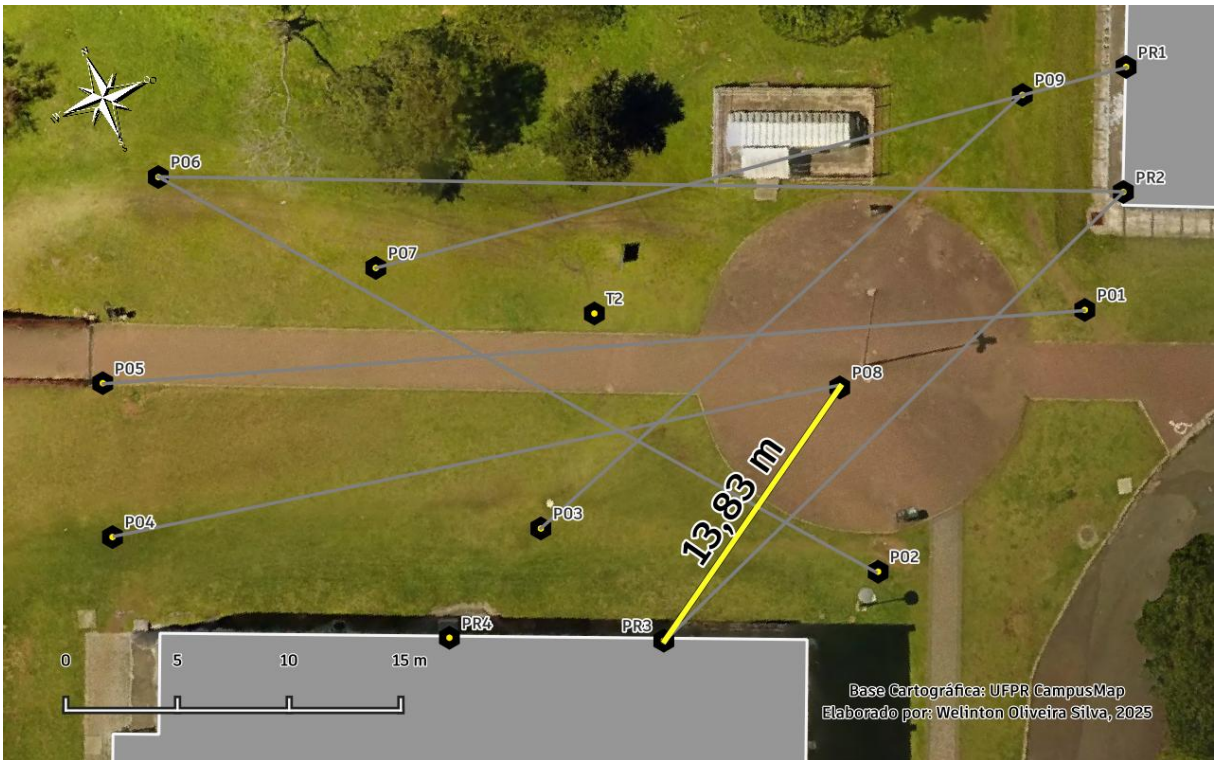
Fonte: O autor (2025)

FIGURA 48 - ALINHAMENTO 4 (P7-PR1)



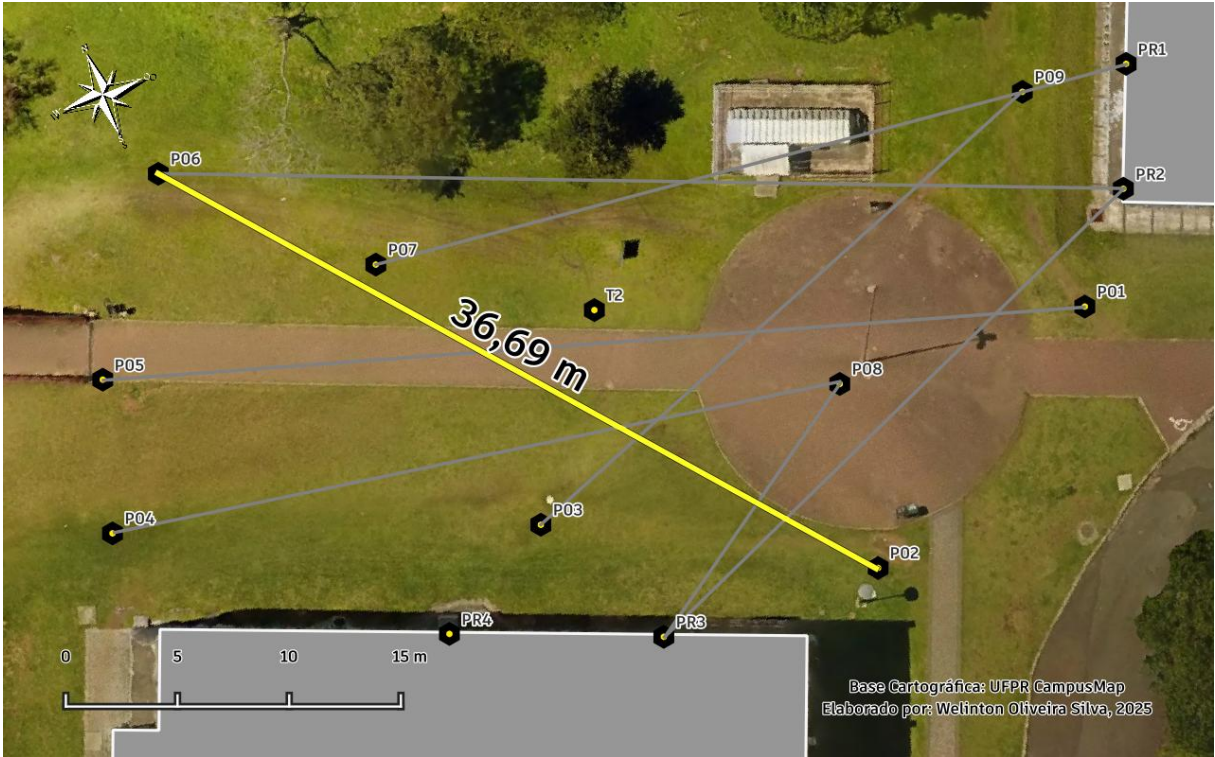
Fonte: O autor (2025)

FIGURA 49 - ALINHAMENTO 5 (P8-PR3)



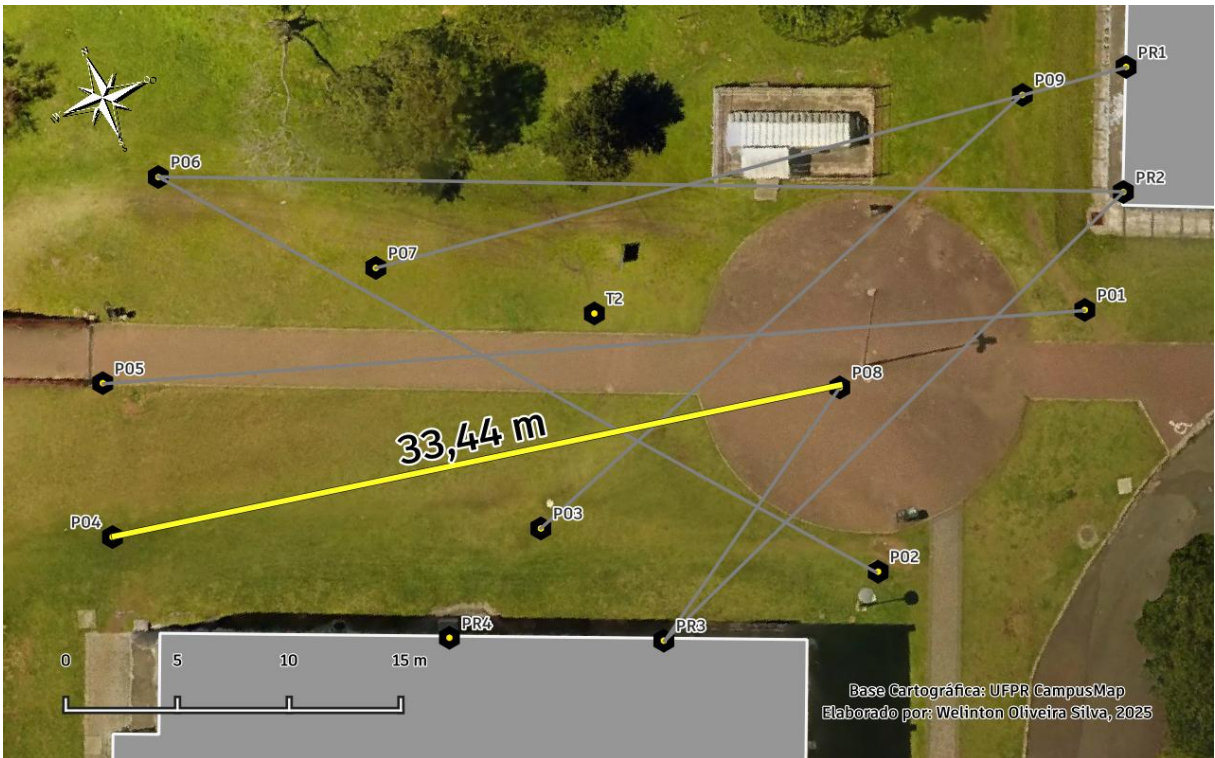
Fonte: O autor (2025)

FIGURA 50 - ALINHAMENTO 6 (P6-P2)



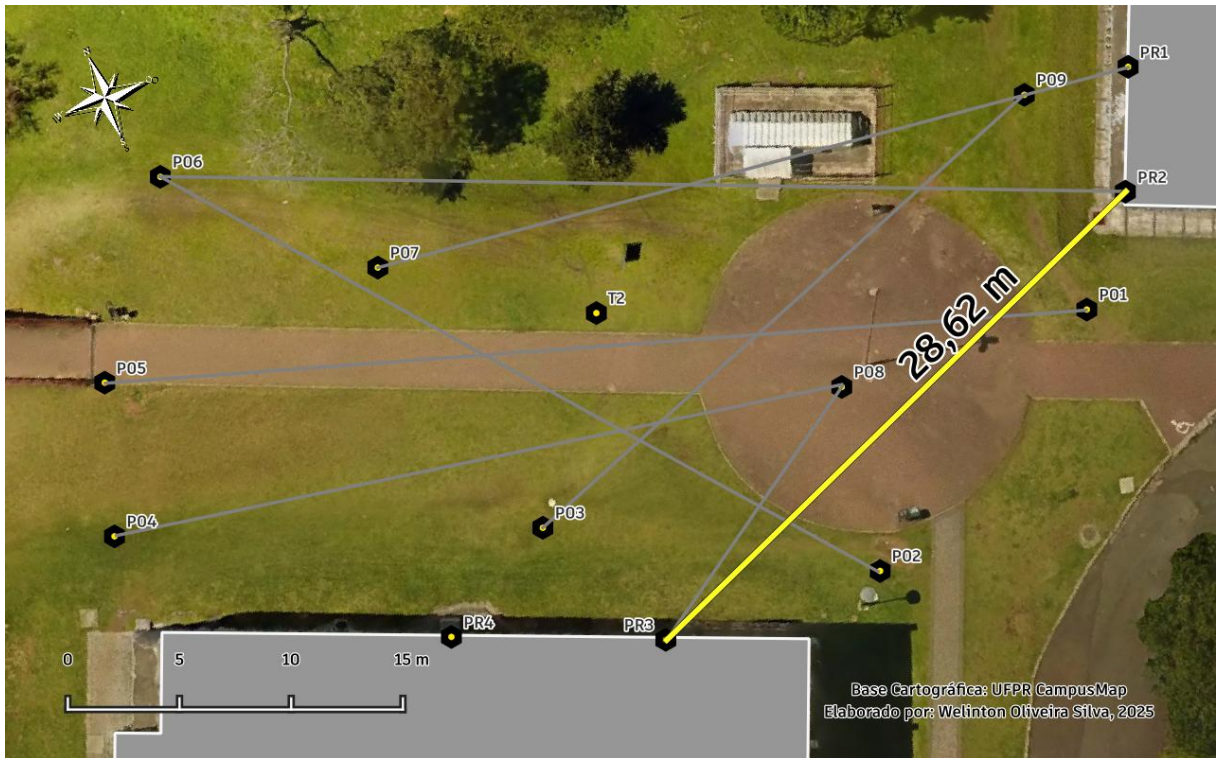
Fonte: O autor (2025)

FIGURA 51 - ALINHAMENTO 7 (P8-P4)



Fonte: O autor (2025)

FIGURA 52 - ALINHAMENTO 8 (PR3-PR2)



Fonte: O autor (2025)

Foram então calculados a discrepâncias posicionais planimétricas ( $D_{2D}$ ), altimétricas ( $D_Z$ ) ou tridimensionais ( $D_{3D}$ ). Em posse dos mesmos a diferença absoluta, conforme a seguinte operação:

$$\Delta d = D_{ref} - D_{mod}, (12)$$

onde:

$\Delta d$  é o erro absoluto do alinhamento;

$d_{ref}$  é a distância obtida no modelo de referência (Coordenadas topográficas);

$d_{mod}$  é a distância obtida na nuvem de pontos (PIX4Dcatch).

Em seguida foram calculados média (equação 13), desvio padrão (equação 14) e raiz do erro quadrático médio (equação 15) para os erros absolutos, possibilitando interpretar e qualificar os dados posteriormente.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, (13)$$

onde:

$\bar{x}$  é a média dos erros absolutos;

$x_i$  são os erros absolutos;

$n$  é o número de alinhamentos.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (14)$$

onde:

$S$  é o desvio padrão da amostra.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2}, \quad (15)$$

onde:

$REQM$  é a raiz do erro quadrático médio;

Por fim, foram calculados os índices de similaridade entre o modelo tridimensional gerado e os dados de referência, sendo um indicativo direto da capacidade do modelo de preservar as dimensões reais do ambiente levantado. Isso foi possível utilizando as seguintes operações (equações 16 e 17):

$$Erro\ Relativo\ (\%) = \left( \frac{\Delta_d}{d_{ref}} \right) \cdot 100, \quad (16)$$

$$Índice\ de\ Similaridade\ (\%) = 100 - Erro\ Relativo\ (\%), \quad (17)$$

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS – TOPOGRAFIA

A tabela a seguir (Tabela 3) apresenta as coordenadas dos pontos materializados na área de estudo, obtidas por meio de levantamento topográfico convencional. Esses pontos foram utilizados como referência para as análises e comparações realizadas ao longo do trabalho.

TABELA 3 - COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS (TOPOGRAFIA)

<b>Coordenadas (Topografia)</b>						
<b>ID</b>	<b>E (m)</b>	<b>±(mm)</b>	<b>N (m)</b>	<b>±(mm)</b>	<b>h (m)</b>	<b>±(mm)</b>
P01	677549,349	<1	7184189,989	<1	910,333	1
P02	677536,383	<1	7184182,598	1	909,759	<1
P03	677523,109	<1	7184190,046	<1	908,714	<1
P04	677505,186	1	7184196,874	1	907,702	1
P05	677507,362	<1	7184203,420	1	910,388	1
P06	677513,122	<1	7184211,038	<1	908,124	<1
P07	677520,626	<1	7184203,621	1	909,264	<1
P08	677537,879	1	7184190,884	<1	909,828	1
P09	677550,359	<1	7184199,955	1	910,560	<1
PR1	677555,136	2	7184199,378	1	911,547	2
PR2	677552,927	1	7184194,237	<1	911,559	1
PR3	677526,333	1	7184183,332	2	910,734	<1
PR4	677517,483	1	7184187,048	1	910,330	1

FONTE: O autor (2025)

### 4.2 COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS – NUVEM DE PONTOS

A tabela a seguir (Tabela 4) apresenta as coordenadas dos pontos que compõem a nuvem de pontos gerada na área de estudo (Figura 53), a partir do levantamento fotogramétrico, GNSS e LiDAR realizado com o aplicativo PIX4Dcatch. Os dados foram processados com base nas informações capturadas pelo dispositivo móvel, representando a superfície materializada da área analisada. Essa nuvem de pontos foi utilizada como alvo para a avaliação da acurácia dimensional do modelo tridimensional.

TABELA 4 - COORDENADAS TRIDIMENSIONAIS (NUVEM DE PONTOS)

<b>Coordenadas (Nuvem de Pontos – PIX4Dcatch)</b>			
<b>ID</b>	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>h (m)</b>
P01	677549,405	7184189,989	910,355
P02	677536,384	7184182,594	909,750
P03	677523,105	7184190,073	908,679
P04	677505,199	7184196,847	907,726
P05	677507,529	7184203,311	910,405
P06	677513,235	7184211,014	908,151
P07	677520,817	7184203,549	909,283
P08	677538,029	7184190,832	909,831
P09	677550,323	7184200,150	910,628
PR1	677555,168	7184199,471	911,590
PR2	677552,937	7184194,206	911,565
PR3	677526,549	7184183,168	910,727
PR4	677517,544	7184186,976	910,340

FONTE: O autor (2025)

FIGURA 53 - PONTOS IDENTIFICADOS (NUVEM DE PONTOS)



FONTE: O autor (2025)

### 4.3 DISTÂNCIAS HORIZONTAIS

A tabela a seguir (Tabela 5) apresenta as distâncias horizontais ( $D_h$ ) calculadas entre os pontos materializados obtidos por levantamento topográfico convencional e os pontos correspondentes extraídos da nuvem gerada com o aplicativo PIX4Dcatch. Essas distâncias foram utilizadas para avaliar a acurácia posicional horizontal do modelo tridimensional em relação aos dados de referência.

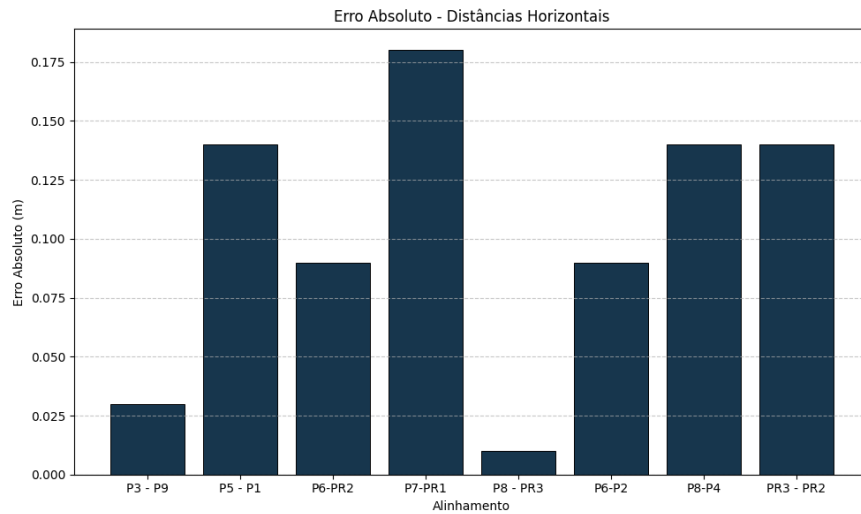
TABELA 5 - DISTÂNCIAS HORIZONTAIS

Distâncias Horizontais ( $D_h$ )					
Alinhamento	TOPO(m)	NUVEM(m)	Erro Absoluto (m)	Erro Relativo %	IS (%)
P3 - P9	29,00	29,02	0,03	0,10%	99,90%
P5 - P1	44,08	43,94	0,14	0,31%	99,69%
P6-PR2	43,20	43,11	0,09	0,21%	99,79%
P7-PR1	34,77	34,59	0,18	0,51%	99,49%
P8 - PR3	13,80	13,80	0,01	0,05%	99,95%
P6-P2	36,74	36,65	0,09	0,24%	99,76%
P8-P4	33,24	33,38	0,14	0,42%	99,58%
PR3 - PR2	28,74	28,60	0,14	0,49%	99,51%
	Média (m)		0,06		<b>99,71%</b>
	Desvio Padrão (m)		0,11		
	REQM (m)		0,12		

FONTE: O autor (2025)

A tabela 5 apresenta as distâncias horizontais ( $D_h$ ) dos oito alinhamentos definidos, assim como as diferenças em relação aos valores de referência da Topografia e as respectivas porcentagens dessas diferenças. O desvio padrão de 0,11 metros é superior à média em valor absoluto, o que indica que a dispersão dos dados é maior do que a tendência central, sugerindo alta variabilidade. O REQM de 0,12 metros resume a acurácia geral do método considerando viés e variabilidade dos dados, demonstrando a presença de desvios mais significativos, impactando a qualidade geral do levantamento. Em termos percentuais, a média dos índices de similaridade (IS) alinhamentos foi de 99,71%, demonstrando elevada consistência do modelo em relação aos dados topográficos.

GRÁFICO 1 - ERRO ABSOLUTO EM DISTÂNCIAS HORIZONTAIS



Fonte: O autor (2025)

Na análise das distâncias horizontais (GRÁFICO 1), observa-se que o maior erro absoluto (0,18 m) foi registrado no alinhamento P7–PR1 cuja distância é de aproximadamente 34,77 m para Topografia e 34,59 m na nuvem de pontos, seguido de PR3–PR2 e P8–P4, com 0,14 m. Entretanto, os maiores erros não estão associados às maiores distâncias. Isso indica a ausência de uma relação direta entre extensão da medição e erro cometido.

#### 4.4 DISTÂNCIA VERTICAL

A tabela a seguir (Tabela 6) apresenta as distâncias verticais ( $D_V$ ) calculados entre as altitudes dos pontos obtidos por levantamento topográfico convencional e as altitudes dos pontos correspondentes extraídos da nuvem gerada com o aplicativo PIX4Dcatch. Esses valores foram utilizados para avaliar a acurácia altimétrica do modelo tridimensional, permitindo verificar a proximidade dos dados obtidos com a superfície real da área de estudo.

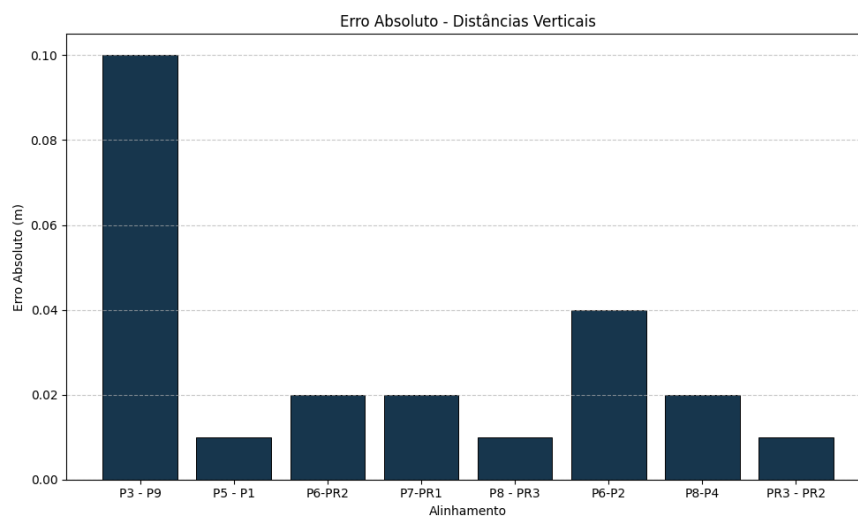
TABELA 6 – DISTÂNCIAS VERTICAIS

Distâncias Verticais ( $D_V$ )					
Alinhamento	TOPO(m)	NUVEM(m)	Erro Absoluto (m)	Erro Relativo %	IS (%)
P3 - P9	1,85	1,95	0,10	5,58%	94,42%
P5 - P1	0,06	0,05	0,01	9,09%	90,91%
P6-PR2	3,43	3,41	0,02	0,60%	99,40%
P7-PR1	2,28	2,31	0,02	1,07%	98,93%
P8 - PR3	0,91	0,90	0,01	1,16%	98,84%
P6-P2	1,64	1,60	0,04	2,20%	97,80%
P8-P4	2,13	2,11	0,02	0,99%	99,01%
PR3 - PR2	0,82	0,84	0,01	1,64%	98,36%
Média (m)			0,01		<b>97,21%</b>
Desvio Padrão (m)			0,04		
REQM (m)			0,04		

FONTE: O autor (2025)

A Tabela 6 apresenta os resultados referentes as distâncias verticais ( $D_V$ ) dos alinhamentos analisados. A média dos erros absolutos foi de 0,01 metros, com desvio padrão de 0,04 metros. Os dados apresentam baixa dispersão em torno da média, indicando boa consistência entre as medidas. O REQM de 0,04 metros reforça a qualidade geral dos dados. O índice de similaridade (IS), expressa em termos percentuais, foi de 97,21%. Destaca-se que, em comparação com as distâncias de referência da Topografia, as maiores diferenças em relação a erros relativos foram observadas nos desníveis, apesar dos erros absolutos menores.

GRÁFICO 2 - ERRO ABSOLUTO EM DISTÂNCIAS VERTICAIS



Fonte: O autor (2025)

A análise dos erros nas distâncias verticais (GRÁFICO 2) mostra que os maiores erros absolutos não estão necessariamente associados às maiores distâncias verticais. O maior erro observado foi de 0,10 m no alinhamento P3–P9, com uma distância de 1,85 m na Topografia e 1,95 m na nuvem de pontos, enquanto o alinhamento P5–P1, que possui a menor distância 0,06 m na Topografia e 0,05 na nuvem de pontos, apresentou o maior erro relativo (9,09%), mesmo com um erro absoluto de apenas 0,01 m. Esses resultados indicam que pequenas distâncias verticais são mais suscetíveis a variações percentuais elevadas, o que ressalta a sensibilidade da análise vertical a pequenas imprecisões.

#### 4.5 DISTÂNCIAS INCLINADAS

A tabela a seguir (Tabela 7) apresenta as distâncias inclinadas ( $D_I$ ) calculadas entre os pontos obtidos por levantamento topográfico convencional e os pontos correspondentes extraídos da nuvem de pontos gerada com o aplicativo PIX4Dcatch. As distâncias inclinadas consideram tanto as diferenças planimétricas quanto altimétricas entre os pares de pontos, oferecendo uma medida mais completa da discrepância espacial entre os dois conjuntos de dados.

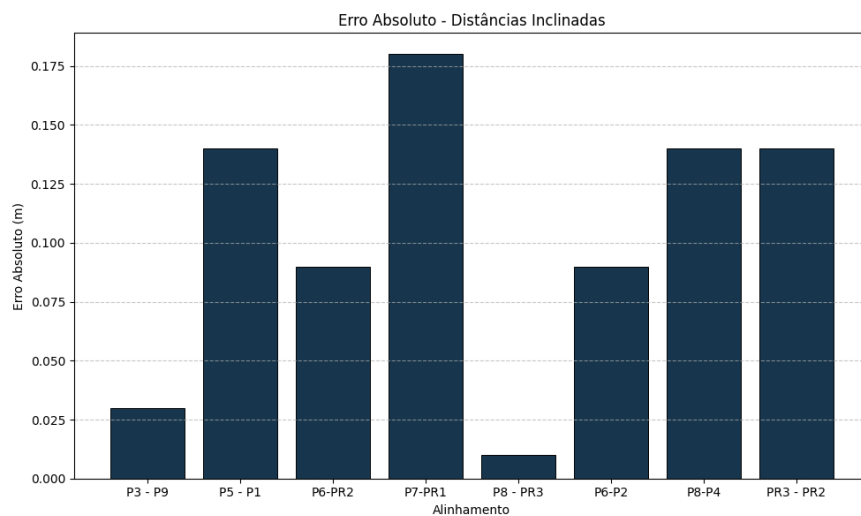
TABELA 7 - DISTÂNCIAS INCLINADAS

Alinhamento	Distâncias Inclinadas ( $D_I$ )				
	TOPO(m)	NUVEM(m)	Erro Absoluto (m)	Erro Relativo %	IS (%)
P3 - P9	29,05	29,09	0,03	0,12%	99,88%
P5 - P1	44,08	43,94	0,14	0,31%	99,69%
P6-PR2	43,34	43,25	0,09	0,21%	99,79%
P7-PR1	34,84	34,67	0,18	0,50%	99,50%
P8 - PR3	13,83	13,83	0,01	0,04%	99,96%
P6-P2	36,78	36,69	0,09	0,24%	99,76%
P8-P4	33,31	33,44	0,14	0,41%	99,59%
PR3 - PR2	28,76	28,62	0,14	0,48%	99,52%
	Média (m)		0,06		<b>99,71%</b>
	Desvio Padrão (m)		0,11		
	REQM (m)		0,12		

FONTE: O autor (2025)

A tabela 7 apresenta os resultados referentes às distâncias inclinadas ( $D_I$ ) dos alinhamentos avaliados. A média dos erros absolutos foi de 0,06 metros, com desvio padrão de 0,11 metros, indicando que a dispersão dos dados é maior do que a tendência central, sugerindo alta variabilidade, assim como nas distâncias horizontais ( $D_h$ ). O REQM de 0,12 metros, sendo superior a média evidencia que alguns erros mais elevados influenciaram os resultados. A média do índice de similaridade (IS) geral alcançou 99,71%, evidenciando alta consistência do modelo para essa variável.

GRÁFICO 3 - ERRO ABSOLUTO EM DISTÂNCIAS INCLINADAS



Fonte: O autor (2025)

O alinhamento P7–PR1 apresentou o maior erro absoluto, de 0,18 m (GRÁFICO 3). No entanto, sua distância inclinada, de aproximadamente 34 metros, não representa o maior valor entre os alinhamentos analisados. Isso indica que não há uma relação direta entre o comprimento da distância e o erro absoluto observado. Como exemplo, o alinhamento P5–P1, que possui a maior distância medida (cerca de 44 metros), apresentou um erro absoluto inferior, de 0,14 m, reforçando que outros fatores, como variações altimétricas ou características geométricas do terreno, podem influenciar de forma mais significativa as discrepâncias identificadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como foco a análise do comportamento do modelo tridimensional gerado pelo PIX4Dcatch a partir da utilização do fluxo de trabalho mais simples disponibilizado pela ferramenta, sem a aplicação de recursos adicionais como pontos de controle e RTK convencional. A intenção foi verificar a qualidade geométrica dos resultados obtidos em condições práticas e acessíveis, simulando o uso da ferramenta por profissionais ou técnicos em contextos operacionais reais. Essa abordagem permitiu avaliar a confiabilidade do modelo gerado com um procedimento direto, destacando os potenciais como a integração de dados de diferentes sensores e a rápida coleta de dados, e os limites da aplicação em sua configuração padrão, como por exemplo a dependência da qualidade dos dados de RTK via NTRIP e a qualidade dos sensores LiDAR e de imageamento desses dispositivos. A partir da comparação entre as distâncias obtidas em vetores no modelo e os valores de referência provenientes do levantamento topográfico, foi possível avaliar a acurácia dimensional da reconstrução gerada. Os resultados mostraram elevada consistência centimétrica do modelo, com médias das diferenças próximas de zero e baixos desvios padrão e REQM em todas as variáveis analisadas: distância plana, desnível e distância inclinada. As conformidades médias foram de 99,71% para as distâncias planas e inclinadas, e 97,21% para os desníveis.

Dentre as diversas abordagens voltadas à captura da realidade, destaca-se a crescente utilização de dispositivos móveis como ferramenta principal, integrando de forma unificada diferentes tecnologias, como Fotogrametria, LiDAR e integração de sensores GNSS. Essa tendência vem se consolidando com o avanço da capacidade de processamento dos smartphones e a evolução dos aplicativos dedicados, tornando o processo de aquisição de dados mais acessível, ágil e eficiente. Nesse cenário, ferramentas como o PIX4Dcatch ganham destaque por já estarem consolidadas no mercado e em constante atualização, acompanhando os avanços tecnológicos e oferecendo recursos que ampliam a precisão e a aplicabilidade dos modelos gerados. A perspectiva é que, com o tempo, essas soluções se tornem ainda mais robustas e precisas, contribuindo significativamente para a popularização de levantamentos tridimensionais em diferentes áreas do conhecimento e setores profissionais.

Apesar disso é necessário destacar que essa ferramenta se utiliza três técnicas diferentes para elaboração de seus modelos, onde cada uma delas exige cuidados

específicos na coleta e tratamento dos dados. Das principais vantagens é possível citar fatores como o baixo custo comparado a ferramentas mais robustas, a utilização de um dispositivo móvel como principal ferramenta, a rapidez de obtenção de dados georreferenciados e a possibilidade de visualização em tempo real dos dados coletados. Porém fatores relacionados ao posicionamento geodésico, principalmente em relação a perda de solução devem ser considerados pelo usuário da ferramenta, pois podem afetar diretamente a qualidade do produto final.

Dessa forma, conclui-se que o modelo tridimensional gerado pelo aplicativo PIX4Dcatch apresenta comportamento geométrico confiável a nível centimétrico, podendo ser considerado uma alternativa viável, especialmente em contextos de levantamentos expedito e captura da realidade voltada a elaboração de gêmeos digitais.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de pesquisas que explorem a aplicação do PIX4Dcatch em diferentes contextos e finalidades. Entre os cenários possíveis estão a reconstrução digital de esculturas e objetos históricos, estimativas volumétricas em pilhas de materiais e estoques, bem como o uso complementar em levantamentos realizados com VANTs, ampliando a densidade e a precisão dos modelos. Além disso, é importante investigar o desempenho da ferramenta utilizando diferentes metodologias, como o uso de RTK local via receptor GNSS externo, ou a inclusão de pontos de controle no campo, com o objetivo de refinar ainda mais a acurácia espacial. Outra frente relevante seria a análise da qualidade dos resultados obtidos com base nos parâmetros do PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Digitais), permitindo estabelecer comparações normativas com padrões oficiais. Tais estudos contribuirão para validar e expandir o uso da ferramenta em aplicações técnicas mais exigentes e em diferentes áreas do conhecimento.

## REFERÊNCIAS

- A FOTOGRAMETRIA | LAFOTO. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/lafoto/a-Fotogrametria-2/>>. Acesso em: 17 maio. 2025.
- ABDEL-MAJEED, H. M. et al. Indoor mapping accuracy comparison between the apple devices' LiDAR sensor and terrestrial laser Scanner. *HBRC Journal*, v. 20, n. 1, p. 22–38, 30 set. 2024.
- ARYAN, A.; BOSCHÉ, F.; TANG, P. Planning for terrestrial laser scanning in construction: a review. *Automation in Construction*, v. 125, p. 103551, maio 2021.
- BACHER, U. HYBRID AERIAL SENSOR DATA AS BASIS FOR A GEOSPATIAL DIGITAL TWIN. The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLIII-B4-2022, p. 653–659, 2 jun. 2022.
- CARDOSO, A. et al. Using photogrammetry for reality capture and parametric modeling of physical structures in a hydroelectric power plant: case study of Mascarenhas de Moraes hydropower plant. 20 jun. 2023.
- COSTA, S. et al. RBMC in real time via NTRIP and its benefits in RTK and DGPS surveys. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1\_115.
- CORRADETTI, A. et al. Benchmarking different SfM-MVS photogrammetric and iOS LiDAR acquisition methods for the digital preservation of a short-lived excavation: a case study from an area of sinkhole related subsidence. *Remote Sensing*, v. 14, n. 20, p. 5187–5187, 17 out. 2022.
- CINTRA, J.; GONÇALES, R. Aplicações das tecnologias Laser Scan e aerofotogrametria por drone para museus. *Anais do Museu Paulista*, v. 27, p. 1–28, [s.d.].
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. Sistema laserscanning: conceitos e princípios de funcionamento. Curitiba: UFPR, 2003. p. 111.
- ALVES, S. S. O.; VEIGA, L. A. K.; MEDINA, S. M. Avaliação da qualidade posicional de varreduras laser terrestre para aplicações em arquitetura. *PARC*, v. 13, p. e022012–e022012, 4 mar. 2022.
- Dense point cloud - PIX4Dmatic. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360044439272>>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- FRANZINI, M.; CASELLA, V.; MONTI, B. Assessment of Leica CityMapper-2 LiDAR Data within Milan's Digital Twin Project. *Remote Sensing*, v. 15, n. 21, p. 5263–5263, 6 nov. 2023.
- FORTES, A. O.; COELHO, C. R. B. Qualidade do posicionamento GNSS RTK com correções via NTRIP. lfg.edu.br, 2023.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. Introdução ao ajustamento de observações. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2015. 430 p.

GONCA BÜYÜKMIHÇI; AKŞEHIRLIOĞLU, A.; KOCA, M. Advantages and disadvantages of laser scanning with ViDoc RTK antenna: Ali Cafer Kümbeti. v. 3, n. 2, p. 41–46, 30 set. 2023.

GONÇALVES, N. et al. Análise das tecnologias utilizadas na Topografia. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://revista.fait.edu.br/cloud/artigos/2024/10/20241026102556-01196.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual do usuário: posicionamento por ponto preciso. Rio de Janeiro: Coordenação de Geodésia, Diretoria de Geociências, 2009. Disponível em: <[https://ppp.ibge.gov.br/manual\\_ppp.pdf](https://ppp.ibge.gov.br/manual_ppp.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2025.

MENDES, T. A. R. et al. Monitoramento de movimentos horizontais por meio da técnica de irradiação topográfica: estudo de caso do Edifício Carmelitano - Minas Gerais - Brasil. *Revista GeTeC*, v. 7, n. 19, 2018.

MONICO, J. et al. ACURÁCIA E PRECISÃO: REVENDO OS CONCEITOS DE FORMA ACURADA. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 469-483, [s.d.].

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MURGIA, F. et al. Investigation on the positional accuracy of 3D models generated by the Pix4Dcatch app synchronized with the viDoc RTK rover for iPad. 28 abr. 2021.

NETO, M. M. et al. Estratégias para concepção e digitalização de usinas e subestações de energia elétrica por captura da realidade: Fotogrametria associada ao escaneamento a laser versus modelagem paramétrica manual. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, n. E66, p. 216–230, 2024.

PIX4Dcatch RTK: conheça as melhores práticas de captura. Disponível em: <<https://www.pix4d.com/pt/blog/PIX4Dcatch-RTK-Conheca-as-melhores-praticas-de-captura/>>. Acesso em: 09 jun. 2025.

Reality Capture 101: what it is and why you need to use it. Disponível em: <<https://www.geoweeknews.com/news/realitycapture101>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

RECOMENDAÇÕES PARA LEVANTAMENTOS RELATIVOS ESTÁTICOS - GPS. Abril de 2008. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/recom\\_gps\\_internet.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_internet.pdf)>. Acesso em: 09 jun. 2025.

RYTIS MASKELIŪNAS et al. Fusing LiDAR and photogrammetry for accurate 3D data: a hybrid approach. *Remote Sensing*, v. 17, n. 3, p. 443, 28 jan. 2025.

SANTOS, A. et al. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL EM DADOS ESPACIAIS UTILIZANDO TÉCNICAS DE ESTATÍSTICA ESPACIAL: PROPOSTA DE MÉTODO E EXEMPLO UTILIZANDO A NORMA BRASILEIRA. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n. 4, p. 630–650, [s.d.].

SANTOS, A. P. dos. Controle de qualidade cartográfica: metodologias para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais. 2015. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/items/882568a8-1151-4371-b62f-6652da666d31>>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SHAN, J.; TOTH, C. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, [s.d.].

STRECHA, C.; REHAK, M.; CUCCI, D. The Accuracy of RTK enabled Mobile Phones in RTK denied Areas. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. X-4-2024, p. 327–332, [s.d.].

SULEYMANOGLU, B. et al. Road infrastructure mapping by using iPhone 14 Pro: an accuracy assessment. Disponível em: <<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-M-1-2023/347/2023/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-347-2023.html>>. Acesso em: 6 maio 2023.

TEO, T.-A.; YANG, C.-C. Evaluating the accuracy and quality of an iPad Pro's built-in lidar for 3D indoor mapping. *Developments in the Built Environment*, v. 14, p. 100169, 1 abr. 2023.

The Haskins Society - 3D Photogrammetry with PhotoScan. Disponível em: <<https://thehaskinssociety.wildapricot.org/photogrammetry>>. Acesso em: 16 maio 2025.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, v. 4, n. 5, p. 1392–1410, 14 maio 2012.

Unlock the full potential of your PIX4Dcatch projects with RTK. Disponível em: <<https://www.pix4d.com/product/rtk/>>. Acesso em: 02 jun. 2025.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. Fundamentos de Topografia. [Apostila]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Disponível em: <<https://cartografica.ufpr.br/wp-content/uploads/2023/07/fundamentos-Topografia-i-1.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

What is NTRIP - PIX4Dcatch RTK. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/4633640503709>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

WILKERSON, M. What is a real time kinematic (RTK) survey? Your 2024 guide. Disponível em: <<https://pointonnav.com/news/rtk-survey/>>. Acesso em: 17 abr. 2025.

WOLF, P.; DEWITT, B.; WILKINSON, B. Elements of photogrammetry with applications in GIS. 4. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2014.

**APÊNDICE 1 – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO GERADO PELO  
PIX4DMATIC**

QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK




# Relatório de qualidade

PIX4Dmatic v1.76.0



Câmeras	Apple_PIX4Dcatch.iPhone16.2.EmlidRX_iOS_3.5_1920x1440, Apple_PIX4Dcatch.iPhone16.2.unknown_iOS_3.5_1920x1440
GSD médio	0.7 cm
Projeto CRS	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S - EPSG:31982
Contagem de pontos densos	49.696.859
Contagem de pontos de profundidade	3.865.433
Contagem de pontos de profundidade & fusão densa	51.501.429

## Verificação de qualidade

Correspondências	Mediana de 2381 correspondências por imagem calibrada	
Conjunto de dados	100 % calibrado ( 1299 / 1299 ), 1 bloco	
Otimização da câmera	1.23 % de diferença relativa entre os parâmetros iniciais e otimizados da câmera interna	
ATPs	844432 ATPs	

QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK

## Câmeras



### Parâmetros internos da câmera

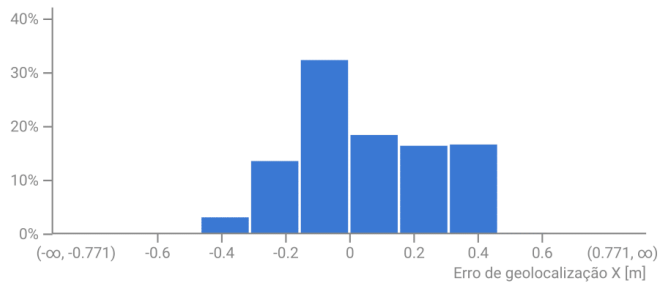
Apple\_PIX4Dcatch.iPhone16.2.unknown\_iOS\_3.5\_1920x1440 . Dimensões do sensor: 4.992 mm x 3.744 mm

	Comprimento focal	Ponto principal x	Ponto principal y	R1	R2	R3	T1	T2
<b>Inicial</b>	1341.4 px 3.488 mm	960.0 px 2.496 mm	720.0 px 1.872 mm	0.0000010	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
<b>Otimizado</b>	1326.4 px 3.449 mm	986.4 px 2.565 mm	725.6 px 1.887 mm	0.1140286	-0.2886554	0.2116397	0.0000000	0.0000000

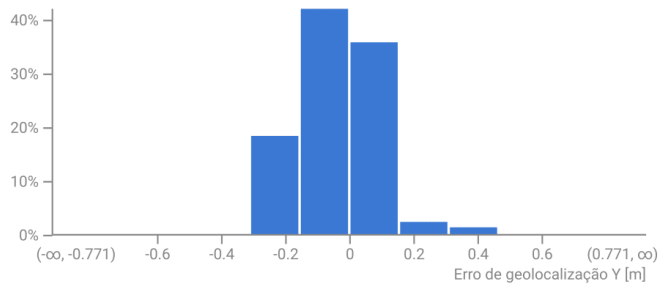
Apple\_PIX4Dcatch.iPhone16.2.EmlidRX\_iOS\_3.5\_1920x1440 . Dimensões do sensor: 4.992 mm x 3.744 mm

	Comprimento focal	Ponto principal x	Ponto principal y	R1	R2	R3	T1	T2
<b>Inicial</b>	1340.5 px 3.485 mm	960.0 px 2.496 mm	720.0 px 1.872 mm	0.0000010	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
<b>Otimizado</b>	1322.5 px 3.439 mm	996.7 px 2.592 mm	727.1 px 1.891 mm	0.1123051	-0.2894772	0.2090699	0.0000000	0.0000000

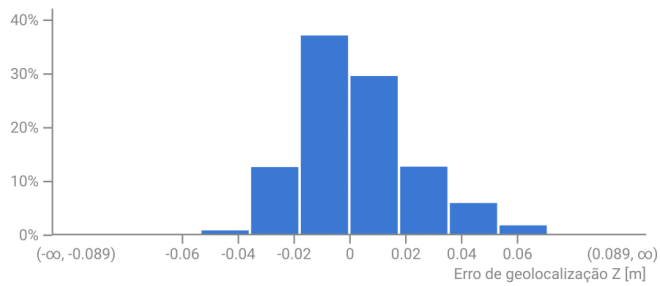
QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK

**Varição absoluta de geolocalização**

Erro de geolocalização X [m]	
Média	0.050
Mediana	0.006
Sigma	0.212
RMS	0.218



Erro de geolocalização Y [m]	
Média	-0.035
Mediana	-0.022
Sigma	0.117
RMS	0.122

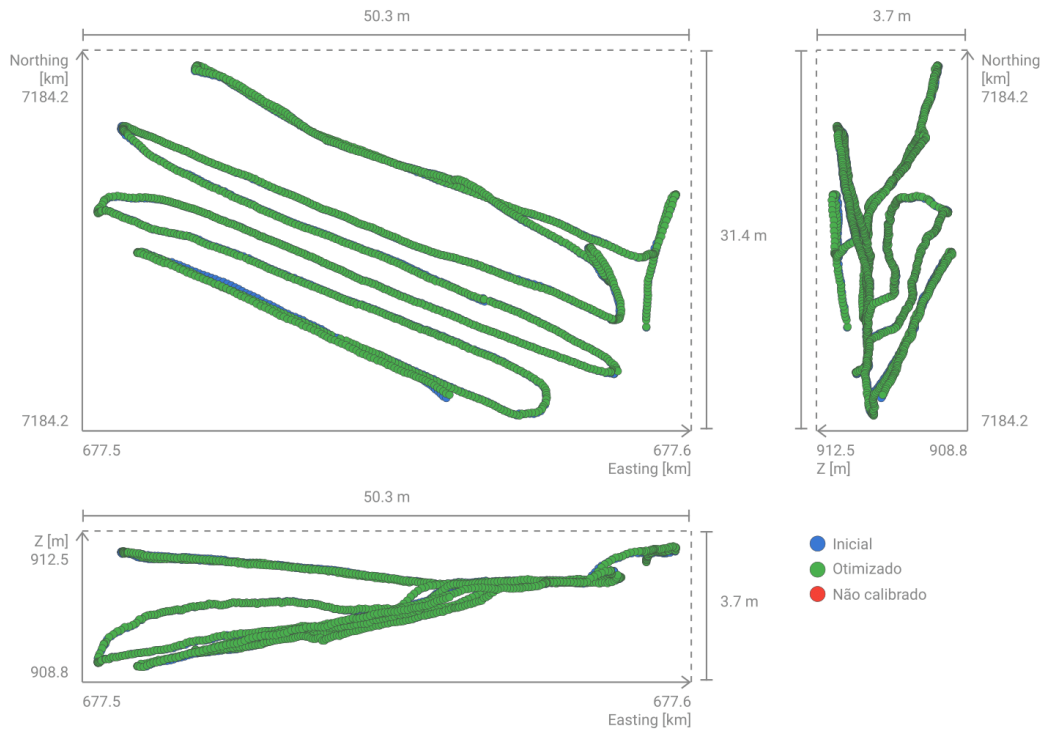


Erro de geolocalização Z [m]	
Média	0.002
Mediana	-0.000
Sigma	0.020
RMS	0.020

O erro de geolocalização é a diferença entre as posições iniciais e calculadas da câmera. Os gráficos mostram as distribuições por eixo dos erros de geolocalização nas câmeras. Grandes erros positivos e negativos são indicados com caixas laranja. Observe que os erros de geolocalização da imagem não correspondem à precisão dos pontos 3D observados.

QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK

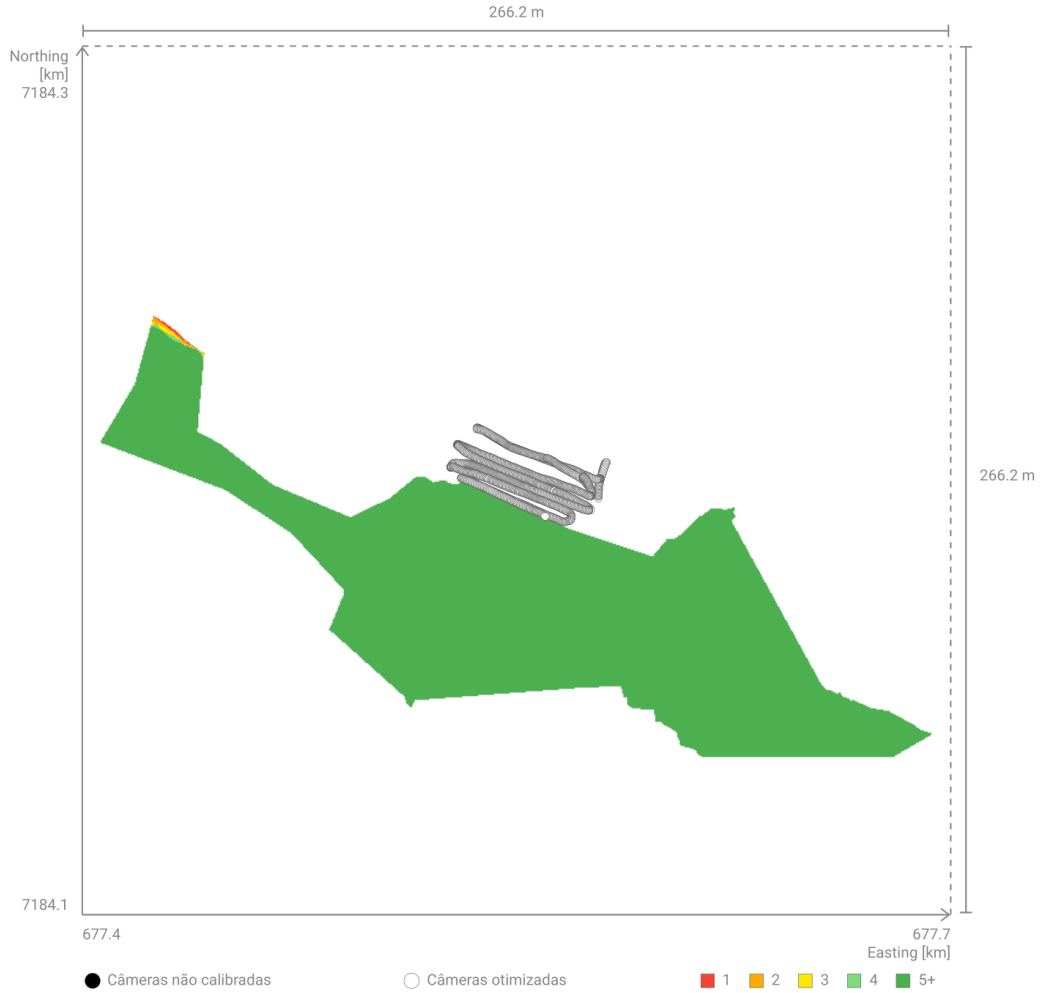
### Posições iniciais e otimizadas da câmera



Posições da câmera.

QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK

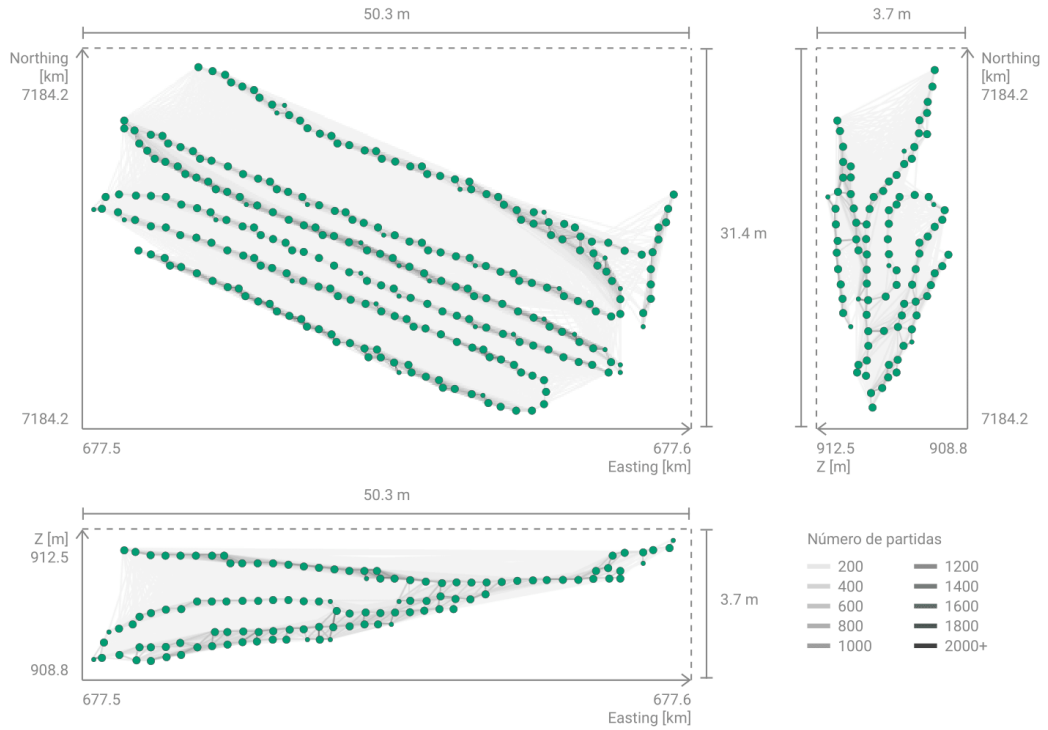
## Sobreposição



Este gráfico mostra o número de imagens sobrepostas para cada pixel da visualização do DSM. Para aplicações precisas de modelagem e mapeamento 3D, a sobreposição deve estar em verde, ou seja, cada pixel deve estar visível em mais de 5 imagens.

QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK

## Correspondências de pontos-chave 2D



Posições de imagens computadas com links entre imagens correspondentes. A espessura dos links indica o número de pontos-chave 2D correspondentes entre as imagens. Links finos indicam links fracos e requerem pontos de ligação manuais ou mais imagens. As diferentes cores identificam os blocos de calibração distintos. As diferentes cores identificam os blocos de calibração distintos. Para melhorar a visibilidade, as posições das câmeras podem ser ligeiramente alteradas e múltiplas câmeras podem ser agrupadas em um único ponto no gráfico. O grupo de múltiplas câmeras é indicado por um ponto maior no gráfico.

QR-22/06/2025/ NTRIP\_RTK

## Hardware e configurações



### Informação do sistema

Hardware: CPU: AMD Ryzen 5 4600G with Radeon Graphics, cpus=1, threads=12  
 RAM: 15.39 GB  
 GPU: ATI Technologies Inc. AMD Radeon RX 580 2048SP (Motorista: 4.1.0 Core Profile Context 24.9.1.240813)  
 Sistema operacional: Windows 11

### Coordenar sistemas de referência

Sistemas de referência de coordenadas de imagem	SIRGAS 2000 - EPSG:4674 WGS 84 - EPSG:4326
Sistema de referência de coordenadas do projeto	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S - EPSG:31982

### Configurações de processamento

Calibração <span>Concluído</span>	Nuvem de pontos de profundidade <span>Concluído</span>	Nuvem de pontos densa <span>Concluído</span>
Modelo: PIX4Dcatch Pipeline: Localização e orientação confiáveis Escala da imagem: 1 Confiança interna: Baixo Confiança externa: Padrão Otimiza os parâmetros internos com os pontos de ligação Desabilitado Máximo de pontos-chave extraídos: Automático Use mapas de profundidade: Ativado Use ITPs automáticos: Desativado		Algoritmo: Hardware acelerado Escala da imagem: 1/2 Densidade: Alto Número mínimo de correspondências: 3 Multiescala: Ativado Filtro de ruído: Ativado Filtro do céu: Ativado Com reconhecimento de máscara: Desabilitado
26m 11s	1m 32s	1h 18m 31s

Profundidade e fusão densa <span>Concluído</span>	Malha <span>Concluído</span>
Distância: 0.025 m	Nuvem de pontos de entrada: Profundidade e fusão densa Modelo: Escalável Modelo: PIX4Dcatch Simplificação do modelo: Fraco Deghosting: Forte Reconhecimento de plano: Desativado Máscara do céu: Ativado Com reconhecimento de máscara: Desabilitado Melhorias de interior: Desabilitado
<1s	57m 49s