

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSIANE ANTONIOLLI DE ARAUJO

RECONSTITUIÇÃO DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA DA CAPELA-MOR SÃO
FRANCISCO DE PAULA DEMOLIDA EM 1915, EMPREGANDO-SE
MONORRESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA E VARREDURA A LASER

CURITIBA

2022

JOSIANE ANTONIOLLI DE ARAUJO

RECONSTITUIÇÃO DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA DA CAPELA-MOR SÃO
FRANCISCO DE PAULA DEMOLIDA EM 1915, EMPREGANDO-SE
MONORRESTITUIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA E VARREDURA A LASER

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, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientadores:

Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga,
Ma. Eng. Kalima Mendes Pitombeira e
M.Sc. Eng. Samir de Souza Oliveira Alves.

CURITIBA

2022

Dedico essa jornada aos meus pais, José e Eliane.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais que não mediram esforços para que eu tivesse a chance de uma vida melhor. Foram eles que me ensinaram a lição mais importante e que me fez chegar até aqui: *“siga o seu próprio caminho com amor e dedicação”*. Tenho muito orgulho de vocês, obrigada por tudo.

Agradeço também a minha irmã, Cassiane, que sempre esteve ao meu lado mesmo que à distância, por seu coração generoso e disposto a oferecer suporte. Ao meu irmão, Giovani, que se apresentou no fim dessa trajetória incentivando e dando valor ao que construí.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Luis Augusto Koenig Veiga, Engenheira Mestra Kalima Mendes Pitombeira e Engenheiro Mestre Samir de Souza Oliveira Alves, principalmente por acreditarem no meu potencial, e por todo conhecimento compartilhado durante esse trabalho, sou eternamente grata a confiança depositada em mim.

Aos mestres que contribuíram na minha formação durante o curso de graduação, agradeço a disponibilidade, paciência e dedicação.

Aos amigos que me acompanham ao longo da vida e aos que encontrei na Universidade, todos esses que de uma forma ou de outra estiveram comigo nessa jornada, agradeço o apoio e a companhia nos piores e melhores momentos, levo-os comigo em afeto no coração.

A coordenação do curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura por todo suporte, ao Laboratório de Geodésia Aplicado à Engenharia (GEENG) por fornecer os recursos e infraestrutura para que esse trabalho fosse realizado, e a Universidade Federal do Paraná pelo importante papel de oferecer à comunidade a formação de profissionais competentes.

“A academia não é o paraíso, mas o aprendizado, é um lugar onde o paraíso pode ser criado. A sala de aula com todas suas limitações continua sendo ambiente de possibilidades. Nesse campo de possibilidades, temos a oportunidade de trabalhar pela liberdade, exigir de nós e de nossos camaradas uma abertura da mente e do coração que nos permite encarar a realidade ao mesmo tempo em que, coletivamente, imaginemos esquemas para cruzar fronteiras, para transgredir. Isso é a educação como prática da liberdade”. (HOOKS, 2013).

RESUMO

Uma parte de destaque do centro histórico de Curitiba na Praça Professor João Cândido são as Ruínas de São Francisco. Trata-se de parte do que sobrou da obra inacabada de expansão da antiga igreja de São Francisco de Paula, demolida no início do século XX para a construção do Belvedere. A construção da Igreja São Francisco de Paula iniciou-se em 1799 por influência de Manoel Gonçalves Guimarães, figura social importante da época. A capela-mor foi construída em caráter de urgência para que os fiéis pudessem frequentar o local e realizar as celebrações enquanto a obra completa não era concluída. Por aproximadamente um século o cenário se manteve assim e não houve avanços significativos na obra original da Igreja, a passos lentos haviam sido levantadas apenas as paredes da fachada. Em 1915, em obras de modernização da cidade de Curitiba, a capela-mor foi demolida, construindo-se próximo ao local o Belvedere preservado até hoje. Já as ruínas da construção da igreja, por motivos desconhecidos e rodeados de lendas e mitos, foram mantidas por pelo menos dois séculos e seguem protegidas, agora tombadas como patrimônio histórico do município. Em 2019, em obra de revitalização do Belvedere, encontrou-se restos mortais de um sepultamento no local cuja identificação e importância histórica seguem uma incógnita para a história. Por isso, o objetivo desse trabalho é identificar no cenário atual a posição geográfica aproximada da capela-mor em relação às Ruínas de São Francisco, e, deste modo, reconstruir o cenário ali existente anterior à demolição da capela-mor em 1915, por meio de técnicas fotogramétricas de monorrestituição e varredura a laser, para que assim, arqueólogos e historiadores possam apoiar-se na ciência para desmistificar alguns fatos históricos.

Palavras-chave: Monorrestituição. Fotogrametria. Laser-Scanner. Captura-de-Realidade. Ruínas-de-São-Francisco. Investigação. História. Arqueologia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de interesse	17
Figura 2 - Vista frontal da capela-mor (foto antiga 1).	19
Figura 3 - Vista lateral da capela-mor (foto antiga 2).	19
Figura 4 - Planta de localização espacial da Capela de São Francisco de Paula e o Belvedere.	21
Figura 5 - Fluxograma de trabalho	23
Figura 6 – Laser Scanner BLK360	25
Figura 7 - Campo de visão do Laser (FoV)	26
Figura 8 - Croqui das posições de instalação das estações de varredura	28
Figura 9 - Operação do equipamento em campo	29
Figura 10 - Conexão Wi-Fi para transferência de dados Laser Scanner.....	30
Figura 11 - Processo de registro de nuvem de pontos.....	31
Figura 12 - Registro das nuvens de pontos.....	32
Figura 13 - Filtragem da nuvem de pontos no <i>software</i> Cyclone REGISTER	33
Figura 14 – Filtragem da nuvem de pontos por exclusão de pontos, no <i>software</i> Cyclone REGISTER.....	33
Figura 15 - Exemplo de filtragem, no <i>software</i> Cyclone REGISTER.....	34
Figura 16 - Formatação do arquivo da nuvem de pontos no formato <i>pts</i>	35
Figura 17 - Recorte da nuvem de pontos para a área de interesse das fachadas	36
Figura 18 - Definição do plano e da reta que simplificam a condição da fotografia...37	
Figura 19 - Orientação relativa entre a nuvem de pontos e o plano da fotografia.	39
Figura 20 - Orientação do conjunto de dados em relação ao sistema global.	40
Figura 21 - Coleta de pontos amostrais na nuvem de pontos	41
Figura 22 - Sistema Referencial Digital	42
Figura 23 - Coleta de pontos amostrais para a foto antiga 1, no <i>software</i> QGIS	43
Figura 24 - Pontos de interesse coletados na foto 1.	47
Figura 25 - Pontos de interesse coletados na foto 2.	47
Figura 26 - MDS utilizado na implementação da monorrestituição.	48
Figura 27 - Distância entre o sensor de varredura e objeto da cena.....	51
Figura 28 - Região de coleta dos pontos amostrais na foto 1.	52
Figura 29 - Pontos coletados na foto 1.....	52
Figura 30 - Região de coleta dos pontos amostrais na foto 2	54

Figura 31 - Pontos coletados na foto 2.....	55
Figura 32 - Pontos de checagem plotados no MDS.	59
Figura 33 - Pontos monorrestituídos pela a foto 1.....	61
Figura 34 - Pontos monorrestituídos pela a foto 2.....	62
Figura 35 - Pontos monorrestituídos plotados no MDS.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações da câmera HDR.....	25
Tabela 2 - Especificações do Laser Scanner	25
Tabela 3 - Qualidade do registro das nuvens de pontos	50
Tabela 4 - Coordenadas dos pontos de controle na foto 1.....	52
Tabela 5 - Coordenadas dos pontos de controle na nuvem de pontos (foto1).	53
Tabela 6 - Coordenadas dos pontos de checagem na foto 1.	53
Tabela 7 - Coordenadas dos pontos de checagem na nuvem de pontos (foto1).	53
Tabela 8 -Coordenadas dos pontos de controle na foto 2.....	55
Tabela 9 - Coordenadas dos pontos de controle na nuvem de pontos (foto 2).	55
Tabela 10 - Coordenadas dos pontos de interesse na foto 1	56
Tabela 11 - Coordenadas dos pontos de interesse na foto 2.	56
Tabela 12 - Ajustamento dos parâmetros da DLT para a foto antiga 1.	57
Tabela 13 - Ajustamento dos parâmetros da DLT para a foto antiga 2.	57
Tabela 14 - Parâmetros de Transformação da DLT para a foto 1.	57
Tabela 15 - Parâmetros de Transformação da DLT para a foto antiga 2.	58
Tabela 16 - Coordenadas dos pontos de checagem na nuvem de pontos original. ...	59
Tabela 17 - Coordenadas dos pontos monorrestituídos da foto 1 na nuvem de pontos original.	60
Tabela 18 - Coordenadas dos pontos monorrestituídos da foto 1 na nuvem de pontos original.	61

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

DLT	- Direct Linear Transformation (Transformação Linear Direta)
MDS	- Modelo Digital de Superfície
SRD	- Sistema Referencial Digital
QGIS	- Quantum GIS (<i>software</i> livre)
RGB	- <i>Red Green Blue</i>
FoV	- <i>Field of View</i>
C	- Coluna
L	- Linha
X	- Coordenada X
Y	- Coordenada Y
Z	- Coordenada Z
3D	- Três Dimensões, ou tridimensional.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO.....	17
1.1.1 Objetivos específicos.....	17
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	18
2 MATERIAIS.....	22
3 MÉTODOS	23
3.1 LEVANTAMENTO POR VARREDURA LASER SCANNER TERRESTRE	24
3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE VARREDURA.....	29
3.2.1 Registro	30
3.2.2 Filtragem	32
3.2.3 Reamostragem	35
3.3 TRANSFORMAÇÃO ENTRE REFERENCIAIS	36
3.4 COLETA DE PONTOS AMOSTRAIS NA NUVEM DE PONTOS	40
3.5 COLETA DE PONTOS AMOSTRAIS NA IMAGEM	41
3.6 TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA (DLT)	43
3.6.1 Ajustamento das observações	44
3.7 MONORRESTITUIÇÃO.....	45
3.7.1 Coleta de pontos de interesse	46
3.7.2 Modelo digital de superfície (MDS)	48
3.7.3 Controle de qualidade dos parâmetros ajustados	48
4 RESULTADOS.....	50
4.1 REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS	50
4.2 COLETA DE PONTOS AMOSTRAIS	51
4.3 COLETA DE PONTOS DE INTERESSE NAS FOTOS ANTIGAS	56
4.4 PARÂMETROS CALCULADOS DA DLT	56
4.5 MONORRESTITUIÇÃO.....	58
4.5.1 Controle de qualidade por pontos de checagem	59
4.5.2 Determinação das coordenadas da Capela-mor São Francisco de Paula	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS.....	66

APÊNDICE 1 – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM MATLAB PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA DLT	68
APÊNDICE 2 – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM MATLAB PARA MONORRESTITUIÇÃO	72

1 INTRODUÇÃO

A história do Brasil sempre esteve muito conectada às crenças, mitos, lendas, forças da natureza, deuses, seres magníficos de consciência sobre humana que norteavam a ordinária experiência humana na Terra. Muitas dessas histórias, bem como a cultura nativa indígena e a de matriz africana, se perdeu ao longo do caminho devido à violência e exploração (BRIGHENTI, 2016), e a elas devemos boa parte do que construímos até aqui. Sem esquecer nem diminuir cada viés histórico do que nos compõe, pode-se dizer que a partir de um certo período, todas essas histórias se confundem e unidas caracterizam uma narrativa só, que hoje chamamos de Brasil, um país continental, multifacetário e plural.

A análise de registros históricos deve levar em consideração o contexto cultural da época, porque tudo que foi registrado depende dos interesses coletivos e individuais que permeavam o período em questão. Para que tais registros aconteçam, historiadores coletam dados confiáveis para utilizar em suas pesquisas. Esses dados oriundos das mais variadas fontes formam registros históricos documentados que, devido sua própria existência, são estabelecidos como verdade. Porém, uma vez estabelecida, a história ainda pode ser revisitada. No intuito de agregar dados a esses registros, é possível percorrer o sentido contrário da via que projeta o futuro e recriar cenários já não mais existentes em sua integridade, por meio de fotografias antigas, por exemplo. Para além de apenas observá-las, pode-se extrair informações delas aplicando-se técnicas de fotogrametria.

O estudo e aplicação da fotogrametria nesses casos permite mensurar as dimensões reais dos objetos e as distâncias entre eles (ANDRADE, 2003), seja em fotografias analógicas ou digitais, bem como a precisão dessas medidas, o que possibilita indicar a confiabilidade da técnica. Nesses casos, o processo empregado pode ser realizado por diferentes métodos, o que dependerá do tipo de dado disponível.

No presente trabalho será realizada a monorrestituição fotogramétrica de duas fotos antigas utilizando a Transformação Linear Direta (*Direct Linear Transformation* - DLT) com base em ajustamento das observações e a varredura laser para a criação de um Modelo Digital de Superfície (MDS) do objeto de estudo, para posterior coleta de coordenadas.

O estudo foi motivado pela obtenção de fotografias antigas da região da Capela-mor São Francisco de Paula juntamente com o contexto histórico em que a área se insere. Há registros de estudos semelhantes a esse que reforçam o interesse nessa região em prol da recuperação cultural da história (KOZAN; KOZAN, 2006). Essa área encontra-se na cidade de Curitiba – PR, na Praça Prof. João Cândido, onde estão as Ruínas de São Francisco, patrimônio histórico do município, conforme a Figura 1 a seguir.



Figura 1 - Área de interesse
Fonte: Autora (2022).

1.1 OBJETIVO

Identificar a posição geográfica da capela-mor em relação às Ruínas de São Francisco por meio de técnicas fotogramétricas de monorrestituição a partir de duas fotografias antigas do local.

1.1.1 Objetivos específicos

- Coletar arquivos fotográficos da região das Ruínas de São Francisco;

- Realizar o levantamento de dados Laser Scanner na região das Ruínas;
- Processar os dados Laser Scanner levantados em campo;
- Gerar o Modelo Digital de Superfície das áreas de interesse que aparecem nas imagens antigas;
- Coletar coordenadas homólogas na nuvem de pontos e nas fotografias antigas;
- Elaborar o código computacional para encontrar os parâmetros geométricos das imagens utilizando a DLT direta;
- Coletar coordenadas da capela nas imagens antigas;
- Elaborar o código computacional para encontrar as coordenadas tridimensionais da Capela-Mor nas imagens utilizando a DLT inversa;
- Analisar os parâmetros obtidos e as precisões das coordenadas obtidas pelo modelo;
- Projetar as medidas dos lados da capela-mor na nuvem de pontos Laser.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A capital do Paraná, Curitiba, cuja cultura é fortemente influenciada pela religião católica cristã. Iniciou como um pequeno povoado no qual as atividades econômicas e sociais se concentravam na região conhecida hoje como Centro Histórico de Curitiba. Segundo Baptista (2004), em meados de 1790 o papel das igrejas era relevante em aspectos políticos e administrativos das organizações sociais que compunham os povoados, e por esse motivo, a conservação desses espaços bem como a construção de novas instalações era um assunto importante. Em visita periódica a Curitiba, o Bispo de São Paulo constatou a má conservação das instalações mantidas na época e solicitou providências. Foi então que em 15 de maio de 1799 Manoel Gonçalves Guimarães, personalidade influente da época, solicitou a concessão de terrenos públicos para a construção da Igreja São Francisco de Paula no alto do morro mais próximo ao povoado. No mesmo ano deu-se início a construção (BAPTISTA, 2004).

A igreja seria construída nos modelos da época, robusta e composta por paredes de pedra, porém, devido ao caráter de urgência de utilização dessas instalações, iniciou-se a obra pela Capela-mor para que pudesse ser ocupada para seus devidos fins antes mesmo da conclusão da obra. A seguir na Figura 2 e Figura 3 os registros da capela, observa-se que as paredes da fachada da capela contavam com a mesma estrutura de pedra utilizada na composição da fachada da igreja.



Figura 2 - Vista frontal da capela-mor (foto antiga 1).
Fonte: Acervo Casa da Memória, Curitiba.



Figura 3 - Vista lateral da capela-mor (foto antiga 2).
Fonte: Acervo Casa da Memória, Curitiba.

Após a conclusão das instalações da capela-mor em 1809, o Bispo de São Paulo autorizou a realização de cultos e missas. Em pouco tempo o local tornou-se referência aos devotos moradores do povoado, realizavam-se procissões levando a imagem de São Francisco de Paula pelas ruas da cidade em épocas de seca pedindo chuva (FONSECA, 2019), prática que se tornou uma tradição importante para as pessoas.

Além da função religiosa, entre 1829 e 1833 foi instalada na capela a Câmara Municipal pois ainda não havia prédios próprios para funções públicas e os vereadores encontravam-se dentro da Igreja Matriz (BAPTISTA, 2004).

O falecimento de Manoel Gonçalves Guimarães e a reforma da Igreja Matriz, contribuíram para que em 1860 a obra da Igreja São Francisco de Paula fosse interrompida (FONSECA, 2019). Nesse mesmo ano houve uma reforma na qual a parede frontal da capela é substituída. Em 1874 parte da sacristia é reconstruída e a capela recebe uma nova pintura (BAPTISTA, 2004). Algum tempo depois, conforme cita Baptista (2004), o Alto de São Francisco, como ficou conhecido, passou a se chamar oficialmente de Largo do Observatório devido à sua situação privilegiada como mirante. Fato confirmado durante a Revolução Federalista, ocasião em que guerrilheiros utilizavam o espaço para monitorar tropas inimigas.

Em obras de modernização da cidade, em 1915 foi demolida a capela-mor e no ano seguinte foi construído o Belvedere, preservando-se apenas as Ruínas de São Francisco (BAPTISTA, 2004).

A história das Ruínas é rodeada por mitos e lendas. Na época das atividades religiosas, o espaço aos fundos da capela-mor era utilizado como cemitério e lá eram enterradas crianças não batizadas, suicidas, hereges e executados por Lei. Acredita-se até hoje que é possível ouvir os gritos dessas pessoas no local, principalmente crianças, em noites de sexta-feira. Outros registros citam uma serpente enterrada sob o terreno da construção da Igreja, símbolo de discórdia para a época, cujo corpo enterrado do animal às vezes se movimenta trincando as paredes e muros das construções. Acredita-se que esse foi o motivo de diversas reformas e da demolição da capela (BAPTISTA, 2004).

O mistério pelo qual ruínas de uma construção inacabada foram preservadas por pelo menos dois séculos é uma constante no tempo e desperta o interesse de historiadores, aqui cito o trabalho de Fonseca (2019). O desconhecimento de

detalhes dessa história faz com que a reconstrução dos fatos conte uma história diferente a cada um dos que se interessam por sua investigação.

A elaboração desse trabalho teve como inspiração a obra de Baptista (2004) que remonta o passado por meio do estudo histórico e da análise arquitetônica da estrutura remanescente, bem como de fotografias antigas. O cenário da época incluindo a capela-mor como parte integrante das Ruínas de São Francisco, pode ser observado na Figura 4 em que Baptista (2004) compara a localização espacial da Capela de São Francisco de Paula em relação ao Belvedere, e apresenta a planta que representa essa comparação.

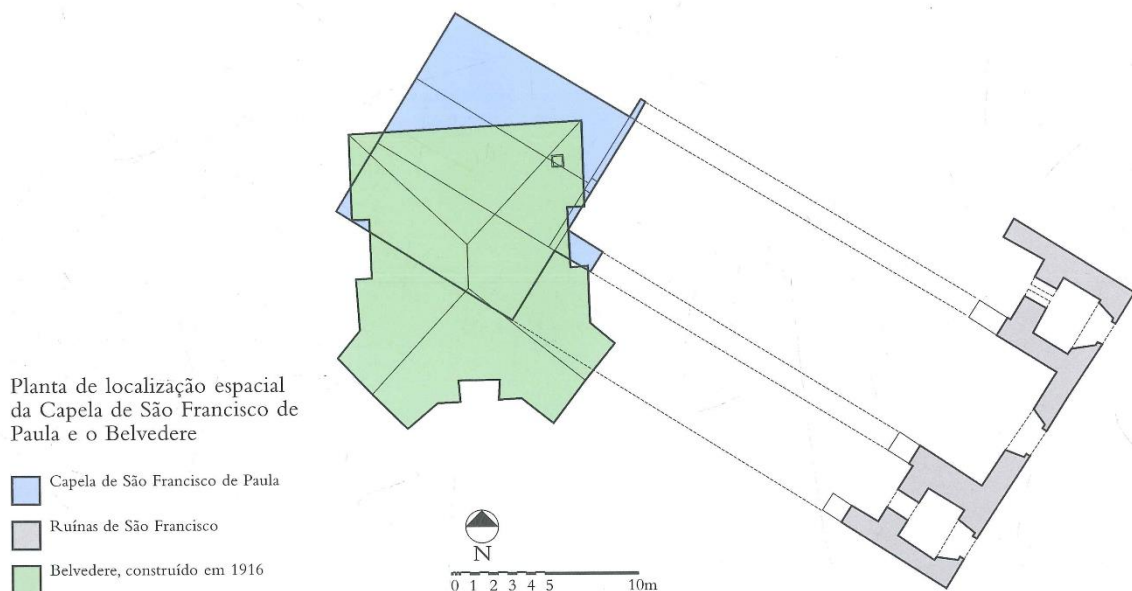


Figura 4 - Planta de localização espacial da Capela de São Francisco de Paula e o Belvedere.

Fonte: (BAPTISTA, 2004)

Descrevo no Item 3 os métodos propostos para o desenvolvimento desse trabalho e no Item 4 apresento os resultados.

2 MATERIAIS

Para a realização do levantamento de dados em campo da cena objeto de estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- Laser Scanner Leica BLK360;
- Acessórios do BLK360 conforme descrito no Manual do Usuário.
- Tablet para operação do *software* Cyclone Field;

Para a realização do projeto foram utilizados os seguintes *softwares*:

- *Software* Cyclone Field;
- *Software* BLK360 Data Manager;
- *Software* Cyclone Register;
- *Software* CloudCompare
- *Software* Quantum GIS
- Ambiente MatLab R2016a

3 MÉTODOS

O conhecimento das qualidades e limitações da imagem fotográfica é essencial para que se possa extrair dela o máximo de informações confiáveis (ANDRADE, 2003). Este trabalho foi realizado a partir de duas fotos antigas, das quais não existem registros técnicos importantes para a reconstrução do feixe de raio de luz perspectiva refletido pelas superfícies e que incide sobre o sensor utilizado, ou seja, não se sabe o tipo de câmera utilizada para que fosse possível identificar as características físicas do sensor. Além disso, não foi encontrada nenhuma informação sobre o autor das fotografias. A disponibilidade de informações foi o que determinou a escolha do método de monorrestituição como solução para este problema. Na Figura 5 são apresentadas as etapas para o desenvolvimento do trabalho a partir da metodologia proposta.

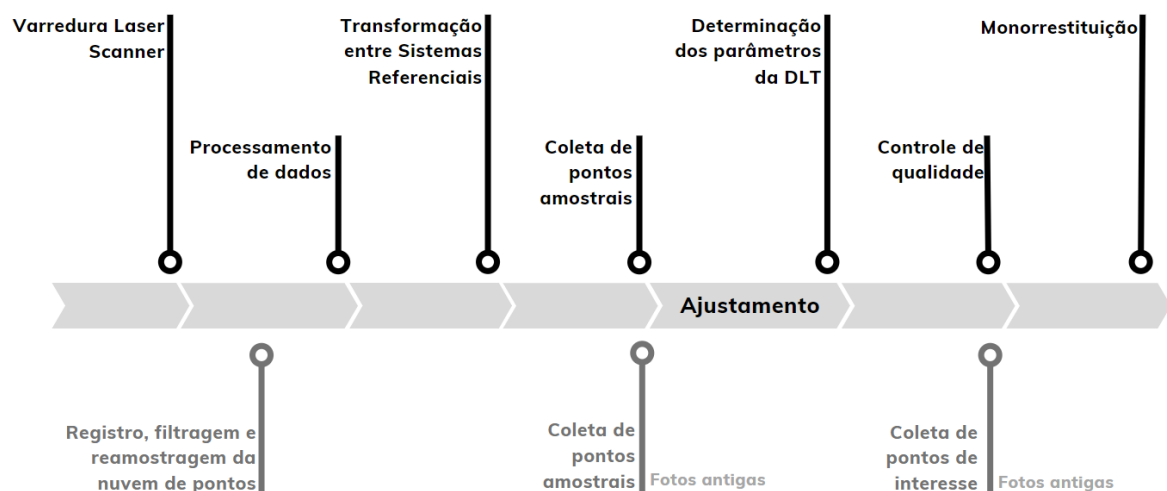


Figura 5 - Fluxograma de trabalho
Fonte: Autora (2022).

A partir da varredura de dados utilizando Laser Scanner Terrestre na área de interesse, foram processados esses dados através do registro das nuvens de pontos coletadas em cada instalação do equipamento e a filtragem e reamostragem da nuvem de pontos já registrada. Em seguida foi feita a coleta de pontos homólogos amostrais tanto na foto antiga quanto na nuvem de pontos laser. A partir desses pontos foram determinados os parâmetros de transformação da DLT pelo ajustamento das observações. Uma vez determinados os parâmetros da

transformação, realizou-se o controle de qualidade por pontos de checagem. Por fim, foram coletados os pontos de interesse na foto antiga, a partir dos quais aplicou-se a monorrestituição fotogramétrica.

A sequência de manipulação das imagens manteve-se a mesma em todos os processos apresentados neste trabalho. A primeira imagem manipulada (foto 1) possui dimensões 1600x778 pixels e mostra a Capela numa visão frontal (Figura 2), já a segunda imagem manipulada (foto 2) possui dimensões 800x485 pixels e mostra a Capela numa visão lateral (Figura 3).

3.1 LEVANTAMENTO POR VARREDURA LASER SCANNER TERRESTRE

O Sistema de Varredura Laser Terrestre permite representar ambientes a partir da determinação de coordenadas tridimensionais de pontos gerados a partir de medidas de distâncias, ângulos verticais e direções horizontais entre o sensor e os objetos de varredura. As distâncias medidas para o cálculo das coordenadas são determinadas em função do tempo entre a emissão e recepção do pulso laser. Este processo é realizado milhões de vezes por minuto, gerando a denominada nuvem de pontos. A velocidade da varredura dependerá do modelo de equipamento empregado.

O levantamento foi realizado no dia 12 de fevereiro de 2022, pela manhã, na Praça João Cândido em Curitiba-PR.

Empregou-se o equipamento Leica BLK360 (Figura 6) que além do sensor laser, conta com três câmeras digitais HDR integradas e uma câmera termal. As especificações das câmeras digitais HDR podem ser observadas na Tabela 1.



Figura 6 – Laser Scanner BLK360
Fonte: (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Tabela 1 - Especificações da câmera HDR

Dados da câmera	
Tipo	Sensor de cor, distância focal fixa
Imagem individual	2592 x 1944 pixels, 60° x 45° (V x Hz)
Domo completo	30 imagens, retificadas espacialmente de forma automática, 150 Mpx, 360° x 300°
Balanço de branco	Automático
HDR	Automático
Flash	LED para iluminação contínua
Alcance mínimo	0,6 m

Fonte: Adaptado de (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Das especificações da câmera ressalta-se a formação de uma imagem retificada espacialmente de forma automática que recobre uma área de 360° x 300° ao redor do equipamento, permitindo orientar de forma visual a nuvem de pontos. As especificações do sensor laser podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações do Laser Scanner

Laser de escaneamento

Classificação	Laser Classe 1 (de acordo com IEC 60825-1 (2014-05))
Comprimento da onda	830 nm (invisível)
Acurácia da medição individual	
Precisão do ponto 3D	6 mm a 10 m e 8 mm a 20 m
Dados de escaneamento	
Divergência do raio	0,4 mrad (FWHM, ângulo completo)
Diâmetro do raio em frente à janela	2,25 mm (FWHM)
Alcance mínimo	0,6 m
Alcance máximo	60 m a 78% albedo
Acurácia do intervalo	4 mm a 10 m e 7 mm a 20 m
Campo de visão	
Seleção	Sempre domo completo
Horizontal	360°
Vertical	300°
Ótica de escaneamento	Espelho rotativo vertical em base rotativa horizontal

Fonte: Adaptado de (LEICA GEOSYSTEMS, 2018)

O escaneamento Laser é realizado dentro do campo de visão do equipamento, o ângulo de varredura é chamado de *Field of View* (Fov), sendo 360° no sentido horizontal e 300° no sentido vertical, considerando principalmente o alcance máximo e mínimo de amplitude do pulso, conforme a Figura 7.

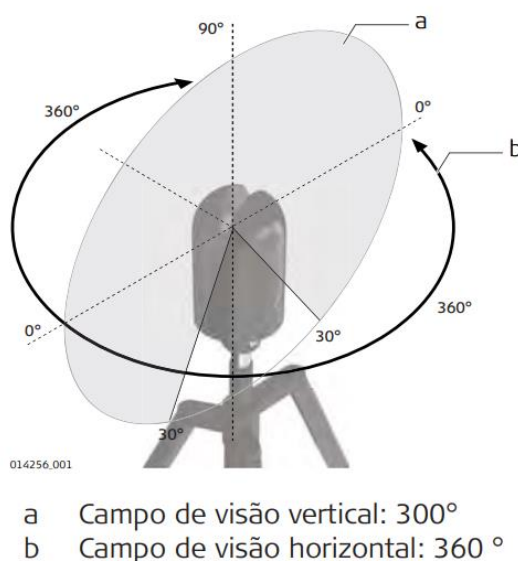


Figura 7 - Campo de visão do Laser (FoV)
Fonte: (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

O levantamento de dados em campo utilizando Laser Scanner iniciou-se pelo planejamento das estações de varredura. Essa etapa deve considerar as características técnicas do equipamento utilizado, bem como as condições das superfícies de interesse, levando em consideração os seguintes critérios:

- Alcance mínimo e máximo do Laser.
Devem ser consideradas no momento de instalação do equipamento, em cada uma das estações a distância entre objetos foi ponderada entre os limites apresentados na Tabela 2.
- Distância
O erro propagado é proporcional à distância entre o laser e o objeto escaneado, quanto maiores forem as distâncias maior a propagação do erro, quanto menores as distâncias, menor a propagação do erro.
- Obstruções
Deve-se evitar os elementos na cena que podem interferir na visualização de objetos importantes para a varredura, essas obstruções podem ser fixas, como árvores e construções, ou temporárias, como veículos e pessoas transitando por uma via.
- Sobreposição
Deve-se pensar na sobreposição entre varreduras, é imprescindível que se tenha regiões homólogas entre nuvens, possibilitando a realização do registro por meio de feições homólogas, uma vez que não foram utilizados alvos em campo.

Todos esses critérios devem ser ponderados *in loco* para que o número de instalações das estações de varredura e a sobreposição das cenas estejam coerentes com o objetivo do levantamento. O preciosismo com o qual serão considerados os critérios citados acima depende também da qualidade métrica esperada para os produtos gerados a partir da varredura. Neste trabalho foi utilizado o modo de varredura para aquisição de nuvem de pontos em alta densidade, disponível no BLK360, viabilizando níveis máximos de detalhamento.

Para que a região de interesse fosse mapeada, o sensor laser foi instalado em 10 posições, indicadas na cor azul no croqui (Figura 8). No centro da imagem está localizado o Belvedere. As imagens obtidas da antiga capela mostram ao fundo

algumas edificações que ainda estão preservadas na região e é esta particularidade que permitiu a realização da monorrestituição. Assim, as cenas foram planejadas de forma a levantar com detalhes as fachadas destas edificações bem como as ruínas e a área ao redor do Belvedere, localização provável da Capela.

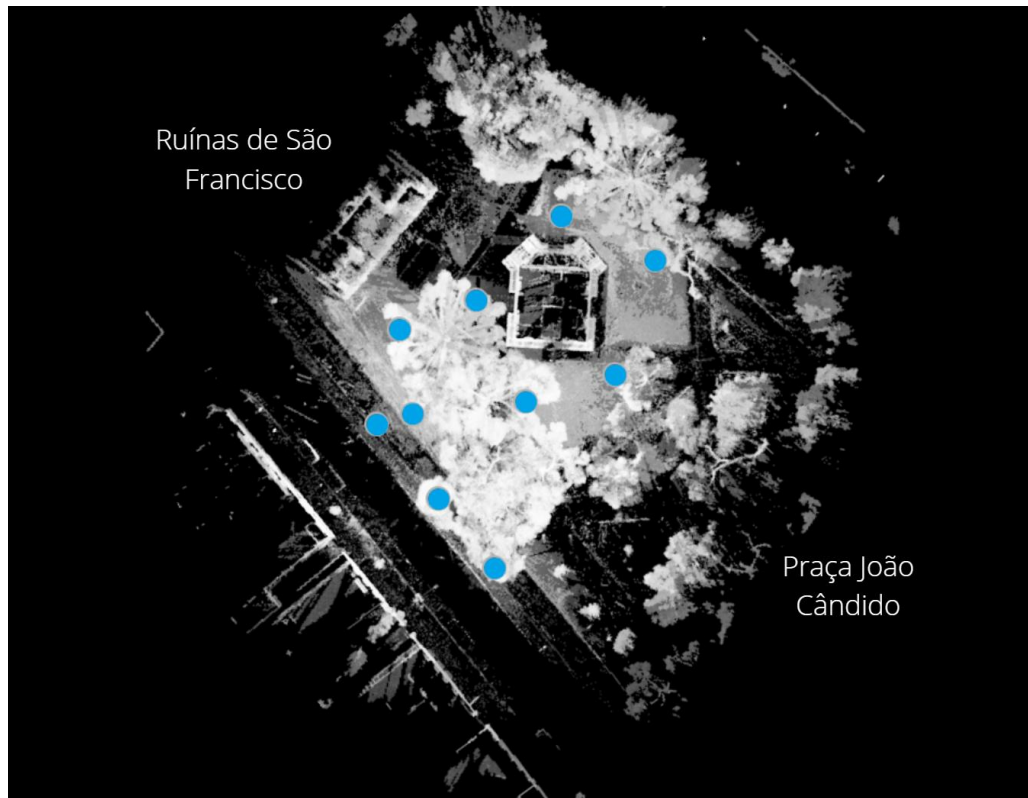


Figura 8 - Croqui das posições de instalação das estações de varredura
Fonte: Autora (2022).

A operação do equipamento foi realizada por meio do *software* Cyclone Field, no qual as seguintes configurações foram adotadas para cada uma das estações de instalação do equipamento:

- Emissividade: 0,95;
- Nível de ganho: Alto (-10 – 140°C);
- Modo de densidade de ponto: Alto (5mm a 10m);
- Tempo de escaneamento aproximado: 6 min e 10 s.

Na Figura 9, a autora do trabalho operando o laser scanner com o auxílio do tablet.



Figura 9 - Operação do equipamento em campo
Fonte: Autora (2022).

3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE VARREDURA

As nuvens de pontos coletadas em campo ficam armazenadas no próprio equipamento de varredura Leica BLK360. Para que fosse possível a manipulação desses dados, realizou-se a transferência destes para um ambiente computacional e utilizando o *software* BLK360 Manager, que possibilita a troca de dados entre o equipamento e o computador via conexão Wi-Fi, conforme pode ser observado na Figura 10.



- a Transferência de dados brutos do BLK360 a um dispositivo de computação. Consulte 4.2 Operação - Primeiros passos.

Figura 10 - Conexão Wi-Fi para transferência de dados Laser Scanner
 Fonte: (LEICA GEOSYSTEMS, [s.d.]).

Após a importação dos dados, foi realizado um *backup* de segurança dos dados brutos e iniciou-se o processamento dos dados de varredura em duas etapas conforme será descrito nos tópicos a seguir.

3.2.1 Registro

O registro das nuvens de pontos é o processo pelo qual todas as estações de varredura são compatibilizadas em um único sistema de referência. Neste caso, utilizou-se um sistema de referência local. O equipamento empregado estabelece um sistema de referência único para cada instalação (cena). Assim, para compor o modelo de toda área foi necessária esta compatibilização entre sistemas. Esse processo é realizado no *software* Cyclone REGISTER de forma manual, aplicando-se rotações e translações das nuvens de pontos coletadas em cada estação, conforme as imagens a seguir. Na Figura 11 são apresentadas duas cenas sobrepostas antes (Figura 11-a e Figura 11-c) e depois (Figura 11-b e Figura 11-d) do registro.

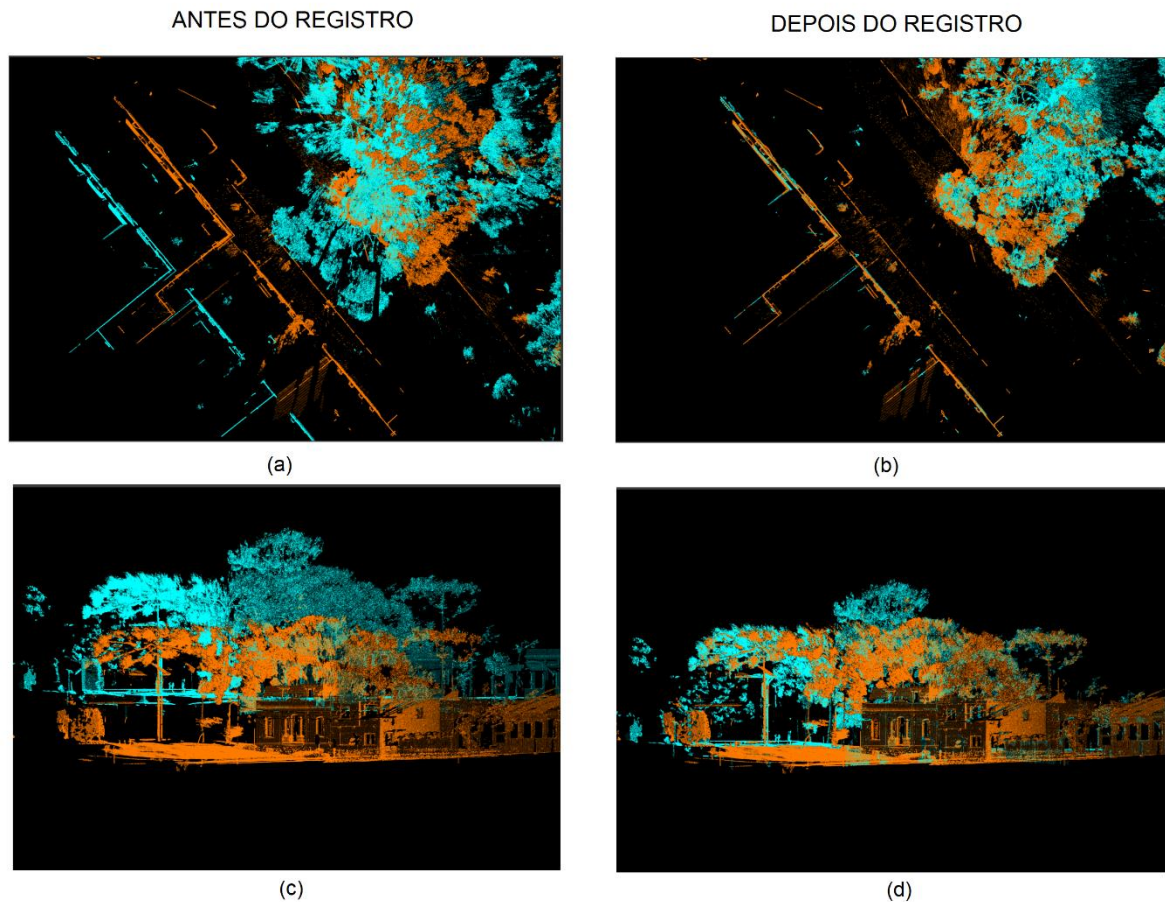


Figura 11 - Processo de registro de nuvem de pontos
Fonte: Autora (2022).

Os processos de registro se repetiram até que todas as nuvens de pontos estivessem concatenadas (*links*) (Figura 12), ou seja, em um mesmo referencial. Tal condição permitiu a construção de uma única nuvem de pontos com o máximo de informações tridimensionais possíveis representada, inclusive ruídos e feições indesejadas.

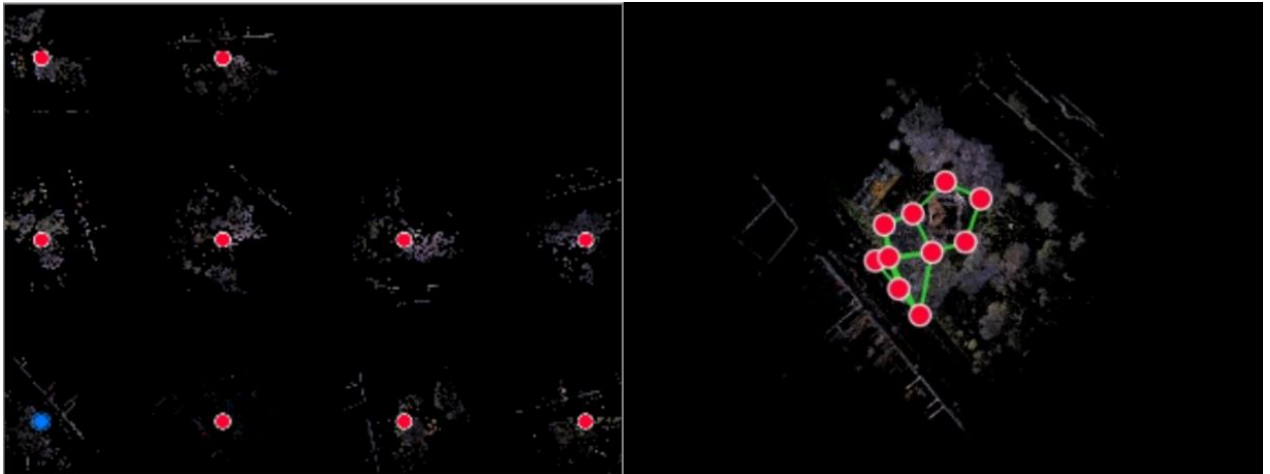


Figura 12 - Registro das nuvens de pontos
Fonte: Autora (2022).

A precisão do modelo é mensurada por meio da análise conjunta dessas compatibilizações de referenciais pelo *Bundle Adjustment*, nesse projeto a precisão alcançada foi de 0,009m conforme será apresentado com mais detalhes no 4.1. A nuvem de pontos gerada ao final desse processo foi exportada no formato pts e em seguida importada no *software* CloudCompare, onde prosseguiu-se com a filtragem.

3.2.2 Filtragem

Uma das dificuldades encontradas em campo foi a presença de objetos temporários incluídos na cena pela varredura, como carros e pedestres. Essas informações prejudicam a representação dos objetos importantes da cena e devem ser excluídos. Foram realizadas duas formas de filtragem, a primeira ainda dentro do *software* Cyclone REGISTER e a segunda no *software* CloudCompare.

Na Figura 13 é possível observar que valores RGB obtidos sobre um veículo que passou no instante de aquisição das fotografias, foram atribuídos aos pontos tridimensionais levantados pelo sensor laser sobre a fachada em uma das nuvens de pontos. Nesse caso, foram analisadas todas as nuvens de pontos cujo levantamento continha obstruções à fachada, excluindo o conjunto de pontos indesejado. Essa exclusão ocorreu em apenas uma nuvem e, devido à abundância de informações coletadas, não houve perdas referente a superfície de interesse.

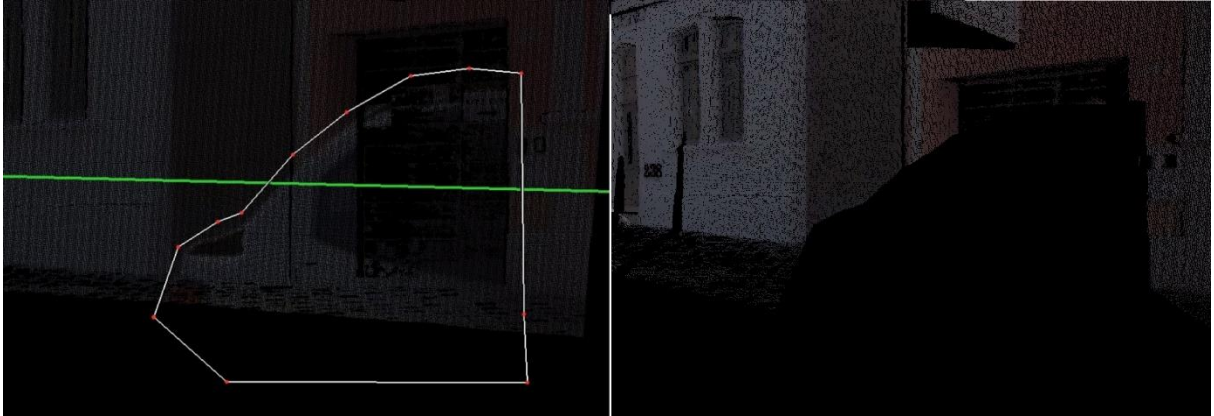


Figura 13 - Filtragem da nuvem de pontos no *software* Cyclone REGISTER
Fonte: Autora (2022).

Além disso, alguns pontos representados na nuvem acabam apresentando deslocamentos inexistentes, ou seja, representam feições irreais devido a interferências encontradas pelo pulso laser no momento do escaneamento. Esses pontos não representam a realidade e devem ser excluídos em um processo conhecido como limpeza de nuvem, que se resume na exclusão conjunta desses pontos após análise visual (Figura 14). O mesmo acontece com feições indesejadas, mas que de fato existem e foram escaneadas, como a presença de pessoas na cena Figura 15.

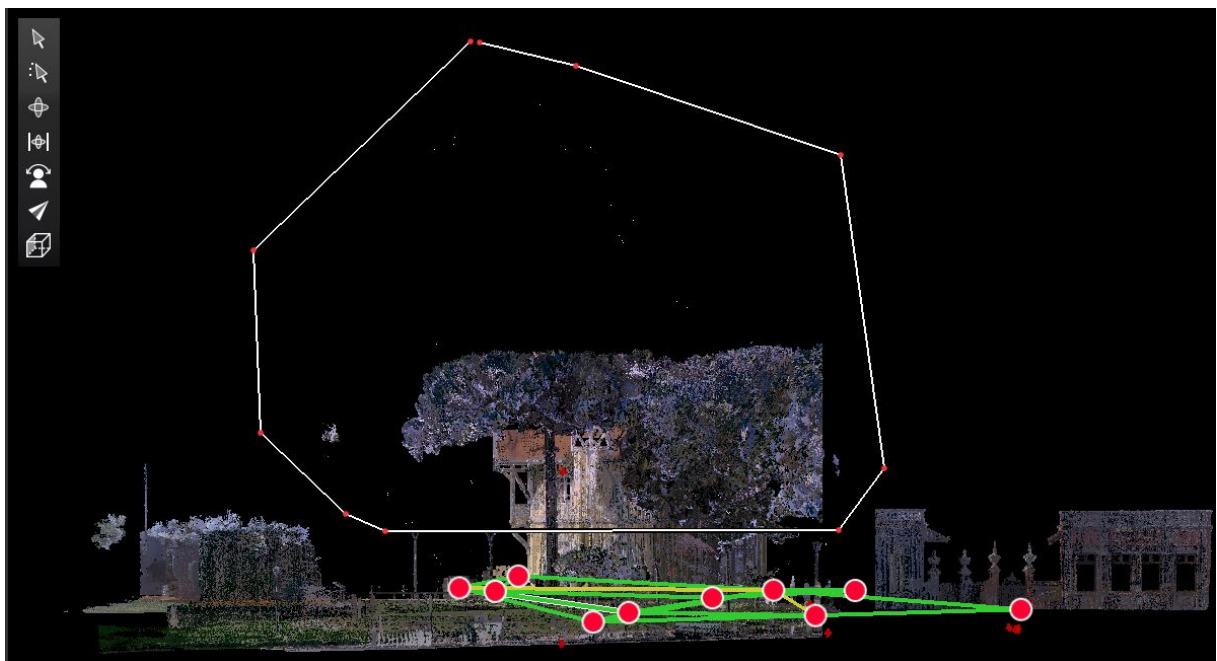


Figura 14 – Filtragem da nuvem de pontos por exclusão de pontos, no *software* Cyclone REGISTER.
Fonte: Autora (2022).



Figura 15 - Exemplo de filtragem, no software Cyclone REGISTER
Fonte: Autora (2022).

Ao encerrar essa etapa, a nuvem de pontos foi exportada em formato pts, cuja estrutura pode ser observada na Figura 16. Cada linha do arquivo representa um ponto escaneado e cada coluna contém os valores atribuídos de cada um desses pontos na ordem apresentada, iniciando pelas coordenadas X, Y e Z no referencial local, seguida do valor de Intensidade do pulso laser e os três últimos números dizem respeito aos valores RGB que determinam a cor do ponto. Esse arquivo apesar de ter formatação simples, ocupa espaço significativo em memória de *hardware*.

número de pontos

2071072

X	Y	Z	Intensidade	RGB
130.96200562	-24.58600044	1.45299995	-1945.000000	36 37 48
131.06300354	-24.07699966	0.32200000	-1708.000000	1 1 1
131.06300354	-24.07500076	0.33500001	-1513.000000	1 1 1
131.06500244	-24.07799911	0.33100000	-1573.000000	39 37 45
131.06300354	-24.07200050	0.32900000	-1498.000000	41 41 50
131.07200623	-24.06599998	0.32900000	-1477.000000	42 43 51
131.06199646	-24.08300018	0.34000000	-1553.000000	39 37 45
131.06199646	-24.08099937	0.34999999	-1417.000000	44 44 54
131.06900024	-24.06599998	0.33700001	-1042.000000	37 37 46
131.06300354	-24.07999992	0.34900001	-1420.000000	35 37 45
131.06900024	-24.06599998	0.34999999	-1110.000000	37 36 45
131.05499268	-24.07200050	0.35600001	-1630.000000	35 37 45
131.06500244	-24.07500076	0.35800001	-1250.000000	35 37 45
131.06300354	-24.07799911	0.36199999	-1883.000000	1 1 1
130.55200195	-23.75499916	0.15000001	-1572.000000	43 42 48
130.54600525	-23.75799942	0.15700001	-1553.000000	43 43 47
130.55799866	-23.74500084	0.15400000	-1538.000000	46 44 52

Figura 16 - Formatação do arquivo da nuvem de pontos no formato *pts*
 Fonte: Autora (2022).

3.2.3 Reamostragem

O escaneamento laser de alta densidade gera uma quantidade significativa de dados tridimensionais e exige desempenho de *hardware* no processamento. Esse nível de detalhamento foi utilizado para que tivéssemos liberdade de excluir pontos no processamento de dados sem perda significativa de informação. Nesse sentido, para facilitar ainda mais a manipulação da nuvem de pontos, foi realizado o processo de corte e reamostragem da nuvem no *software* CloudCompare. Na Figura 17 é possível observar que foi realizado um corte nas nuvens, deixando apenas a fachada das casas antigas. Esse procedimento não prejudicou a obtenção de informações devido à abundância de pontos coletados.

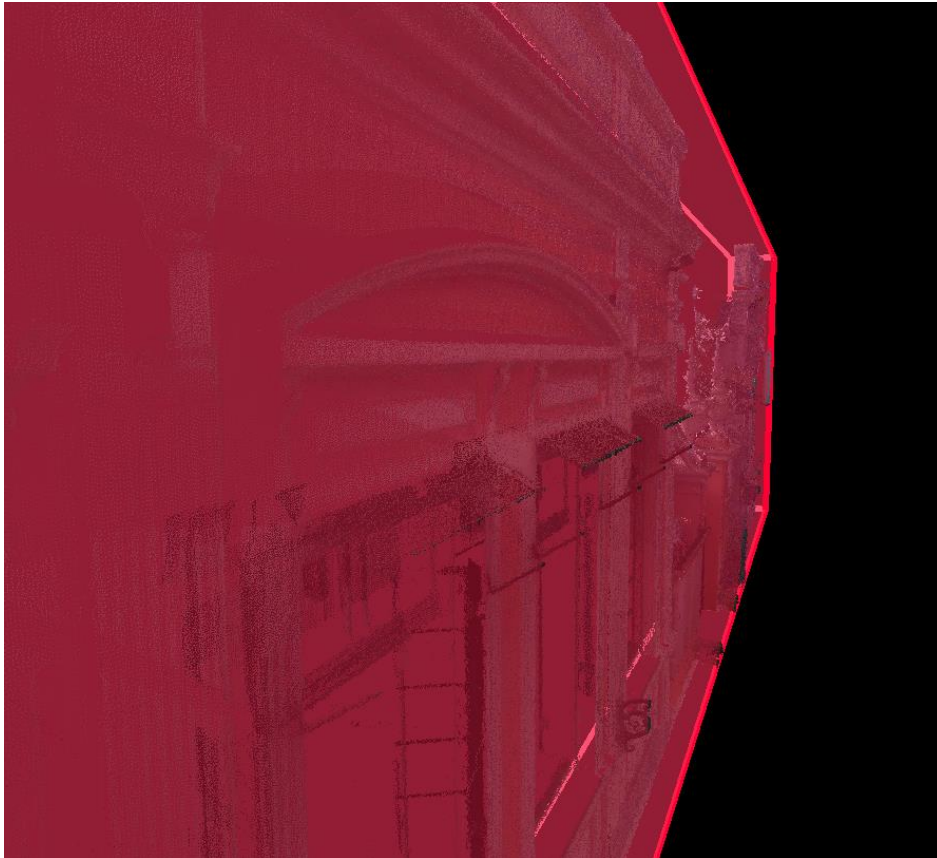


Figura 17 - Recorte da nuvem de pontos para a área de interesse das fachadas
Fonte: Autora (2022).

A reamostragem reduz a nuvem excluindo uma quantidade de pontos significativa de acordo com o método de espaço mínimo entre pontos, o método garante a exclusão segura de pontos de modo que não se perca informação.

Após registro, filtragem e reamostragem, a nuvem de pontos está pronta para manipulação conforme o fluxo de trabalho apresentado.

3.3 TRANSFORMAÇÃO ENTRE REFERENCIAIS

A fotografia é considerada uma projeção perspectiva central de um objeto fotografado (GONÇALVES, 2006). Como tal, ao reconstituir geograficamente a posição de objetos da imagem faz-se necessário percorrer o caminho inverso da tomada de uma fotografia e nesse processo, algumas transformações no espaço são necessárias. Para isso, é essencial conhecer a posição aproximada do eixo óptico da câmera no instante de tomada da foto no espaço objeto. Considerando um

plano ortogonal à essa reta, é possível representar a orientação aproximada do plano focal (no qual a imagem é formada) no Referencial Tridimensional.

A definição da reta que representa o eixo óptico da câmera se deu a partir de análise com parâmetros preliminares da transformação DLT, esses parâmetros são determinados aplicando-se a DLT conforme descrito no Item 3.6 em ao menos duas coordenadas da nuvem de pontos original, condição de formação de uma reta no espaço, até que os mesmos valores de coluna e linha, correspondentes ao centro da foto, fossem encontrados. Para tal, foram coletadas as coordenadas X, Y e Z de dois pontos no espaço do sistema referencial da nuvem de pontos original que, quando aplicados na equação DLT inversa, resultassem nos valores de Coluna e Linha do centro da imagem. A primeira foto possui dimensão de 1600x778 pixels, por exemplo, então os valores de Coluna e Linha do pixel central são (800,389). Definida a reta, foi possível traçar um plano ortogonal à reta que representa o eixo óptico da câmera e tangente ao ponto principal da imagem de acordo com a posição aproximada da câmera, gerando um plano e uma reta no espaço conforme a Figura 18.

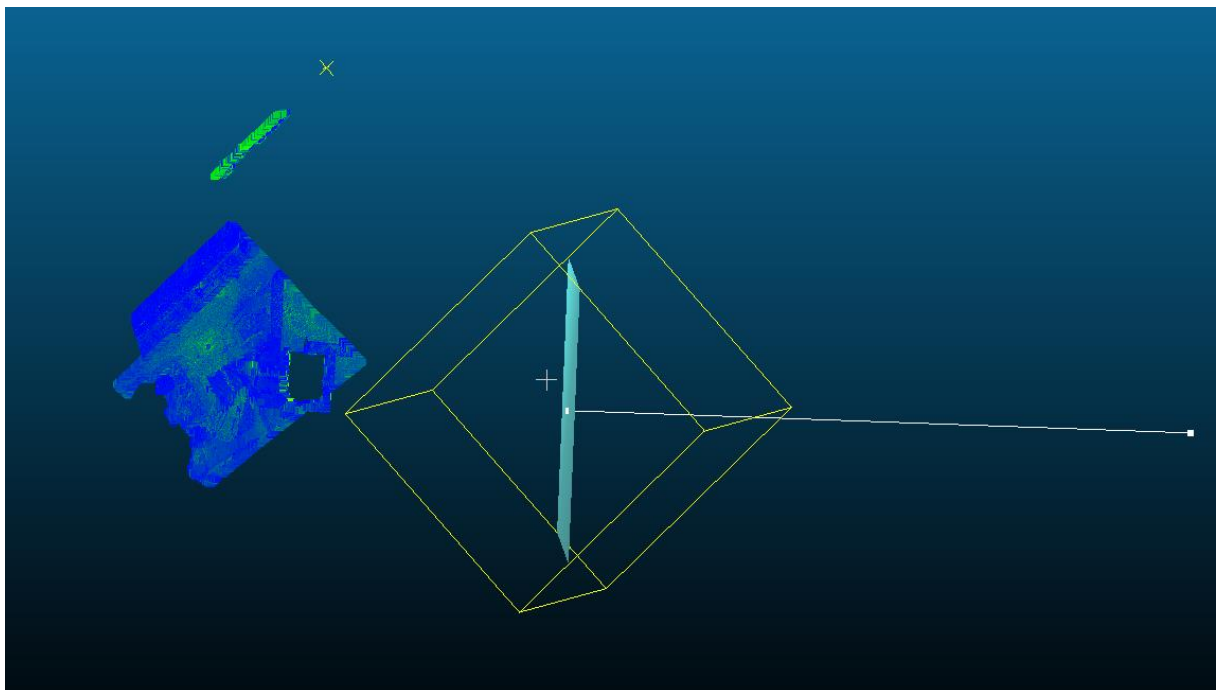


Figura 18 - Definição do plano e da reta que simplificam a condição da fotografia
Fonte: Autora (2022).

Quando não há definição de um sistema de referência para a coleta de dados da nuvem de pontos, esse conjunto de dados se mantém em um sistema local atribuído arbitrariamente pelo próprio equipamento BLK360.

Para a monorrestituição, a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos da fotografia é relativa ao conjunto de pontos da nuvem, independentemente de sua orientação, isso porque os parâmetros de transformação da DLT, que serão apresentados no item 3.6, são determinados em função de coordenadas homólogas medidas no Modelo Digital de Superfície (MDS) e no Sistema Referencial Digital (SRD) da imagem.

No caso desse projeto, o MDS compreende à nuvem de pontos obtida. O sistema referencial local atribuído à nuvem de pontos foi rotacionado e transladado visando melhorar a geometria dos dados para a posterior determinação dos parâmetros da DLT e monorrestituição. Essas transformações se deram em duas etapas, na primeira o conjunto de dados foi orientado de forma relativa ao plano da imagem. Na segunda etapa todo o conjunto foi rotacionado de forma que o eixo óptico fosse aproximadamente paralelo ao eixo Z do Sistema Referencial Local e o plano focal fosse paralelo ao plano XY.

Na primeira etapa a nuvem de pontos foi rotacionada e transladada de forma que o plano formado pelos eixos das coordenadas X e Y estivesse paralelo ao plano tangente ao ponto principal da imagem (Figura 19) gerando uma orientação relativa.

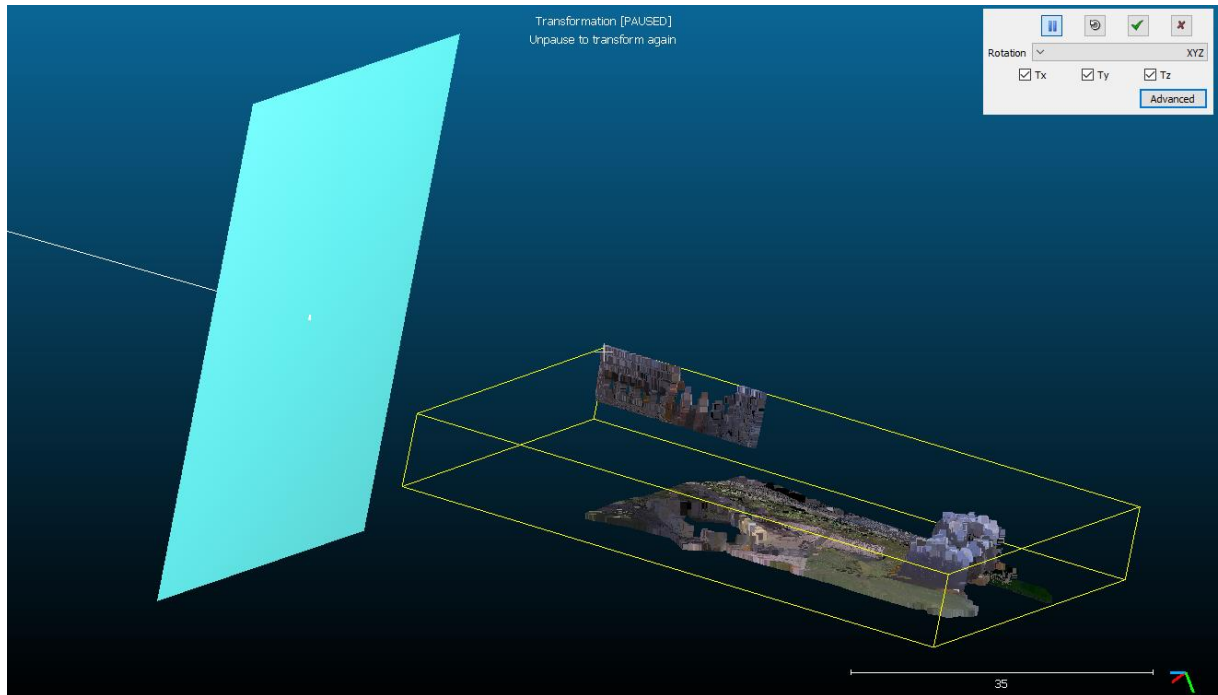


Figura 19 - Orientação relativa entre a nuvem de pontos e o plano da fotografia.
Fonte: Autora (2022).

Posteriormente, ainda é necessário orientar todo o conjunto de dados em relação ao Sistema Referencial Local, dessa forma, o eixo das coordenadas Z é ortogonal ao Plano focal, assim, a variação das coordenadas Z significa profundidade enquanto as coordenadas X e Y representam altura e comprimento, tanto na foto quanto no terreno conforme a Figura 20.

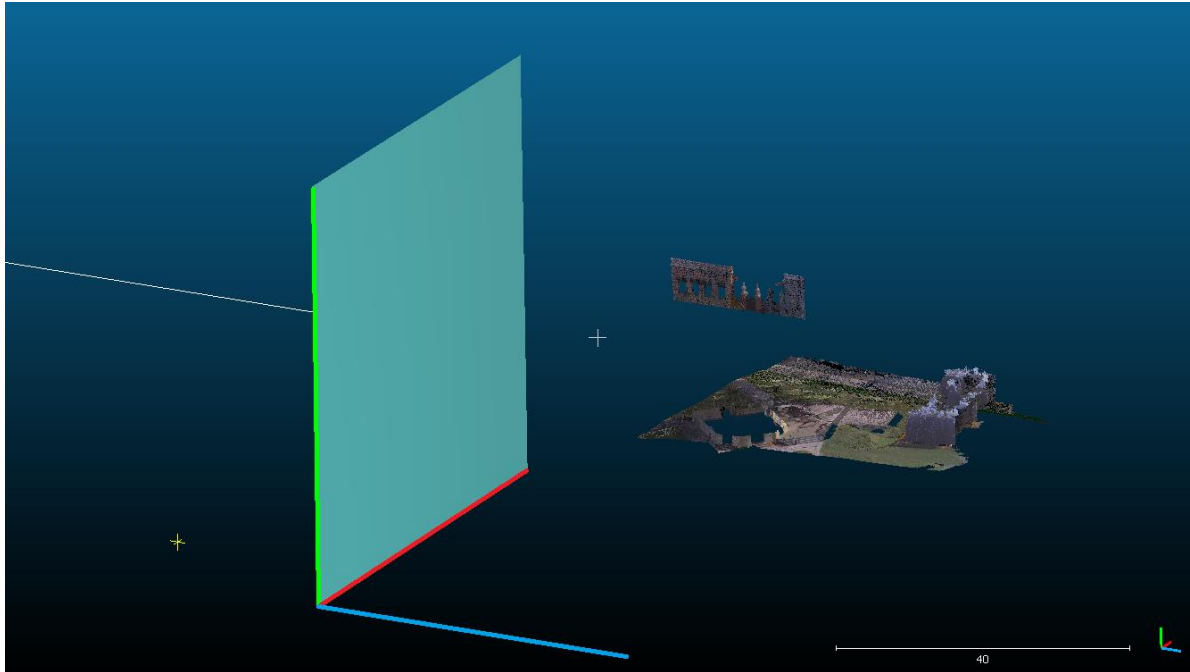


Figura 20 - Orientação do conjunto de dados em relação ao sistema global.
Fonte: Autora (2022).

Para que essa condição fosse alcançada, utilizou-se o *software* CloudCompare para plotar a reta e o plano que representam a condição da câmera no momento da tomada da fotografia. Em seguida, foi plotado o MDS, e a partir de análise visual gráfica foram rotacionados até que a condição descrita fosse atingida, alterando-se assim o sistema referencial local das coordenadas do MDS.

3.4 COLETA DE PONTOS AMOSTRAIS NA NUVEM DE PONTOS

Foram coletados os pontos amostrais homólogos aos pontos observados na imagem antiga utilizando a ferramenta *pick point* (Figura 21), esses valores foram anotados individualmente em um arquivo *.txt* de modo que se obtivesse uma lista dessas coordenadas.

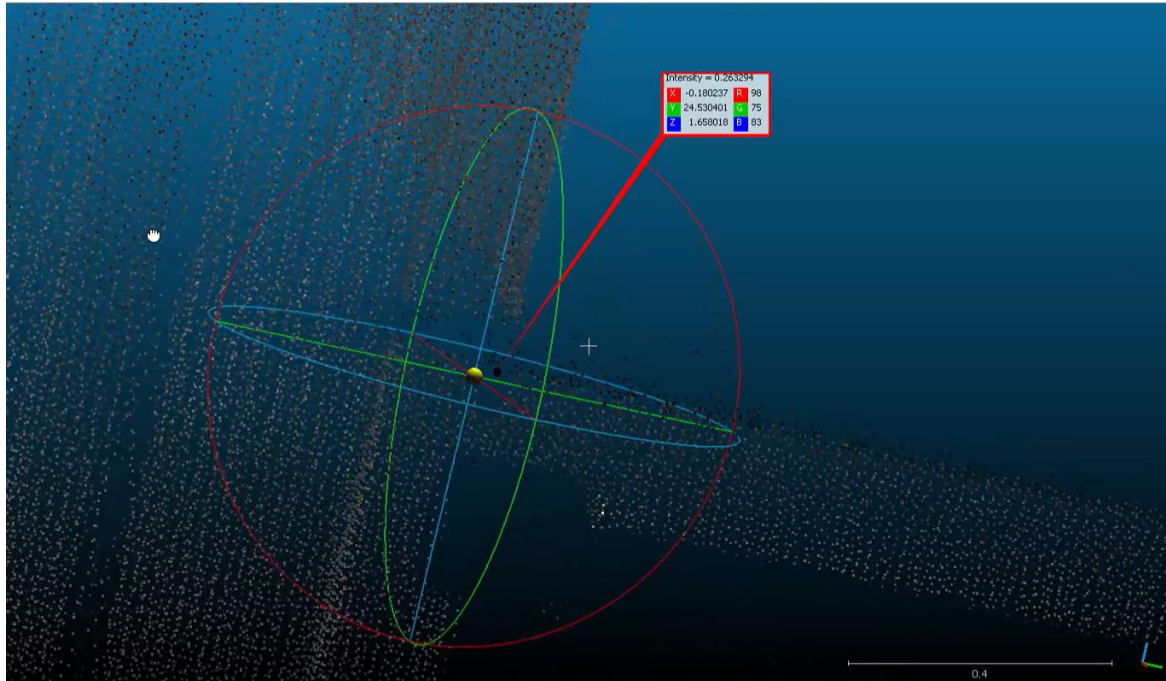


Figura 21 - Coleta de pontos amostrais na nuvem de pontos
Fonte: Autora (2022).

3.5 COLETA DE PONTOS AMOSTRAIS NA IMAGEM

Imagens digitais ou imagens digitalizadas representam uma cena armazenando valores de intensidade luminosa em cada unidade da imagem, as quais chamamos de pixels, e encontram-se dispostos num arranjo matricial. Os pixels estão dentro de um sistema de referência conhecido como Sistema Referencial Digital (SRD) que possui as seguintes características:

- **Origem do sistema (O):** o canto superior esquerdo da imagem;
- **Eixo coordenado das Colunas (OC):** na direção horizontal e possui sentido positivo para a direita;
- **Eixo coordenado das Linhas (OL):** rotacionado 90 graus em relação ao eixo coordenado das Colunas, sentido horário (sistema levogiro).

Na Figura 22 pode ser observada a ilustração do SRD, onde C e L são respectivamente as coordenadas Coluna e Linha nas imagens.

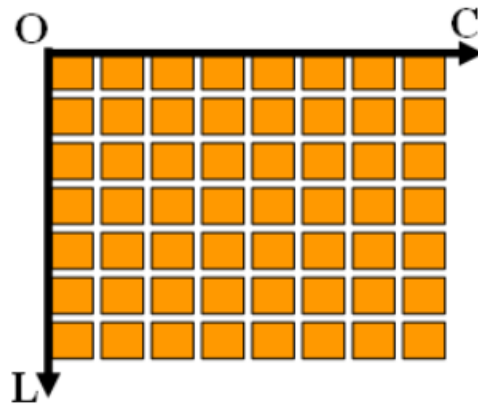


Figura 22 - Sistema Referencial Digital
Fonte: (SANTOS, 2009)

A coleta das coordenadas nas imagens foi realizada manualmente com anotação automatizada utilizando o *software* livre Quantum GIS (QGIS). Foi simulado um processo de georreferenciamento na imagem, onde todos os pontos de interesse são marcados manualmente atribuindo-se a eles coordenadas provisórias apenas para que seja gerado o arquivo contendo as coordenadas dos pontos de controle no sistema referencial de interesse (SRD) esse arquivo pode ser exportado no formato *.txt* e posteriormente descarta-se o processo de georreferenciamento. Na Figura 23 é possível observar as coordenadas dos pontos amostrais coletados na foto antiga 1, prontas para serem exportadas.

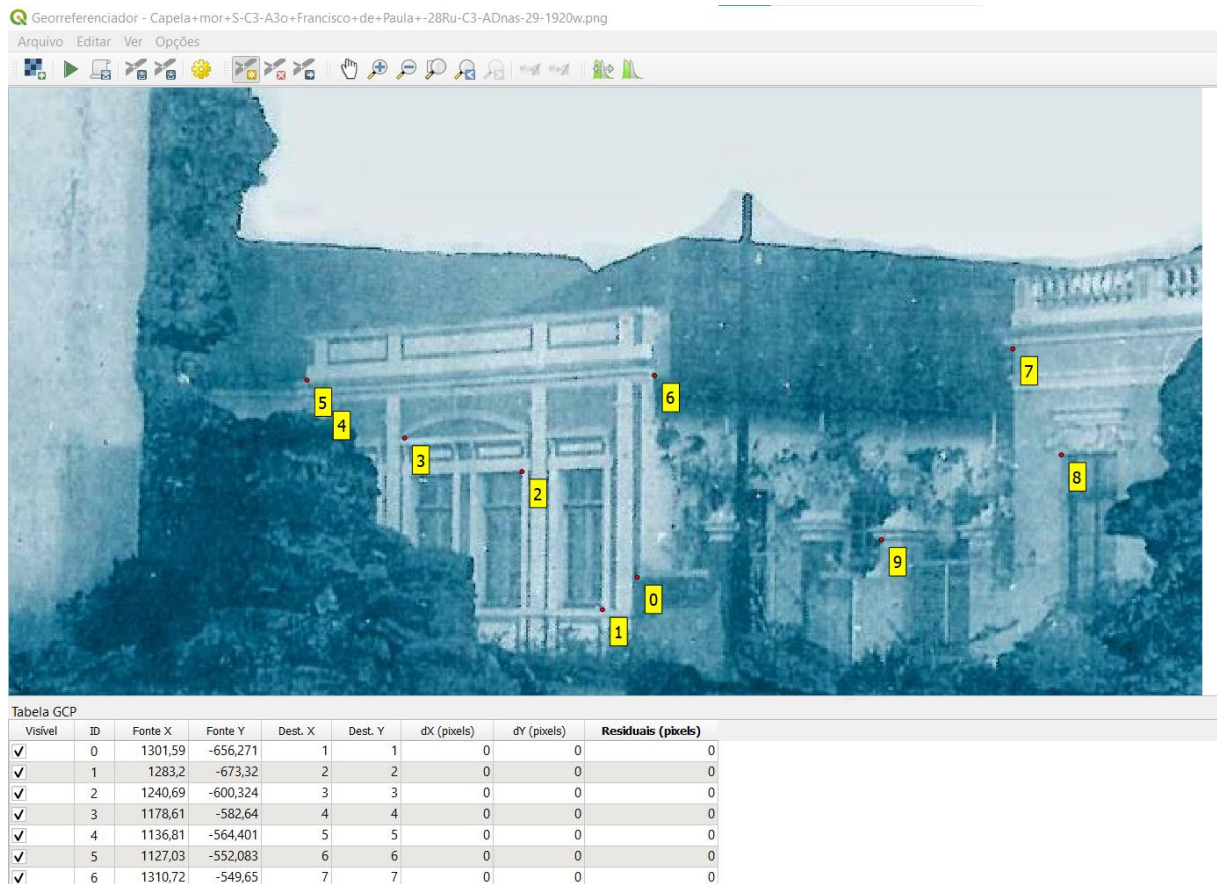


Figura 23 - Coleta de pontos amostrais para a foto antiga 1, no software QGIS
Fonte: Autora (2022).

No *software* QGIS, por definição, são fornecidos os valores de Coluna e Linha na dimensão de *subpixel* (decimais) e em um sistema dextrogiro. Portanto, a lista de coordenadas obtidas no QGIS foi adaptada para o referencial padrão, ou seja, foi feita a conversão para um sistema levogiro.

3.6 TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA (DLT)

A transformação de coordenadas entre sistemas referenciais com dimensões diferentes exige a compatibilização entre parâmetros que descrevem a geometria da imagem. A Transformação Linear Direta, do inglês *Direct Linear Transformation*, é a técnica que permite a transformação de coordenadas bidimensionais para coordenadas tridimensionais pela determinação de parâmetros matemáticos que absorvem parâmetros físicos sem identificá-los, levando em conta o uso de câmeras fotográficas de baixo custo (OLIVEIRA; MITISHITA; DALMOLIN, 2012).

Segundo Mitishita *et.al.* (2012), essa transformação tem como objetivo estabelecer a relação entre o sistema de coordenadas do espaço imagem e o sistema de coordenadas do espaço objeto de forma semelhante à equação de colinearidade. O modelo matemático pode ser observado nas Equações 1 e 2.

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (2)$$

Onde,

x, y são as coordenadas planas no referencial da imagem;

X, Y e Z são as coordenadas tridimensionais no referencial geodésico local;

$L_1, L_2, \dots, L_n$ são os parâmetros de transformação.

O modelo matemático apresentado foi utilizado para determinação dos parâmetros de transformação das fotos antigas, modelando a geometria da imagem para que fosse possível a transformação entre e o Sistema Referencial Local (3D) para o Sistema de Referencial Digital (2D).

3.6.1 Ajustamento das observações

A estimação dos parâmetros da DLT foi realizada pelo ajustamento de observações de pontos homólogos amostrais, coletados na imagem e na nuvem de pontos laser, conforme descrito nos itens 3.4 e 3.5. A distribuição espacial dos pontos de controle é importante na obtenção de resultados satisfatórios (HEMMLEB; WIEDEMANN, 1997).

Levando em consideração o modelo matemático utilizado e as informações disponíveis para a realização desse trabalho, o ajustamento de observações foi realizado utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) pelo método Paramétrico, cujo modelo matemático simplifica-se na Equação 3 e Equação 4.

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (3)$$

$$X_a = X_o + X \quad (4)$$

Onde:

X é o vetor das correções nos parâmetros;

A é a matriz das derivadas das equações em relação aos parâmetros;

P é a matriz dos pesos das observações;

L é o vetor da diferença entre os valores calculados a partir dos parâmetros aproximados e aos valores observados;

X_o é o vetor dos parâmetros aproximados;

X_a é o vetor dos parâmetros ajustados.

Mais informações sobre a natureza do ajustamento em (GEMAEL, et.al., 2015).

3.7 MONORRESTITUIÇÃO

A monorrestituição é realizada com a aplicação da DLT em sua forma inversa. Os parâmetros utilizados nessa etapa são os mesmos determinados na etapa anterior e são inerentes à cada transformação empregada, ou seja, esses parâmetros não podem ser considerados para um conjunto diferente de dados (MITISHITA, et.al., 2003). A DLT inversa permite transformar as coordenadas do Sistema Referencial Digital para o sistema referencial do objeto, desde que se tenha à disposição um MDS para determinação das coordenadas Z dos pontos.

Após as devidas operações matemáticas de inversão da equação, a DLT inversa pode ser escrita na forma matricial conforme o modelo abaixo (Equações 5, 6 e 7). Observa-se que não é possível isolar a coordenada Z pois tem-se apenas duas equações para três incógnitas, por isso, as coordenadas X e Y são calculadas em função de Coluna, Linha e Z.

$$A = \begin{bmatrix} L_1 - xL_9 & L_2 - xL_{10} \\ L_5 - yL_9 & L_6 - yL_{10} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} -Z(L_3 - xL_{11}) - L_4 + x \\ -Z(L_7 - yL_{11}) - L_8 + y \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = A^{-1}C \quad (7)$$

Onde:

x, y são as coordenadas planas em coluna e linha no referencial da imagem, respectivamente;

X, Y e Z são as coordenadas tridimensionais no referencial geodésico local;

$L_1, L_2, \dots, L_n$ são os parâmetros de transformação.

O método de monorrestituição foi realizado sem iteração. Inicialmente os pontos da nuvem que compõe o MDS foram projetados para o SRD. Para isso, calculou-se Coluna (C) e Linha (L) para todos os pontos por meio da DLT direta, na qual Coluna e Linha são função de X, Y e Z (Equações 1 e 2). Em seguida, podemos compor um referencial 3D misto, formado por informação de C, L e Z para todos os pontos da nuvem. Com os valores de Coluna e Linha coletados para os pontos de checagem a serem monorrestituídos, é possível obter o ponto da nuvem com valor de Coluna e Linha mais próximo. Atribuímos ao ponto de checagem o Z desse ponto mais próximo da nuvem. Por fim, com os valores de C, L e Z do ponto de interesse, é possível substituí-los na Equação DLT inversa (Equações 5, 6 e 7) e obter X e Y para os pontos de checagem. Dessa forma, é possível comparar as coordenadas X, Y e Z obtidas pela monorrestituição com as coordenadas coletadas na nuvem de pontos para avaliar a qualidade posicional desse processo. Esse mesmo processo de monorestituição é realizado para os pontos da Capela medidos na imagem.

3.7.1 Coleta de pontos de interesse

Para que fosse possível fazer o controle de qualidade dos parâmetros da DLT, foram coletados pontos homólogos no SRD da foto e na nuvem de pontos, conforme descrito nos itens 3.4 e 3.5.

Para que a monorrestituição da Capela fosse possível, ou seja, para aplicar de fato a transformação da DLT inversa, essa coleta de pontos deu-se no SRD da

imagem. Nesse caso, foram coletados os pontos da planta baixa da Capela, conforme a Figura 24 e Figura 25.

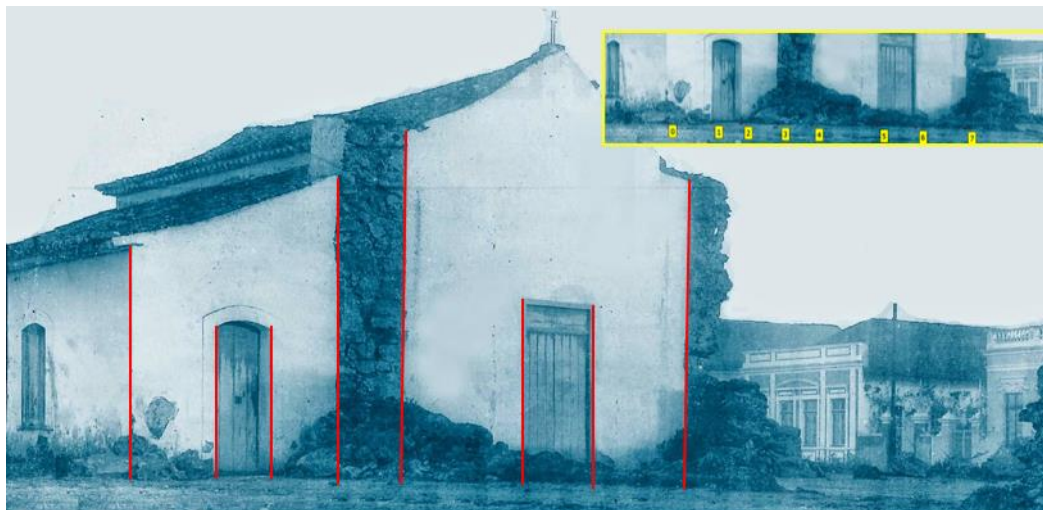


Figura 24 - Pontos de interesse coletados na foto 1.
Fonte: Autora (2022).

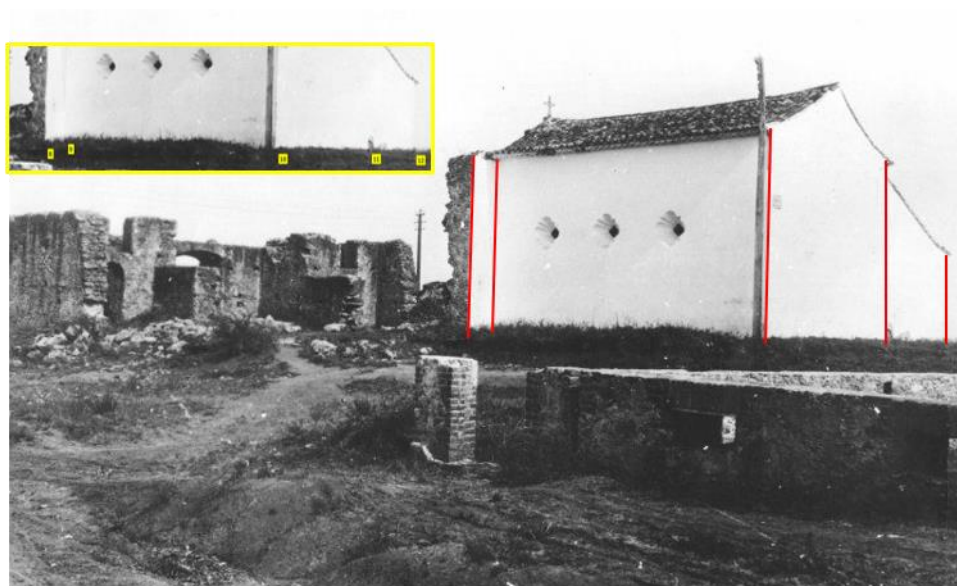


Figura 25 - Pontos de interesse coletados na foto 2.
Fonte: Autora (2022).

Os pontos escolhidos nas imagens resultam da interseção das arestas em vermelho com o terreno, o que caracterizaria o encontro da construção com o solo. Outros pontos referentes a capela não servem para a monorrestituição, uma vez que o MDS obtido pela varredura laser não conta com a informação tridimensional da Capela já demolida.

3.7.2 Modelo digital de superfície (MDS)

O Modelo Digital de Superfície utilizado pode ser observado na Figura 26. Para otimizar o processamento desses dados em ambiente *MatLab* a nuvem de pontos foi reduzida apenas para a área de interesse, composta pelas fachadas das edificações aparentes nas fotografias antigas, as Ruínas de São Francisco e a região do terreno com a provável localização da construção da Capela.

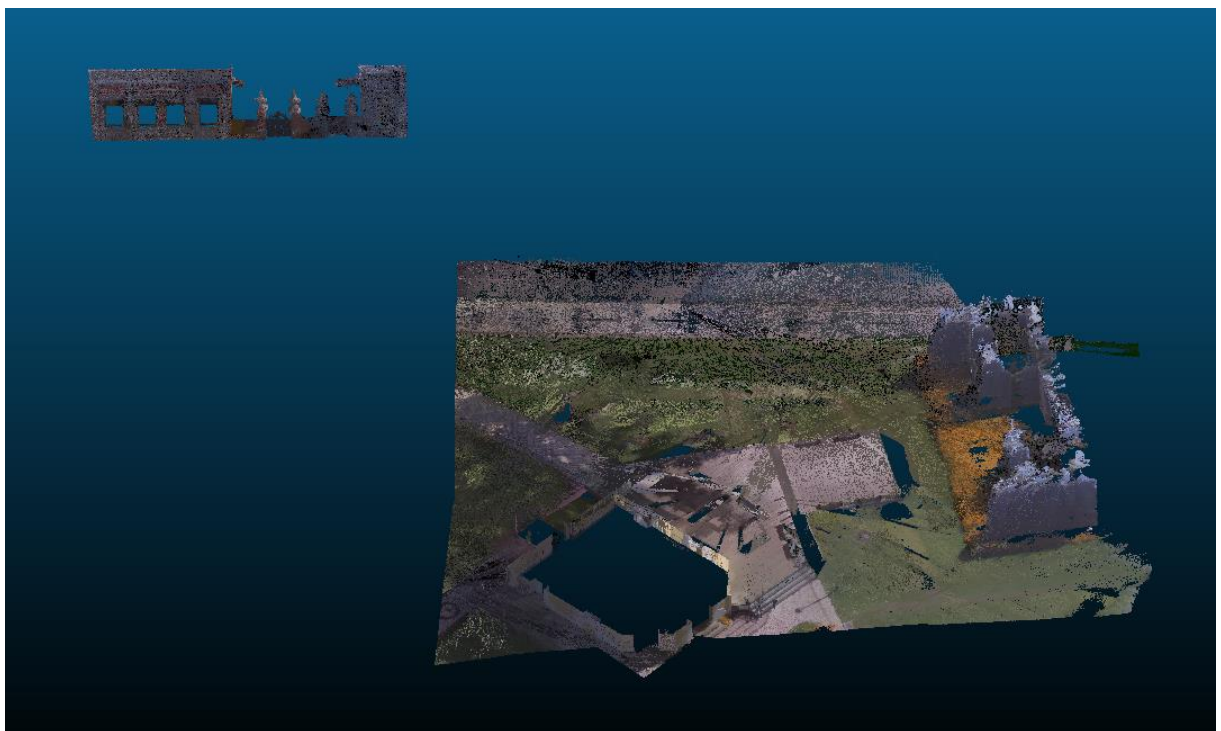


Figura 26 - MDS utilizado na implementação da monorrestituição.
Fonte: Autora (2022).

3.7.3 Controle de qualidade dos parâmetros ajustados

Foram utilizadas duas etapas de monorrestituição, na primeira foram utilizados pontos de checagem medidos na nuvem e na foto para verificar a precisão dos parâmetros obtidos pela DLT e na segunda, o modelo inverso foi aplicado no intuito de obter as coordenadas tridimensionais da Capela.

Os parâmetros ajustados são considerados bons quando empiricamente a DLT inversa funciona, ou seja, são feitos testes a partir de pontos conhecidos para

comparar visualmente as coordenadas calculadas utilizando os parâmetros com as coordenadas coletadas nos modelos e identificar assim essas diferenças.

A comparação visual é suficiente nesse caso devido ao nível de precisão da determinação dessas coordenadas ser de ordem centimétrica.

4 RESULTADOS

4.1 REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS

O levantamento por varredura Laser Scanner terrestre resultou em 10 nuvens de pontos e durou cerca de 3 horas. O resultado do registro das nuvens de pontos pode ser observado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Qualidade do registro das nuvens de pontos

Qualidade do registro das nuvens de pontos	
Quantidade de nuvens	10
Quantidade de <i>links</i>	17
Sobreposição	31%
Rigidez	69%
Erro do <i>Bundle Adjustment</i>	0,009 m
Erro relativo (entre nuvens)	0,009 m

Fonte: Autora (2022).

De acordo com a precisão nominal do equipamento, apresentada na Tabela 2, os erros superaram em 1 milímetro a precisão nominal do equipamento. Porém, tais valores foram considerados aceitáveis visto que as distâncias levantadas ultrapassaram os 20 metros. Conforme a Figura 27, a distância planimétrica ilustrada em linha branca (*Distance XY*) é de 26,847 metros entre uma das posições de varredura e um dos pontos sobre a fachada levantada.

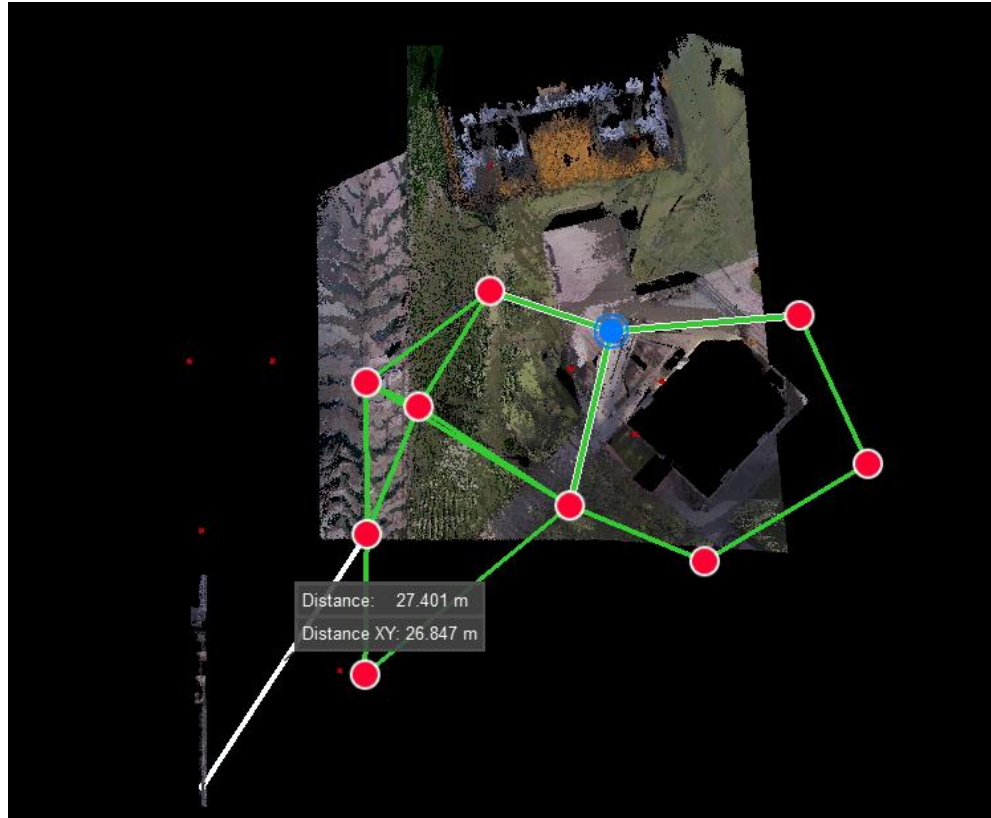


Figura 27 - Distância entre o sensor de varredura e objeto da cena
Fonte: Autora (2022)

4.2 COLETA DE PONTOS AMOSTRAIS

Na A etapa de coleta de pontos amostrais foi realizada nas fotos antigas que continham a capela-mor. A Figura 28 e Figura 30 apresentam as regiões de escolha para coleta dos pontos nas fotos 1 e 2, respectivamente. Na Figura 29 são indicados os pontos amostrais coletados na foto 1, sendo em vermelho os pontos definidos como controle (Tabela 4) e em amarelo os pontos definidos como checagem (Tabela 6).

Paralelamente, pontos homólogos aos de controle e checagem foram coletados na nuvem de pontos processada e com referencial transformado. Tais dados são apresentados na Tabela 7 e Tabela 9, respectivamente.

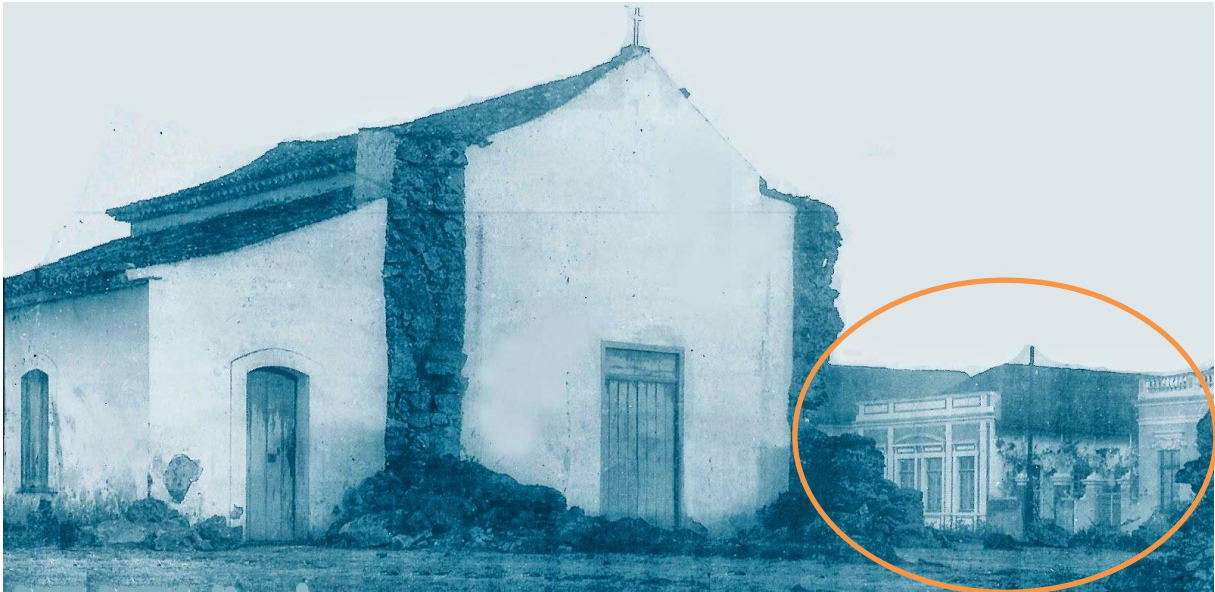


Figura 28 - Região de coleta dos pontos amostrais na foto 1.
Fonte: Autora (2022), via Acervo Casa da Memória.

Na Figura 29, os pontos em vermelho correspondem aos pontos utilizados como pontos de controle e os pontos amarelos correspondem aos pontos de checagem.

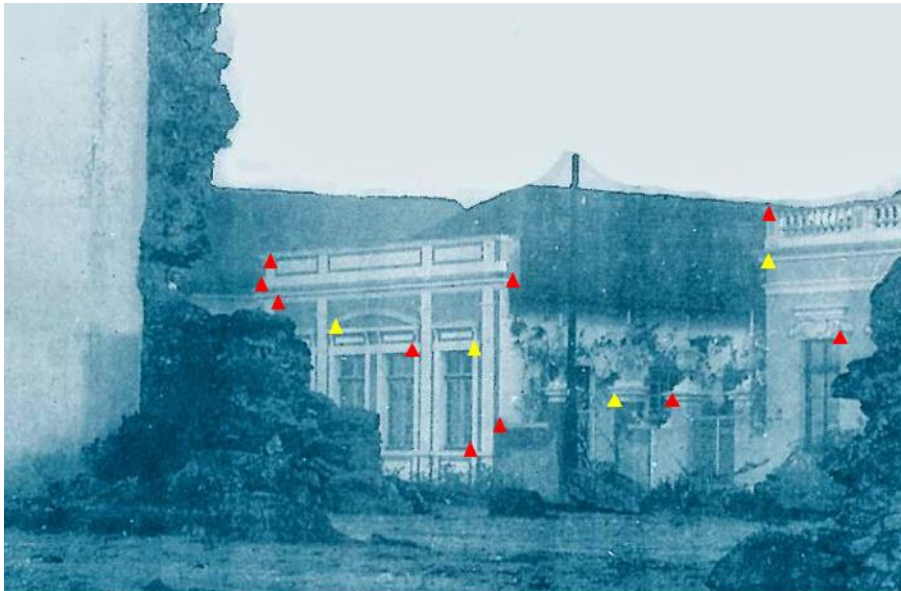


Figura 29 - Pontos coletados na foto 1.
Fonte: Autora (2022), via Acervo Casa da Memória.

Tabela 4 - Coordenadas dos pontos de controle na foto 1

Coordenadas dos pontos amostrais na Imagem 1 (frontal)				
Ponto	sistema dextrogiro		sistema levogiro	
	x (px)	y (px)	x (px)	y (px)

1	1301,5890	-656,2709	1301,5890	656,2709
2	1283,2017	-673,3201	1283,2017	673,3201
3	1240,6855	-600,3240	1240,6855	600,3240
5	1136,8064	-564,4007	1136,8064	564,4007
6	1127,0327	-552,0827	1127,0327	552,0827
7	1310,7247	-549,6499	1310,7247	549,6499
9	1430,6249	-636,3915	1430,6249	636,3915
12	1130,8186	-531,3616	1130,8186	531,3616
13	1554,9523	-589,9645	1554,9523	589,9645
14	1500,9869	-499,021	1500,9869	499,0210

Fonte: Autora (2022).

Tabela 5 - Coordenadas dos pontos de controle na nuvem de pontos (foto1).

Coordenadas dos pontos amostrais na nuvem de pontos			
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	109,2279	4,9204	27,0036
2	109,1451	4,2167	26,1308
3	108,9638	6,5647	23,9294
5	109,1551	7,9299	18,4809
6	109,0973	8,2081	17,8904
7	109,6111	8,0641	27,0083
9	109,1815	5,3631	32,6214
12	109,2129	8,9194	17,9540
13	109,2221	6,6653	37,4739
14	109,1710	9,2707	35,3430

Fonte: Autora (2022).

Tabela 6 - Coordenadas dos pontos de checagem na foto 1.

Coordenadas dos pontos de checagem na Imagem 1 (frontal)				
Ponto	sistema dextrogiro		sistema levogiro	
	x (px)	y (px)	x (px)	y (px)
4	1178,6132	-582,6404	1178,6132	582,6404
8	1500,1016	-535,5145	1500,1016	535,5145
10	1388,2781	-637,3247	1388,2781	637,3247
11	1283,5798	-598,5372	1283,5798	598,5372

Fonte: Autora (2022).

Tabela 7 - Coordenadas dos pontos de checagem na nuvem de pontos (foto1).

Coordenadas dos pontos de check na nuvem de pontos			
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
4	109,0883	7,1219	20,8217
8	109,1537	8,2353	35,4004
10	109,0915	5,5177	30,9144
11	109,1795	6,7122	26,1433

Fonte: Autora (2022).

Para a foto 2, não foi possível coletar pontos de checagem devido à falta de informações homólogas entre os objetos da foto e o MDS gerado pela varredura laser. Adicionalmente, tratam-se de ruínas, as quais estão sujeitas a efeitos como erosão e depredação, dificultando a identificação de pontos homólogos. Na Figura 31 é possível observar a disposição dos pontos de controle em vermelho, e os seus respectivos valores são apresentados na Tabela 8. Na Tabela 9 são indicadas as coordenadas dos pontos de controle homólogos à foto 2, coletados na nuvem de pontos transformada.

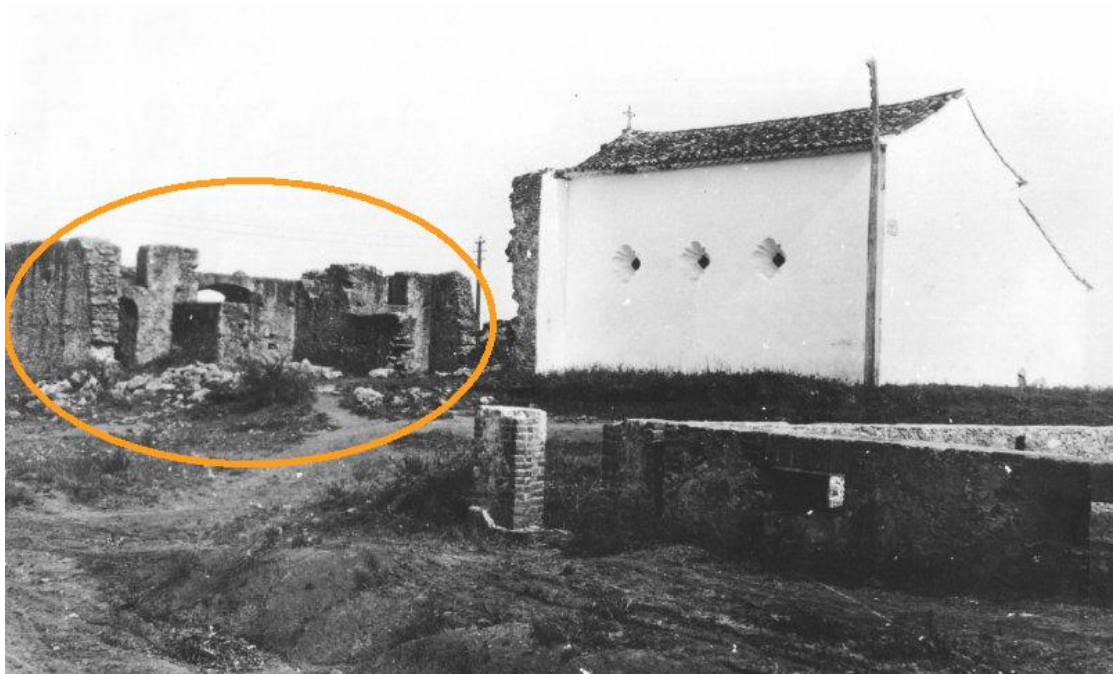


Figura 30 - Região de coleta dos pontos amostrais na foto 2
Fonte: Autora (2022), via Acervo Casa da Memória.

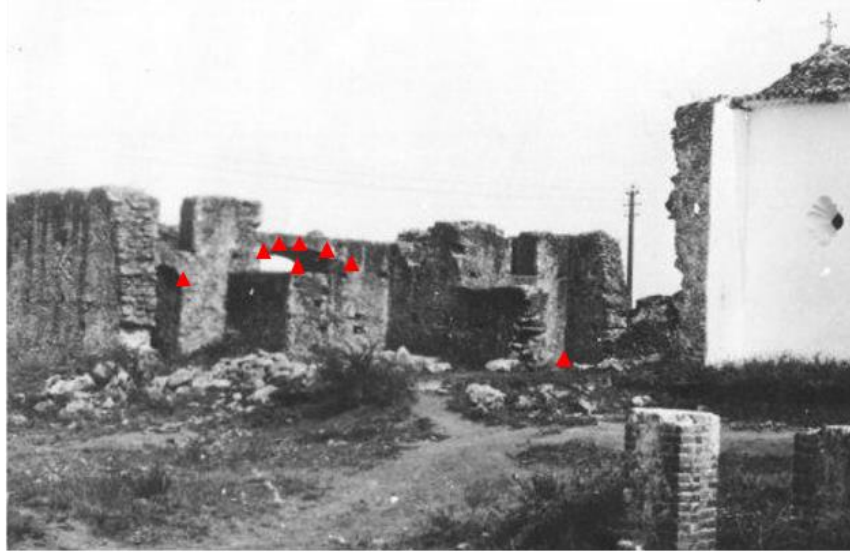


Figura 31 - Pontos coletados na foto 2.
Fonte: Autora (2022), via Acervo Casa da Memória.

Tabela 8 -Coordenadas dos pontos de controle na foto 2

Coordenadas dos pontos amostrais na foto				
Ponto	sistema dextrogiro		sistema levogiro	
	x (px)	y (px)	x (px)	y (px)
1	185,5784	-210,9609	185,5784	210,9609
2	160,0406	-201,5868	160,0406	201,5868
3	159,1645	-211,2238	159,1645	211,2238
4	173,4009	-204,6969	173,4009	204,6969
5	146,5051	-203,1638	146,5051	203,1638
6	95,9113	-219,1085	95,9113	219,1085
7	139,2336	-205,9673	139,2336	205,9673
8	305,9524	-265,7162	305,9524	265,7162

Fonte: Autora (2022).

Tabela 9 - Coordenadas dos pontos de controle na nuvem de pontos (foto 2).

Coordenadas dos pontos amostrais na nuvem de pontos			
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	-383,7095	126,2534	111,6549
2	-385,0210	126,5419	111,9551
3	-384,4471	126,1050	110,6154
4	-384,4241	126,4818	111,7816
5	-385,8233	126,3875	112,1232
6	-390,1540	124,9659	116,7506
7	-385,9230	126,3877	112,1660
8	-376,1492	123,5118	113,8354

Fonte: Autora (2022).

4.3 COLETA DE PONTOS DE INTERESSE NAS FOTOS ANTIGAS

Para a estimativa da localização da Capela por meio da monorrestituição, foram coletados pontos de interesse nas fotos antigas, conforme descrito no item 3.7.1. Na Tabela 10 e Tabela 11 são apresentados os pontos de no SRD levogiro que representam a capela-mor na foto 1 (Figura 24) e na foto 2 (Figura 25), respectivamente.

Tabela 10 - Coordenadas dos pontos de interesse na foto 1

Coordenadas dos pontos de interesse		
Ponto	C (px)	L (px)
0	192,6322	712,7713
1	321,3105	716,0327
2	405,2183	717,5152
3	506,0262	722,2591
4	601,7938	724,6310
5	787,6955	727,8925
6	901,0302	731,4504
7	1036,1573	733,8224

Fonte: Autora (2022).

Tabela 11 - Coordenadas dos pontos de interesse na foto 2.

Coordenadas dos pontos de interesse		
Ponto	C (px)	L (px)
0	382,4345	272,3744
1	404,5118	267,2931
2	631,4175	277,8061
3	731,9919	277,8061
4	780,0013	279,2079

Fonte: Autora (2022).

4.4 PARÂMETROS CALCULADOS DA DLT

Os parâmetros de transformação da DLT calculados a partir do ajustamento das observações para cada uma das fotografias podem ser observados na Tabela 14 e Tabela 15. Todos os cálculos foram implementados em ambiente *MatLab* disponíveis no APÊNDICE 1 – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM MATLAB PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA DLT.

A determinação dos parâmetros de transformação citados teve como critério de parada do ajustamento o limite de 10 iterações ou a convergência dos dados até que os valores de correção dos parâmetros atingissem valor absoluto máximo de 0,000001. Além disso, o valor de variância *a priori* foi considerado como sendo 1 e a todas as medidas foi atribuído peso de 1,5 pixels.

Na Tabela 12 e Tabela 13 são apresentados o número de iterações e variância *posteriori* na determinação dos parâmetros da DLT para as fotos 1 e 2, respectivamente. Nota-se que o critério de convergência das iterações foi o de valor absoluto do máximo para ambas as fotos.

Tabela 12 - Ajustamento dos parâmetros da DLT para a foto antiga 1.

Ajustamento dos parâmetros da DLT para a foto antiga 1	
Peso das observações	1,5 pixels
Número de Iterações	9
Graus de Liberdade	9
Variância Posteriori	1,6178

Fonte: Autora (2022).

Tabela 13 - Ajustamento dos parâmetros da DLT para a foto antiga 2.

Ajustamento dos parâmetros da DLT para a foto antiga 2	
Peso das observações	1,5 pixels
Número de Iterações	8
Graus de Liberdade	9
Variância Posteriori	1,0093

Fonte: Autora (2022).

Considerando os mesmos valores de pesos para todas as medidas e a mesma variância *a priori*, pode-se concluir que o resultado foi satisfatório para as duas fotos pois o valor de variância *posteriori* aproximou-se de 1.

Como resultado do ajustamento das observações, foram determinados os parâmetros da DLT para ambas as fotos (Tabela 14 e Tabela 15).

Tabela 14 - Parâmetros de Transformação da DLT para a foto 1.

Parâmetros de Transformação da DLT para a foto 1	
L1	-10,1960

L2	0,3400
L3	0,7570
L4	1192,8111
L5	-4,5813
L6	-2,4646
L7	-0,4658
L8	575,9041
L9	-0,0083
L10	0,0002
L11	-0,0007

Fonte: Autora (2022).

Tabela 15 - Parâmetros de Transformação da DLT para a foto antiga 2.

Parâmetros de Transformação da DLT para a foto 2	
L1	-0,0624
L2	-1,5689
L3	-0,5836
L4	241,5186
L5	-0,4150
L6	-2,4355
L7	-0,8847
L8	249,5915
L9	-0,0021
L10	-0,0105
L11	-0,0042

Fonte: Autora (2022).

Conforme esperado, os maiores valores são absorvidos pelos parâmetros L4 e L8 que correspondem ao que seria a translação na equação de colinearidade.

4.5 MONORRESTITUIÇÃO

De posse dos parâmetros ajustados da DLT, realizou-se a determinação das coordenadas da planta-baixa da Capela-mor no sistema de referência tridimensional local da nuvem de pontos. A monorrestituição foi executada separadamente para cada foto.

Utilizando os parâmetros da DLT, os pontos de checagem e de interesse coletados nas imagens e o MDS apresentado no item 3.7.2, foi implementado o código da DLT inversa, cuja implementação em ambiente *MatLab* está no

APÊNDICE 2 – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM MATLAB PARA MONORRESTITUIÇÃO.

Todas as coordenadas monorrestituídas foram transformadas para o sistema referencial da nuvem de pontos original, ou seja, para o sistema anterior a transformação dos eixos. Tais valores foram plotados no MDS para proporcionar a análise gráfica dos resultados obtidos.

4.5.1 Controle de qualidade por pontos de checagem

Visando a análise da qualidade métrica dos parâmetros da DLT, realizou-se a monorrestituição dos pontos de checagem coletados anteriormente, os quais podem ser apreciados na Tabela 16. Na Figura 32 tais pontos são apresentados graficamente em vermelho. Vale ressaltar que esse processo foi aplicado apenas para a foto 1 devido à qualidade dos dados e informações disponíveis na imagem.

Tabela 16 - Coordenadas dos pontos de checagem na nuvem de pontos original.

Coordenadas dos pontos de checagem na nuvem de pontos			
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	-0,1763	18,3153	4,0792
2	-0,1517	32,9460	4,9285
3	-0,1051	28,4330	2,1152
4	-0,1930	23,5709	3,4155

Fonte: Autora (2022).

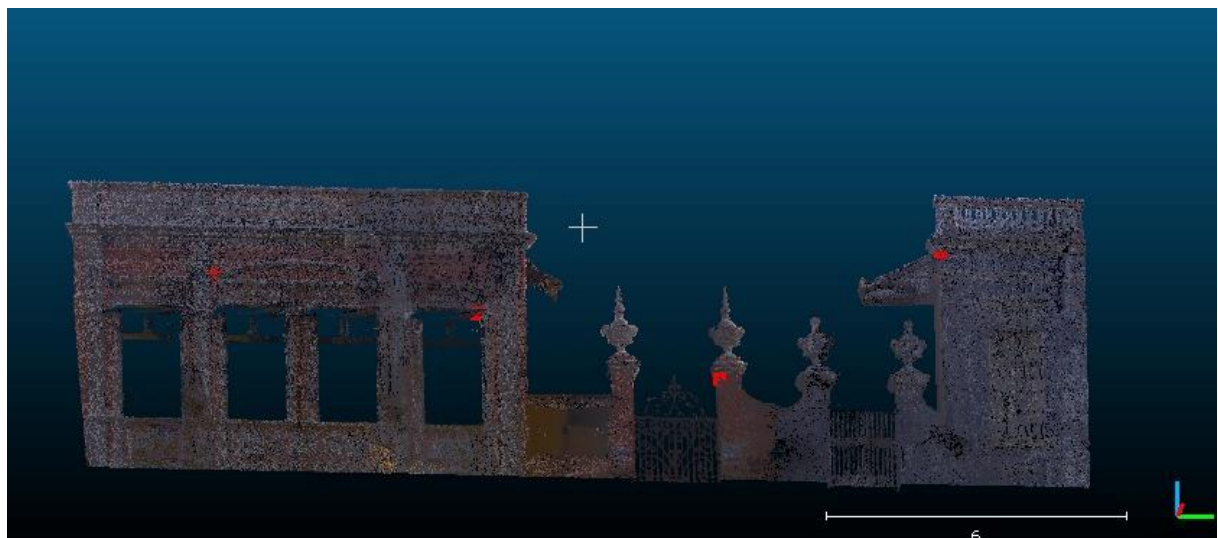


Figura 32 - Pontos de checagem plotados no MDS.
Fonte: Autora (2022).

Ao comparar os pontos monorrestituídos com os indicados na Figura 29, pode-se considerar o resultado como satisfatório já que os pontos plotados no MDS estão visualmente condizentes com os mesmos pontos coletados. Nesse trabalho, a análise foi realizada apenas de forma gráfica visto que erros centimétricos não afetariam a determinação das coordenadas relativas à localização da Capela-mor no MDS.

4.5.2 Determinação das coordenadas da Capela-mor São Francisco de Paula

Aplicando-se a monorrestituição para os pontos de interesse da planta-baixa da Capela-mor na foto 1, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Coordenadas dos pontos monorrestituídos da foto 1 na nuvem de pontos original.

Coordenadas dos pontos monorrestituídos da foto 1 na nuvem de pontos original			
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	-9,4454	15,7347	4,5833
2	-9,3005	15,7334	4,4981
3	-9,1816	15,7324	4,4308
4	-9,0012	15,7306	4,3152
5	-8,7760	15,7286	4,1822
6	-8,0566	15,7221	3,7672
7	-7,2086	15,7143	3,2620
8	-4,8524	15,6932	1,8912

Fonte: Autora (2022).

As coordenadas monorrestituídas foram plotadas no MDS, gerando a visualização que consta na Figura 33. Os pontos plotados na cor vermelha são os pontos de checagem elaborados anteriormente e os pontos na cor verde representariam a planta-baixa da Capela-mor São Francisco de Paula.

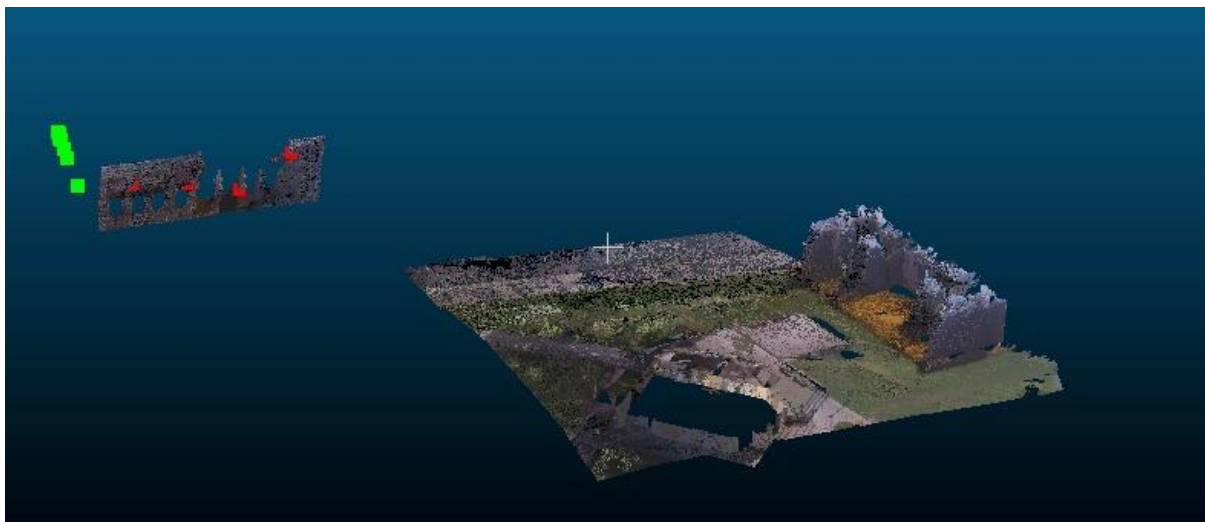


Figura 33 - Pontos monorrestituídos pela a foto 1.
Fonte: Autora (2022).

Conforme a Figura 33, percebe-se que a monorrestituição realizada indica que posição da capela estaria atrás das fachadas já existentes na época. Tal resultado afasta-se da realidade apresentada nos documentos históricos sobre a região e capela, uma vez que as Ruínas de São Francisco estariam a frente da capela e alinhadas com as paredes. Portanto, o método da monorrestituição utilizando a foto 1 e o MDS elaborado não foram considerados satisfatórios para estimar a posição da capela.

Paralelamente, a monorrestituição foi aplicada à foto 2, as coordenadas obtidas podem ser observadas na Tabela 18. As coordenadas monorrestituídas foram plotadas na cor amarela, no MDS, gerando a visualização que consta na Figura 34.

Tabela 18 - Coordenadas dos pontos monorrestituídos da foto 1 na nuvem de pontos original.

Coordenadas dos pontos monorrestituídos da foto 2 na nuvem de pontos original			
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	40,6739	76,7817	1,6244
2	23,9704	70,7215	4,1392
3	35,0210	75,9275	3,2314
4	40,2183	79,0688	3,2712
5	40,1350	79,1126	3,3372

Fonte: Autora (2022).



Figura 34 - Pontos monorrestituídos pela a foto 2.
Fonte: Autora (2022).

Ao final, as coordenadas dos pontos monorrestituídas foram plotadas simultaneamente no MDS, conforme a Figura 35. Os pontos na cor amarela representam a planta-baixa da Capela a partir da foto 2, os pontos na cor verde retratam a planta-baixa da Capela a partir da foto 1 e, por fim, os pontos na cor vermelha representam os pontos de checagem monorrestituídos a partir da foto 1.

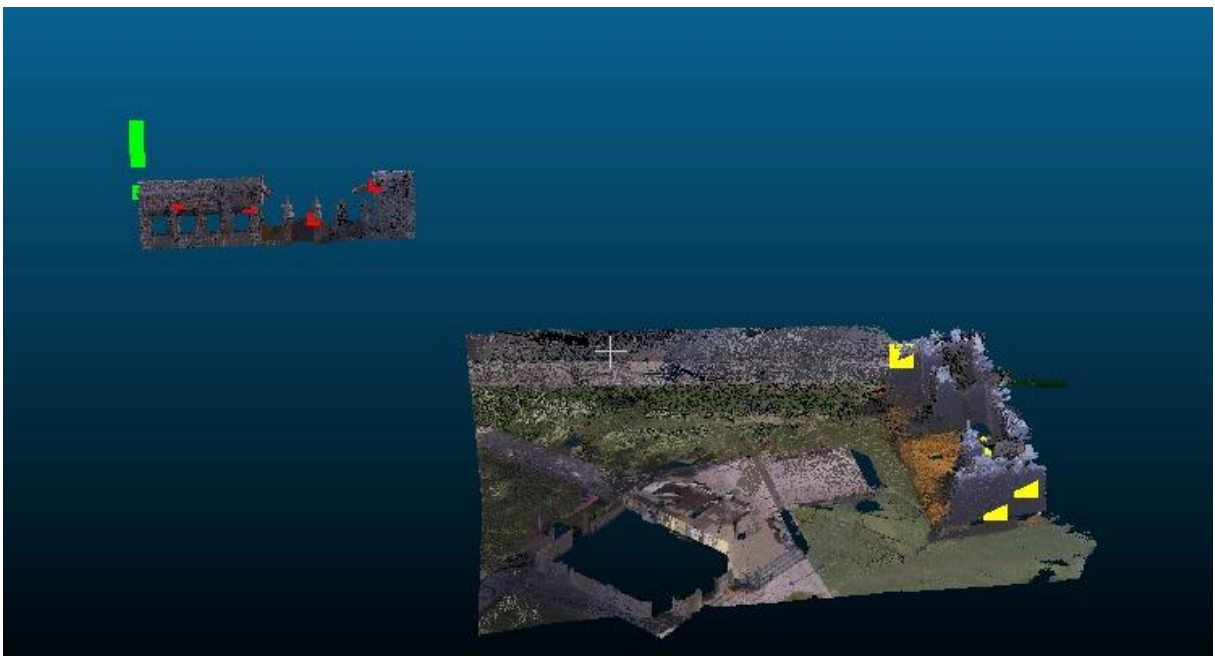


Figura 35 - Pontos monorrestituídos plotados no MDS.
Fonte: Autora (2022).

Os parâmetros da transformação são estimados com base nas coordenadas dos pontos coletados, os quais estão mal distribuídos geometricamente em relação

ao tamanho da região imageada na foto. Quando esses parâmetros são aplicados para extrapolação, ou seja, fora da região com pontos de apoio, a transformação não é modelada corretamente. Nesse sentido, é importante observar que os pontos de interesse monorrestituídos foram plotados no MDS numa região próxima aos pontos utilizados na determinação dos parâmetros da DLT, para a foto antiga 1 esses pontos ficam perto das fachadas das edificações e para a foto antiga 2, próximo às Ruínas de São Francisco. Isso ocorre porque a geometria ajustada para as fotos descreve apenas a área da foto onde foram coletados os pontos amostrais, ao utilizar pontos fora dessa região nos cálculos, o modelo matemático não converge ou converge para mínimos locais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os parâmetros determinados pelo Método dos Mínimos Quadrados utilizando o método paramétrico modelaram adequadamente a transformação DLT para a foto 1 na região de controle. Por isso, pode-se observar que os pontos contidos nessa área foram monorrestituídos de forma satisfatória, comprovando a funcionalidade do modelo para parcela da foto 1 que contém as fachadas. Entretanto a metodologia proposta não viabilizou a monorrestituição das coordenadas da Capela-mor.

A geometria formada pelos pontos amostrais de controle é importante porque determina uma região de controle na foto. Em condições ideais, geometricamente, os pontos amostrais devem formar uma estrutura rígida e abrangente de modo que a região de controle contemple a fotografia por inteiro, ou seja, além de estarem bem distribuídos entre si, esses pontos devem estar bem distribuídos na foto como um todo.

A diferença entre o sucesso da monorrestituição dos pontos de checagem e dos pontos de interesse se deu devido a inconsistências do Sistema Referencial 3D misto. Essas inconsistências resultam da má distribuição geométrica dos pontos amostrais de controle nas fotos antigas. Ao formar a matriz Coluna Linha e Z, os pontos do MDS que ficam na região de extrapolação não são modelados corretamente formando um modelo distorcido e inconsistente. Aplicando-se a DLT inversa para as coordenadas de interesse cuja localização provável é justamente fora da região de controle, os resultados não são satisfatórios porque a modelagem não converge. Contudo, como o modelo funcionou para os pontos de checagem, essa aplicação provavelmente seria satisfatória para fotos nas mesmas condições, mas que possuam melhor geometria na distribuição dos pontos amostrais de controle.

A precisão dos parâmetros determinados por ajustamento é relativa ao conjunto de dados ajustado, esses valores só são garantidos para a região de controle, e quanto mais afastadas dessa região as observações de Coluna e Linha coletadas na imagem, menos confiáveis são os dados. Conclui-se, portanto, que a distribuição dos pontos amostrais nas fotos influencia significativamente na qualidade da monorrestituição.

Com exceção do tamanho das fotografias, em pixel, a falta de Informações técnicas sobre o sensor utilizado limita a manipulação dos dados. O escaneamento das fotografias também é responsável por inserir erros na transformação do dado analógico para o digital. Entretanto, tal ocorrência não inviabiliza o emprego do método proposto, mas aumenta as incertezas dos dados elaborados. Este fato foi evidenciado na análise sobre a fachada, fomentando a utilização do método da monorrestituição para aplicações futuras, ponderando-se a distribuição dos pontos amostrais.

Acrescento que, se a finalidade desse trabalho fosse fazer uma análise histórica da fachada, na região de controle onde os pontos de checagem foram monorrestituídos com sucesso, o objetivo teria sido alcançado, portanto, esse método pode servir para aplicações futuras.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aplicações em pesquisas de fins históricos, arqueológicos, culturais e dispondo de dados em condições similares aos utilizados nesse trabalho, ou seja, fotos antigas nas quais é desconhecida a autoria, posição de tomada, informações técnicas do sensor utilizado, data e condições de escaneamento da fotografia original é possível aplicar o método proposto desde que se tenha melhor distribuição de pontos amostrais de controle, e que esses sejam visíveis na foto e passíveis de coleta em campo.

Nesse sentido, recomenda-se a escolha de imagens em possibilitem distribuir pontos amostrais de forma adequada.

Além disso, é possível determinar com melhor precisão todos os parâmetros da DLT refinando os processos que, nesse trabalho, foram realizados de forma gráfica.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2 Ed Curitiba: José Bittencourt de Andrade, 2003.
- BAPTISTA, V. R. B. V. **Ruínas de São Francisco**: dois séculos de história e mito. Curitiba: V. R. B. V. Baptista, 2004
- BRIGHENTI, C. A. **Colonialidade do poder e a violência contra os povos indígenas**. Revista Percursos, p. 103–120, 27 abr. 2016.
- DIAS, S. O.; MITISHITA, E. A.; DALMOLIN, Q. Orientação Exterior De Um Par Estereoscópico Ikonos II Com Base No Modelo Não-Rigorous DLT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.18, n.1, p.40-62, jan./mar. 2012.
- FONSECA, P. T. **Ruínas De Francisco: Paisagens de Resistência**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2019. Disponível em: <<https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/trabalhoConclusaoWS?idpessoal=58111&idpograma=40001016035P1&anobase=2019&idtc=1386>>. Acesso em 25 mar. 2022.
- GEMAEL, C.; MACHADO, Á. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao Ajustamento de Observações**: Aplicações Geodésicas. 2 Ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.
- GONÇALVES, G. R. **Elementos de Fotogrametria Analítica** – Departamento de Matemática da F. C. T. U. C., Coimbra, 2006. Disponível em: <<http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/fotogrametria0506>> Acesso em: 28 mar. 2022.
- HEMMLEB, M.; WIEDEMANN, A. Digital rectification and generation of orthoimages in architectural photogrammetry. In: CIPA International Symposium, 1997, Göteborg, Suécia. **IAPRS, Vol. XXXII, Part 5C1B**. p. 261-267.
- HOOKS, BELL. **Ensinando a transgredir**: A Educação como prática da liberdade. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2013.
- KOZAN, J. M.; KOZAN, I. B. **Reconstrução virtual da antiga Igreja Matriz de Curitiba**: Análise de dimensões e implantação. Arqueologia, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 1-15, 2006. Disponível em: <<https://www.journals.kvasirpublishing.com/arq/article/view/63/142>>. Acesso em: 21 abr. 2022.
- LEICA GEOSYSTEMS. **Leica BLK360 Manual do Usuário Versão 2.0 Português-Brasil**. 2018. Disponível em: <http://leica-geosystems.com/contact-us/sales_support>. Acesso em: 20 mar. 2022.
- MITISHITA, E.; SARAIVA, C.; MACHADO, A. Monorestituição de imagens do satélite de alta resolução Ikonos 2 (GEO), utilizando-se da transformação DLT e modelo digital de terreno. In: INPE, 2003, Belo Horizonte. **Anais XI SBSR**. 2003. P. 357-364. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/43653209>> Acesso em: 20 abr. 2022.

SANTOS, D. R. **Apostila de Fotogrametria I** – Departamento de Geomática UFPR Curitiba, 2009. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~danielsantos/FS-capII_A5.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM MATLAB PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA DLT

```

clear
clc
format long
%%%=====TRANSFORMAÇÃO DLT DIRETA=====%%%
%-----COORDENADAS LASER-----%
%Leitura arquivo das observações das coordenadas do Laser Scanner
laser=load('pontos_amostrais_controle_laser1.txt');

%Formação do vetor S com as coordenadas X, Y e Z dos pontos
S = zeros(30,1);
i=1;
[m,n]=size(laser);
for i=1:m
    %equação que preenche os valores de X no vetor
    S((i*3)-2,1)=laser(i,2);
    %equação que preenche os valores de Y no vetor
    S((i*3)-1,1)=laser(i,3);
    %equação que preenche os valores de Z no vetor
    S((i*3),1)=laser(i,4);
end

%-----COORDENADAS FOTO-----%
%Leitura arquivo das observações das coordenadas da foto
foto=load('ptos_amostrais_controle_foto1.txt');

%Formação do vetor F com as coordenadas Coluna e Linha dos pontos
F = zeros(20,1);
i=1;
[m,n]=size(foto);
for i=1:m
    %equação que preenche os valores de C no vetor
    F((i*2)-1,1)=foto(i,2);
    %equação que preenche os valores de L no vetor
    F((i*2),1)=foto(i,3);
end

%=====AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES=====
%-----MODELO MATEMÁTICO-----%
%  $C = (L1*x + L2*y + L3*z + L4) / (L9*x + L10*y + L11*z + 1)$ 
%  $L = (L5*x + L6*y + L7*z + L8) / (L9*x + L10*y + L11*z + 1)$ 
%-----LINEARIZAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO-----%
%  $C_n = X_n*L1 + Y_n*L2 + Z_n*L3 + 1*L4 - C_n*X_n*L9 - C_n*Y_n*L10 - C_n*Z_n*L11$ 
%  $L_n = X_n*L5 + Y_n*L6 + Z_n*L7 + 1*L8 - L_n*X_n*L9 - L_n*Y_n*L10 - L_n*Z_n*L11$ 

%Vetor das observações-----%
%Lb = [C1, L1, C2, L2, C3, L3, ..., Cn, Ln];
Lb = F;

```

```

%Estimação dos parâmetros iniciais-----%
%Matriz dos coeficientes das equações (Cf) 11x11;
Cf = zeros(11,11);
i=1;
for i=1:6
    %equações que preenchem os valores dos coeficientes para as equações de Coluna
    Cf((i*2)-1,1)= laser(i,2);% ou da pra escrever --> Cf((i*2)-1,1)= S((i*3)-2);
    Cf((i*2)-1,2)= laser(i,3);% ou da pra escrever --> Cf((i*2)-1,2)= S((i*3)-1);
    Cf((i*2)-1,3)= laser(i,4);% ou da pra escrever --> Cf((i*2)-1,3)= S(i*3);
    Cf((i*2)-1,4)= 1;
    Cf((i*2)-1,5)= 0;
    Cf((i*2)-1,6)= 0;
    Cf((i*2)-1,7)= 0;
    Cf((i*2)-1,8)= 0;
    Cf((i*2)-1,9)= -((foto(i,2))*(laser(i,2)));% ou da pra escrever --> Cf((i*2)-1,9)= -F((i*2)-1)*S((i*3)-2);
    Cf((i*2)-1,10)= -((foto(i,2))*(laser(i,3)));% ou da pra escrever --> Cf((i*2)-1,10)= -F((i*2)-1)*S((i*3)-1);
    Cf((i*2)-1,11)= -((foto(i,2))*(laser(i,4)));% ou da pra escrever --> Cf((i*2)-1,11)= -F((i*2)-1)*S(i*3);

    %equações que preenchem os valores dos coeficientes para as equações de Linha
    Cf(i*2,1)= 0;
    Cf(i*2,2)= 0;
    Cf(i*2,3)= 0;
    Cf(i*2,4)= 0;
    Cf(i*2,5)= laser(i,2);% ou da pra escrever --> Cf(i*2,5)= S((i*3)-2);
    Cf(i*2,6)= laser(i,3);% ou da pra escrever --> Cf(i*2,6)= S((i*3)-1);
    Cf(i*2,7)= laser(i,4);% ou da pra escrever --> Cf(i*2,7)= S(i*3);
    Cf(i*2,8)= 1;
    Cf(i*2,9)= -((foto(i,3))*(laser(i,2)));% ou da pra escrever --> Cf(i*2,9)= -F(i*2)*S((i*3)-2);
    Cf(i*2,10)= -((foto(i,3))*(laser(i,3)));% ou da pra escrever --> Cf(i*2,10)= -F(i*2)*S((i*3)-1);
    Cf(i*2,11)= -((foto(i,3))*(laser(i,4)));% ou da pra escrever --> Cf(i*2,11)= -F(i*2)*S(i*3);
end

%Matriz das constantes das equações (K) 11x1;
for i=1:6
    %equação que preenche os valores de C no vetor
    K((i*2)-1,1)=foto(i,2);
    %equação que preenche os valores de L no vetor
    K((i*2),1)=foto(i,3);
end

%Vetor dos parâmetros aproximados (Xo) 11x1;
Xo=Cf\K;

%Pesos atribuídos às observações-----%
%Matriz dos Pesos (P) 20x20;
sigma = 1.5;
peso=inv((sigma)^2);
for i=1:20
    PP(i)=peso;
end
P=diag(PP);

```

```

%Iterações do ajustamento-----%
%Número de iterações iniciais para 10 pontos amostrais
it=-1;
fim=true;
L=zeros(20,1);
Lo=zeros(20,1);
A=zeros(20,11);
%Ajustamento: repetir iterações até X <= tolerância
while fim==true

%Matriz das observações calculadas (Lo)
i=1;
[m,n] = size(laser);
for i=1:m

    % C = (L1*x + L2*y + L3*z +L4) / (L9*x + L10*y + L11*z + 1)
    % L = (L5*x + L6*y + L7*z +L8) / (L9*x + L10*y + L11*z + 1)

    den = ((Xo(9,1)*laser(i,2))+(Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+1);

    Lo((i*2)-1,1)=((Xo(1,1)*laser(i,2))+(Xo(2,1)*laser(i,3))+(Xo(3,1)*laser(i,4))+Xo(4,1))/den;
    Lo((i*2,1) )=((Xo(5,1)*laser(i,2))+(Xo(6,1)*laser(i,3))+(Xo(7,1)*laser(i,4))+Xo(8,1))/den;

end

%Matriz das derivadas das equações em relação aos parâmetros (A) 20x11;
i=1;
for i=1:m

    %equações que preenchem os valores das derivadas dos parâmetros em relação à C
    A((i*2)-1,1)= (laser(i,2))/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % X/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
    A((i*2)-1,2)= (laser(i,3))/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % Y/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
    A((i*2)-1,3)= (laser(i,4))/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % Z/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
    A((i*2)-1,4)= 1/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % 1/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
    A((i*2)-1,5)= 0;
    A((i*2)-1,6)= 0;
    A((i*2)-1,7)= 0;
    A((i*2)-1,8)= 0;
    A((i*2)-1,9)=
    (laser(i,2))*((Xo(1,1)*laser(i,2))+(Xo(2,1)*laser(i,3))+(Xo(3,1)*laser(i,4))+Xo(4,1))/(((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1)^2) %-X*(L1*X + L2*Y + L3*Z + L4)/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)^2
    A((i*2)-1,10)=
    (laser(i,3))*((Xo(1,1)*laser(i,2))+(Xo(2,1)*laser(i,3))+(Xo(3,1)*laser(i,4))+Xo(4,1))/(((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1)^2) %-Y*(L1*X + L2*Y + L3*Z + L4)/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)^2
    A((i*2)-1,11)=
    (laser(i,4))*((Xo(1,1)*laser(i,2))+(Xo(2,1)*laser(i,3))+(Xo(3,1)*laser(i,4))+Xo(4,1))/(((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1)^2) %-Z*(L1*X + L2*Y + L3*Z + L4)/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)^2

    %equações que preenchem os valores das derivadas dos parâmetros em relação à L
    A(i*2,1)= 0;
    A(i*2,2)= 0;

```

```

A(i*2,3)= 0;
A(i*2,4)= 0;
A(i*2,5)= (laser(i,2))/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % X/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
A(i*2,6)= (laser(i,3))/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % Y/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
A(i*2,7)= (laser(i,4))/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % Z/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
A(i*2,8)= 1/((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo(9,1)*laser(i,2))+1); % 1/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)
A(i*2,9)=
(laser(i,2))*((Xo(5,1)*laser(i,2))+(Xo(6,1)*laser(i,3))+(Xo(7,1)*laser(i,4))+Xo(8,1))/(((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo
(9,1)*laser(i,2))+1)^2) %-X*(L1*X + L2*Y + L3*Z + L4)/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)^2
A(i*2,10)=
(laser(i,3))*((Xo(5,1)*laser(i,2))+(Xo(6,1)*laser(i,3))+(Xo(7,1)*laser(i,4))+Xo(8,1))/(((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo
(9,1)*laser(i,2))+1)^2) %-Y*(L1*X + L2*Y + L3*Z + L4)/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)^2
A(i*2,11)=
(laser(i,4))*((Xo(5,1)*laser(i,2))+(Xo(6,1)*laser(i,3))+(Xo(7,1)*laser(i,4))+Xo(8,1))/(((Xo(10,1)*laser(i,3))+(Xo(11,1)*laser(i,4))+(Xo
(9,1)*laser(i,2))+1)^2) %-Z*(L1*X + L2*Y + L3*Z + L4)/(L10*Y + L11*Z + L9*X + 1)^2
end

%Matriz L (Lo-Lb)
L=Lo-Lb;
%Matriz X (correções)
N=A'*P*A;
U=A'*P*L;
X=-inv(N)*U;
%Matriz Xa (parâmetros corrigidos)
Xa=Xo+X;
%Atualização de Xo
Xo=Xa;
%Vetor V (resíduos do ajustamento)
V=A*X+L;

it=it+1;
fprintf('Iteracao: %d\n', it);
fim=((max(abs(X))>10^-6)&&(it<10));

end
% ANÁLISE ESTATÍSTICA
Xo
%Variância à posteriori
%Grau de liberdade (n de equações - n de parametros/incógnitas)
gl=size(Lb,1)-size(Xo,1)
varp=(V'*P*V)/gl

%Matriz Variância Covariância (MVC) dos parâmetros vai ser 15x15(XYZ de 5 pontos)
%mvc=varp*inv(A'*P*A);

%Desvio padrão das coordenadas dos pontos
%dp=sqrt(diag(mvc(1:11,1:11)))

```

APÊNDICE 2 – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM MATLAB PARA MONORRESTITUIÇÃO

```

clc
clear
format short

%Coordenadas na nuvem de pontos
lidar_check=load('pontos_amostrais_check_laser1.txt');
lidar_MDT=load('MDT_transf_foto1.txt');

%Coordenadas na foto
foto_check=load('pontos_amostrais_check_foto1.txt');
foto_cap=load('ptos_interesse_terreno_capela_foto1.txt');

%Parametros ajustados
Xo=[-0.010195983493798e+03
    0.000340039380291e+03
    0.000757035621985e+03
    1.192811118866925e+03
    -0.004581331872222e+03
    -0.002464614789295e+03
    -0.000465778278345e+03
    0.575904088106372e+03
    -0.000008276021895e+03
    0.000000169701453e+03
    -0.000000709039311e+03];

%%-----Aplicação da DLT Direta no MDT para calcular C, L e Z.
%Equacao DLT Direta: CL=f(X,Y,Z)
[m,n]=size(lidar_MDT);
for i=1:m

    col(i)=(Xo(1).*lidar_MDT(i,1)+Xo(2).*lidar_MDT(i,2)+Xo(3).*lidar_MDT(i,3)+Xo(4))./(Xo(9).*lidar_MDT(i,1)+Xo(10).*lidar_MDT(i,2)
    +Xo(11).*lidar_MDT(i,3)+1);

    lin(i)=(Xo(5).*lidar_MDT(i,1)+Xo(6).*lidar_MDT(i,2)+Xo(7).*lidar_MDT(i,3)+Xo(8))./(Xo(9).*lidar_MDT(i,1)+Xo(10).*lidar_MDT(i,2)
    +Xo(11).*lidar_MDT(i,3)+1);

end

%Matriz C L Z de todos os pontos do MDT (sistema misto)
clz_MDT=[col(:) lin(:) lidar_MDT(:,3)];

%%=====Monorrestituição para os pontos de checagem.

%busca pelo ponto vizinho mais proximo
Z_check=zeros(4,1);
[m,n]= size(foto_check);

```

```

for i=1:m
%Calcular vizinho mais proximo no MDT do Ponto medido (distancia em pixel CL)
d=sqrt((foto_check(i,2)-clz_MDT(:,1)).^2+(foto_check(i,3)-clz_MDT(:,2)).^2);

%Posicao da distancia menor (posicao do ponto no MDT, vizinho mais proximo)
pos=find(d(:) == min(d));

Z_check(i)=clz_MDT(pos,3);
end

%Matriz C L Z de todos os pontos de check (sistema misto)
clz_pts_check=[foto_check(:,2) foto_check(:,3) Z_check];

%Aplicação da DLT Inversa
X_check=zeros(4,1);
Y_check=zeros(4,1);

[m,n]=size(foto_check);
for i=1:m
X_check(i)=-((-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(clz_pts_check(i,2) - Xo(8) - Z_check(i,1)*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(11) + Xo(7)))/(-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(10) + Xo(6)))+(clz_pts_check(i,1) - Xo(4) - Z_check(i,1)*(-clz_pts_check(i,1)*Xo(11) + Xo(3)))*(-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) - (-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(clz_pts_check(i,2)*Xo(9) - Xo(5)) + (-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(10) + Xo(6)))/((-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(10) + Xo(6)));
Y_check(i)=-((-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(clz_pts_check(i,2) - Xo(8) - Z_check(i,1)*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(11) + Xo(7)))/(-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(10) + Xo(6)))+(clz_pts_check(i,2)*Xo(9) - Xo(5))*(clz_pts_check(i,1) - Xo(4) - Z_check(i,1)*(-clz_pts_check(i,1)*Xo(11) + Xo(3)))/(-clz_pts_check(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_check(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_check(i,2)*Xo(10) + Xo(6)));
end

%Coordenadas dos pontos de checagem no Sistema Referencial do Objeto (MDS)
XYZ_mono_check=[X_check Y_check Z_check]

%%=====Monorrestituição para os pontos de interesse (Capela-mor).

%busca pelo ponto vizinho mais proximo
Z_cap=zeros(8,1);
[m,n]= size(foto_cap);
for i=1:m
%Calcular vizinho mais proximo no MDT do Ponto medido (distancia em pixel CL)
d=sqrt((foto_cap(i,2)-clz_MDT(:,1)).^2+(foto_cap(i,3)-clz_MDT(:,2)).^2);

%Posicao da distancia menor (posicao do ponto no MDT, vizinho mais proximo)
pos2=find(d(:) == min(d));

Z_cap(i)=clz_MDT(pos2,3);
end

```

```

%Matriz C L Z de todos os pontos de check (sistema misto)
clz_pts_cap=[foto_cap(:,2) foto_cap(:,3) Z_cap];

%Aplicação da DLT Inversa
X_cap=zeros(8,1);
Y_cap=zeros(8,1);

[m,n]=size(foto_cap);
for i=1:m
X_cap(i)=-((-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(clz_pts_cap(i,2) - Xo(8) - Z_cap(i,1)*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(11) + Xo(7))))/((-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(10) + Xo(6)))+((clz_pts_cap(i,1) - Xo(4) - Z_cap(i,1)*(-clz_pts_cap(i,1)*Xo(11) + Xo(3)))*(-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) - (-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) - Xo(5)) + (-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(10) + Xo(6)))/((-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(10) + Xo(6))));
Y_cap(i)=-((-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(clz_pts_cap(i,2) - Xo(8) - Z_cap(i,1)*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(11) + Xo(7))))/((-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(10) + Xo(6)))+((clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) - Xo(5))*(clz_pts_cap(i,1) - Xo(4) - Z_cap(i,1)*(-clz_pts_cap(i,1)*Xo(11) + Xo(3)))/((-clz_pts_cap(i,1)*Xo(10) + Xo(2))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(9) + Xo(5)) + (-clz_pts_cap(i,1)*Xo(9) + Xo(1))*(-clz_pts_cap(i,2)*Xo(10) + Xo(6))));
end

%Coordenadas dos pontos de checagem no Sistema Referencial do Objeto (MDS)
XYZ_mono_cap=[X_cap Y_cap Z_cap]

```