

Tobias Rehder da Cunha Patuci

**AUTOMAÇÃO DO CAMINHAMENTO
FOTOGRAMÉTRICO COM ARRANJO TRIANGULAR DE
CÂMERAS EM TRAJETÓRIA CURVA**

Presidente Prudente

2017

Tobias Rehder da Cunha Patuci

**AUTOMAÇÃO DO CAMINHAMENTO FOTOGRAMÉTRICO COM
ARRANJO TRIANGULAR DE CÂMERAS EM TRAJETÓRIA CURVA**

Dissertação de defesa de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP.

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Custódio da Silva

Presidente Prudente
2017

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

Patuci, Tobias Rehder da Cunha.
P345a Automação do caminhamento fotogramétrico com arranjo triangular de câmeras em trajetória curva / Tobias Rehder da Cunha Patuci. - 2017
89 f.

Orientador: João Fernando Custódio da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2017
Inclui bibliografia

1. Mapeamento móvel. 2. Integração de sensores. 3. Caminhamento fotogramétrico. I. Silva, João Fernando Custódio da. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção
CRB-8/9013

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

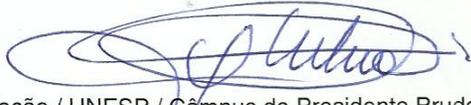
TÍTULO: *Automação do caminhamento fotogramétrico
com arranjo triangular de câmeras em
trajetória curva*

AUTOR: TOBIAS REHDER DA CUNHA PATUCI

ORIENTADOR: JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO SILVA
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. ALMIR OLIVETTE ARTERO
Departamento de Matemática e Computação / UNESP / Câmpus de Presidente Prudente


Prof. Dr. FRANCISCO ASSIS DA SILVA
Departamento de Informática / Universidade do Oeste Paulista

Presidente Prudente, 16 de dezembro de 2017.

Agradecimentos

Agradeço ao professor e orientador Dr. João Fernando Custódio da Silva, pela partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho. Por ter me mostrado os caminhos da vida científica e, acima de tudo, pelos constantes ensinamentos de vida.

Ao professor Dr. Francisco Assis da Silva, pelos inúmeros momentos compartilhados no LaMMov, sempre disposto a ensinar e a ajudar. Pelas conversas e brincadeiras, fazendo com que o trabalho se tornasse menos oneroso. Me faltam palavras para te agradecer.

À professora Dra. Arlete Aparecida Correia Meneguette, por ter aceitado me orientar no estágio docência, e por te me ensinado os princípios e valores da profissão acadêmica.

Aos desenvolvedores do software de identificação automática de alvos do tipo ARUCO, Sérgio Leandro Alves da Silva, Antonio Maria Garcia Tommaselli e Almir Olivette Artero.

Ao Alemão, pelas longas conversas sobre o tema e os mais variados assuntos. Pela prontidão e disposição de ajudar, a qualquer hora do dia. Pelos tempos em que moramos juntos e por te me acolhido nos dias em que estive em Prudente.

À Mari, Victor e Maurício, pelas discussões, companheirismo e por compartilhar o conhecimento.

À todos os amigos da graduação, pós-graduação, repúblicas e atlética, pelos momentos vividos, tornando esses anos tão memoráveis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas e à instituição UNESP, por fornecer as condições necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPq pelo incentivo ao desenvolvimento da ciência e pela concessão da bolsa de pesquisa.

À todos os professores do departamento de cartografia, pelos ensinamentos transmitidos durante todos esses anos.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha família, por todo o apoio dado durante esses quase 8 anos. Vocês são a razão da minha felicidade.

Epígrafe

O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.

Aristóteles

Resumo

Um sistema de mapeamento móvel (SMM) permite obter informações geográficas das vias e de seu entorno. O objetivo deste trabalho é controlar a propagação de erros na determinação dos POE no processo de caminhamento fotogramétrico, para isto, foi estudada a adição de uma terceira câmera ao sistema e a integração das imagens com dados dos sensores de posicionamento e navegação. As câmeras foram dispostas em um arranjo triangular, de modo que o terceiro raio homólogo de um ponto fosse não coplanar aos demais raios homólogos deste mesmo ponto. Isto permite melhorar a estimativa da posição geométrica dos pontos, principalmente no sentido transversal à base do levantamento. Para a realização do levantamento, o sistema foi calibrado no campo de calibração da FCT/Unesp. O trajeto percorrido foi no entorno de uma quadra urbana, de modo a percorrer trechos retos e curvos. Os algoritmos SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) e RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) foram aplicados nas imagens coletadas pelo sistema, a fim de identificar os pontos homólogos nos trios de imagens e nas imagens subsequentes. Os parâmetros de orientação exterior (POE) das câmeras foram calculados pelo processo de fototriangulação, o ajustamento foi pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), modelo paramétrico. Os dados foram processados variando-se a quantidade de câmeras, duas ou três, para analisar a contribuição da terceira câmera. Os experimentos foram realizados para trechos retos e curvos e variou-se o tamanho do bloco processado e o avanço de base. Além disso, foi analisada a diferença entre o processamento em lote e sequencial. O controle de qualidade foi realizado pela análise da raiz do erro médio quadrático, comparando-se as coordenadas obtidas na fototriangulação com as coordenadas medidas em campo, em um levantamento topográfico. Os experimentos mostraram que com a adição da terceira câmera foram obtidos melhores resultados, principalmente para a trajetória curva.

Palavras-chave: mapeamento móvel, integração de sensores, caminhamento fotogramétrico, fototriangulação.

Abstract

A mobile mapping system (MMS) provides geographical information of the roads and their surroundings. When carried by pedestrians, it can provide information of indoor areas or inaccessible to vehicles. The objective of this work was to control the spread of errors in determining the EOP in photogrammetric traversal process to this, the addition of a third camera to the system and the integration of images and positioning and navigation sensors data were studied. Cameras were mounted in a triangular arrangement, in a way that the third homologous beam of a point is non-collinear to the others homologous beams of the same point. This enables a point position estimative enhancement, mainly in the transverse direction of the base. For the survey, the system was calibrated in the FCT/Unesp calibration field. The route taken was in the vicinity of an urban block, passing by straight and curved sections. SIFT algorithm (Scale Invariant Feature Transform) and RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) were applied on the images collected by the system to identify the corresponding points in image trios and subsequent images. The exterior orientation parameters (EOP) of the cameras were calculated by the phototriangulation process, the adjustment method used was the least squares (LSM), parametric model. The data were processed by varying the number of cameras, two or three, to analyze the contribution of the third camera. The experiments were realized for straight and curved sections and was varied the block size and base advance. Moreover, it was analysed the difference between sequential and full block calculation. Quality control was held by root mean square error analysis, comparing coordinates obtained in phototriangulation with object coordinates obtained by topographic survey. Finally, the experiments presented better results with the third camera addition, mainly for the curved section.

Keywords: mobile mapping, sensor integration, photogrammetric bridging, phototriangulation.

Lista de figuras

Figura 1 – Inter-relação dos sistemas referenciais da metodologia do mapeamento móvel.	15
Figura 2 – Plataforma de código aberto Arduino (PCA), versão Mega.	16
Figura 3 – Conceito de caminhamento fotogramétrico.	19
Figura 4 – Arranjo triangular de câmeras	20
Figura 5 – Coordenadas geodésicas	22
Figura 6 – Coordenadas Geocêntricas	23
Figura 7 – Coordenadas Cartesianas Locais	23
Figura 8 – Sistema Imagem	24
Figura 9 – Sistema Fotogramétrico	25
Figura 10 – Sistema Sensor	25
Figura 11 – Posicionamento pelo GNSS	26
Figura 12 – Diferença de Gaussianas	28
Figura 13 – Gradientes e descritor de ponto chave	29
Figura 14 – Correspondência lateral e avante	31
Figura 15 – Sistema de mapeamento móvel finalizado	39
Figura 16 – Croqui da composição do SMM	40
Figura 17 – Diagrama de ligação dos componentes eletrônicos	40
Figura 18 – Campo de calibração 3D - FCT/Unesp	41
Figura 19 – Rotação das imagens em torno do eixo z	42
Figura 20 – Área de estudo	43
Figura 21 – Posições das câmeras nos instantes de exposição	44
Figura 22 – Distribuição dos pontos de verificação	46
Figura 23 – Exemplo de correspondência lateral	47
Figura 24 – Correspondências após a aplicação do controle por retas	48
Figura 25 – Correspondências no trio de imagens	49
Figura 26 – Exemplo de correspondência avante (Esq. x Esq.+1)	50
Figura 27 – POE's gerados	55
Figura 28 – Pontos de enlace calculados por interseção fotogramétrica	56
Figura 29 – Divisão dos quadrante de uma imagem	57
Figura 30 – Pontos de enlace filtrados	58
Figura 31 – Conceito de bloco e lote	59
Figura 32 – Conceito de avanço de base	59

Figura 33 – Trechos, reto e curvo, selecionados	60
Figura 34 – Tela inicial do software de fototriangulação	61
Figura 35 – Pontos de verificação do trecho reto - Visto de perfil	68
Figura 36 – Pontos de verificação do trecho reto - Visto de cima	68
Figura 37 – POE do trecho reto - Visto de perfil	70
Figura 38 – POE do trecho reto - Visto de cima	70
Figura 39 – Pontos de verificação do trecho curvo - Visto de cima	77
Figura 40 – Pontos de verificação do trecho curvo - Visto de perfil	78
Figura 41 – POE do trecho curvo - Visto de cima	79
Figura 42 – POE do trecho curvo - Visto de perfil	79

Lista de tabelas

Tabela 1 – POI das câmeras obtidos na calibração	42
Tabela 2 – Coordenadas ECEF das estações de partida	45
Tabela 3 – Coordenada local das estações de partida	45
Tabela 4 – Coordenadas geodésicas da origem do sistema local	53
Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de verificação da trajetória reta	64
Tabela 6 – Erro obtido para cada coordenada - Sequencial 2 Câmeras - Trecho Reto	64
Tabela 7 – REMQ das coordenadas - Sequencial 2 Câmeras - Trecho Reto	65
Tabela 8 – Erro obtido para cada coordenada - Sequencial 3 Câmeras - Trecho Reto	65
Tabela 9 – REMQ das coordenadas - Sequencial 3 Câmeras - Trecho Reto	65
Tabela 10 – Resultados para os processamentos com duas câmeras - Trecho Reto	66
Tabela 11 – Resultados para os processamentos com três câmeras - Trecho Reto .	66
Tabela 12 – Arranjo com melhor resultado para cada processamento - Trecho reto .	67
Tabela 13 – Desvios-padrão dos POE - 2 Câmeras - Trecho Reto	69
Tabela 14 – Desvios-padrão dos POE - 3 Câmeras - Trecho Reto	69
Tabela 15 – Lote x Sequencial - Trecho Reto	71
Tabela 16 – Desvios-padrão obtidos nos processamentos em lote e sequencial - Trecho Reto	71
Tabela 17 – Resultados para os processamentos em lote e sequencial - Trecho Reto	72
Tabela 18 – Resultados obtidos para diferentes avanços de base - Trecho Reto . . .	73
Tabela 19 – Coordenadas dos pontos de verificação da trajetória curva	74
Tabela 20 – Coordenadas e seus erros - Lote 2 Câmeras - Trecho Curvo	74
Tabela 21 – REMQ das coordenadas - Lote 2 Câmeras - Trecho Curvo	75
Tabela 22 – Erro obtido para cada coordenada - Lote 3 Câmeras - Trecho curvo . .	75
Tabela 23 – REMQ das coordenadas - Lote 3 Câmeras - Trecho Curvo	75
Tabela 24 – Resultados para os processamentos com duas câmeras - Trecho curvo	76
Tabela 25 – Resultados para os processamentos com três câmeras - Trecho curvo .	76
Tabela 26 – Arranjo com melhor resultado para cada processamento - Trecho curvo	76
Tabela 27 – Desvios-padrão dos POE - 2 Câmeras - Trecho Curvo	78
Tabela 28 – Desvios-padrão dos POE - 3 Câmeras - Trecho Curvo	78
Tabela 29 – Lote x Sequencial - Trecho Curvo	80
Tabela 30 – Desvios-padrão obtidos nos processamentos em lote e sequencial - Trecho Curvo	80
Tabela 31 – Resultados para os processamentos com três câmeras - Trecho Curvo	81

Lista de abreviaturas e siglas

CF	Caminhamento Fotogramétrico
CP	Centro perspectivo
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
DOF	<i>Degrees of Freedom</i>
ECEF	<i>Earth-centered Earth-fixed</i>
ENU	<i>East North Up</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
GLONASS	<i>Global Orbiting Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
GRS-80	<i>Geodetic Reference System 1980</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
Latogeo	Laboratório de Astronomia Topografia e Geodésia
MEMS	<i>Micro Electro-Mechanic Sensor</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
PCA	Plataforma de código aberto
POE	Parâmetro de Orientação Exterior
POI	Parâmetro de Orientação Interior
PPGCC	Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
RANSAC	<i>RANdom SAmples Consensus</i>
REMQ	Raíz do Erro Médio Quadrático
SD	<i>Secure Digital</i>
SIFT	<i>Scale-Invariant Feature Transform</i>
SMM	Sistema de Mapeamento Móvel
UNESP	Universidade Estadual Paulista
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i>

Sumário

	Lista de figuras	8
	Lista de tabelas	10
1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Caminhamento Fotogramétrico	19
2.2	Arranjo triangular de câmeras	20
2.3	Sistemas de referência	21
2.3.1	Sistema Geodésico Geocêntrico	22
2.3.2	Sistema Cartesiano Geocêntrico	22
2.3.3	Sistema Cartesiano Local	23
2.3.4	Sistema Imagem	24
2.3.5	Sistema Fotogramétrico	24
2.3.6	Sistema Sensor	24
2.4	Posicionamento por GNSS	26
2.5	Algoritmo SIFT	27
2.6	Correspondência dos descritores SIFT	30
2.7	Algoritmo RANSAC	31
2.8	Fototriangulação	32
2.9	Calibração de câmeras	35
2.9.1	Método das Câmeras Convergentes	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	Materiais utilizados	38
3.2	Montagem do sistema	39
3.3	Calibração das câmeras	41
3.4	Levantamento de campo	43
3.4.1	Levantamento dos pontos de verificação	45
3.5	Processamento dos dados	47
3.5.1	Aplicação do algoritmo SIFT e RANSAC nas imagens	47
3.5.2	Geração dos POE das câmeras	51
3.5.3	Geração das coordenadas-objeto e filtragem dos dados	55

3.5.4	Fototriangulação	58
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	63
4.1	Trajectoria Reta	63
4.1.1	Análise: 2 x 3 câmeras	65
4.1.2	Análise: Sequencial x Lote e variações do tamanho do bloco e avanço de base	71
4.2	Trajectoria Curva	74
4.2.1	Análise: 2 x 3 câmeras	75
4.2.2	Análise: Sequencial x Lote e variações do tamanho do bloco e avanço de base	80
4.3	Resumo das análises dos resultados	82
4.3.1	2 x 3 câmeras	82
4.3.2	Lote x Sequencial	83
4.3.3	Tamanho do bloco	83
4.3.4	Avanço de base	83
5	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	86

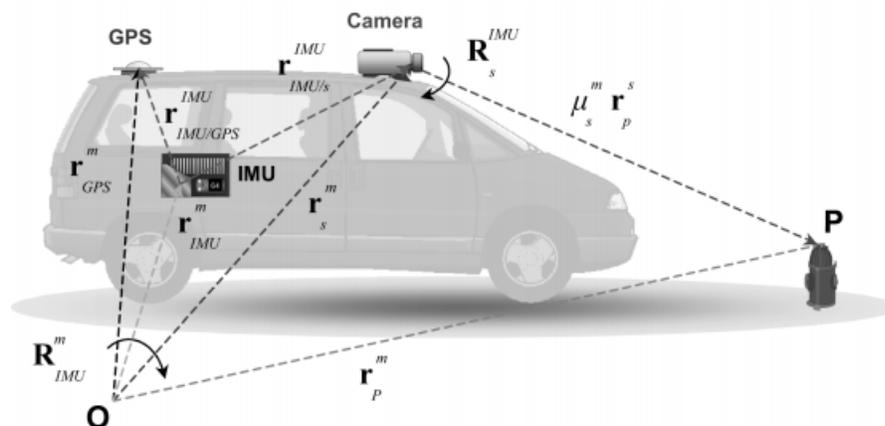
1 Introdução

Devido ao rápido desenvolvimento das cidades e centros urbanos, a necessidade de informações atualizadas por parte dos órgãos responsáveis pelo planejamento aumenta consideravelmente (EL-SHEIMY; SCHWARZ, 1998). No entanto, métodos tradicionais como topografia ou aerofotogrametria não são muito viáveis para se realizar com certa frequência devido ao alto custo (aerofotogrametria) e o tempo de execução (topografia). Um sistema de mapeamento móvel (SMM) permite a aquisição de informações geográficas das vias e de seu entorno com rapidez. Sensores de posicionamento, de navegação e de imageamento são dispostos conjuntamente em um veículo automotor (BOSSLER et al., 1991). Os SMM também permitem mapear ambientes internos tais como o interior de edifícios e demais recintos (SHAO et al., 2009; WU et al., 2009). Os dados coletados por esse sistema são processados e geram imagens georreferenciadas dos locais, passando a integrar os sistemas de informação geográfica (TAO; LI, 2007).

As imagens de uma sequência de pares, ou trios, obtidas ao longo da trajetória do SMM podem ser diretamente ou indiretamente georreferenciadas. O georreferenciamento direto é dado pela integração dos sensores de posicionamento (GNSS - *Global Navigation Satellite System* / GPS - *Global Positioning System*) e inercial (IMU - *Inertial Measurement Unit* / MEMS - *Micro Electro-Mechanic Sensor*), que propiciam a estimativa direta dos parâmetros de orientação exterior (POE) da plataforma. Os dados inerciais e as imagens são considerados internos ao SMM, já os dados GPS (GNSS) são externos, ou seja, sujeitos à disponibilidade de um sistema independente. Os sensores de navegação geram sinais que são processados e interpretados como posições, relativas ao centro da antena; o sensor inercial fornece os ângulos dos eixos coordenados do sistema. A Figura 1 apresenta um esquema de um sistema móvel de mapeamento completo com três tipos de sensores e as suas relações geométricas referenciais, em que \mathbf{r} é o vetor posição de um sensor/ponto (subscrito) em relação à um sistema de referência (sobrescrito).

Alguns problemas ocasionados por fatores externos ainda estão presentes neste tipo de levantamento, dentre eles o efeito do multicaminhamento e a má recepção dos sinais em áreas urbanas densas, estes problemas não serão objetos de estudo no presente trabalho.

Figura 1 – Inter-relação dos sistemas referenciais da metodologia do mapeamento móvel.



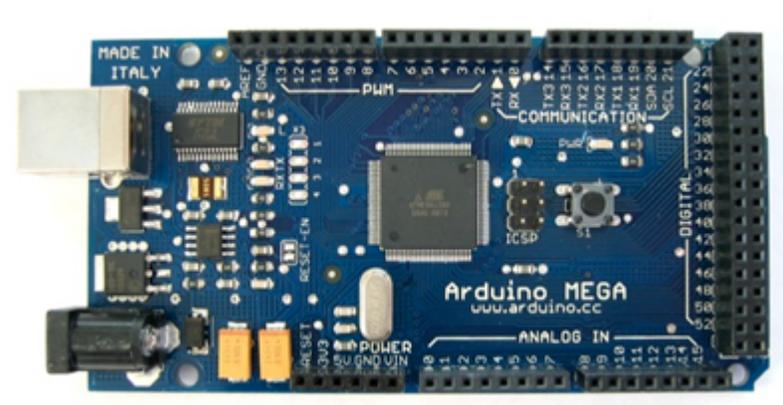
Fonte: Ellum e El-Sheimy (2002)

Os parâmetros de orientação exterior (POE), que são as coordenadas tridimensionais do centro perspectivo da câmera (X_0, Y_0, Z_0) no espaço objeto e os ângulos de orientação da câmera (ω, φ, κ), também chamado de “atitude” da câmera, podem ser estimados indiretamente por métodos fotogramétricos como a fototriangulação. Neste trabalho, a determinação dos POE foi realizada no decorrer do caminhamento fotogramétrico (SILVA; OLIVEIRA, 1998; SILVA et al., 2000).

Devido aos custos de aquisição dos sensores e da plataforma móvel serem muito altos, seja por causa dos sensores possuírem tecnologias refinadas, seja pelo valor agregado ao sistema pela solução de processamento e análise de dados (programas computacionais), a ideia deste projeto é a utilização de sensores de baixo custo. Embora é sabido que a precisão atingida por este tipo de equipamento é inferior ao de sensores de maior custo, espera-se que o método utilizado compense a falta de precisão.

A plataforma Arduino (Figura 2), baseada no microcontrolador ATmel, é uma alternativa de baixo custo, que consiste de um projeto de hardware e software livres criado inicialmente para utilização em projetos de interação entre o mundo físico e a computação, por não necessitar de conhecimentos profundos sobre eletrônica ou programação. Atualmente, a plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto Arduino, aqui resumidamente designada por plataforma Arduino, ou PCA, é amplamente utilizada por pessoas com os mais diferentes níveis de conhecimento para diversas aplicações por sua facilidade de uso.

Figura 2 – Plataforma de código aberto Arduino (PCA), versão Mega.



Fonte: www.arduino.cc

A PCA pode ser usada como uma plataforma que se adequa às necessidades de integrar diferentes sensores, no caso, câmeras digitais, receptores GNSS e sensores inerciais. Este dispositivo foi responsável pelo sincronismo entre os dados provenientes dos sensores (imagens, posicionamento espacial e atitude), fundamental para garantir a qualidade do sistema de mapeamento móvel.

A automação é caracterizada pela ausência de intervenção do operador em qualquer etapa do processo. As imagens foram obtidas por sensores do tipo câmeras digitais. Assim, técnicas de visão computacional, processamento digital de imagens e fotogrametria digital foram utilizadas com o objetivo de extrair dados das imagens. A solução foi dada por algoritmos de estimação por mínimos quadrados, que fizeram o ajustamento dos dados e estimaram os POE.

Como parte do processo de automatização do sistema, é necessário fazer a identificação de pontos homólogos nas imagens obtidas de forma automática. Para esta finalidade, existem diversos algoritmos disponíveis. Neste trabalho, foram utilizados os algoritmos SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) e RANSAC (*Random Sample Consensus*). O algoritmo SIFT extrai vetores descritores a partir de pontos chaves, que são utilizados para o processo de correspondência de um par de imagens. O algoritmo RANSAC é responsável por filtrar as falsas correspondências e garantir a robustez do método. Como resultado destes algoritmos, são obtidas as fotocoordenadas de pontos correspondentes, utilizadas como dados de entrada para o processo automático de auto-orientação das imagens por fototriangulação, ou caminhamento fotogramétrico.

Lemes Neto (2014) realizou um experimento semelhante utilizando somente imagens de duas câmeras em um percurso de trajetória retilínea, concluindo que após certa quantidade de pares de imagens, a estimativa dos POE's das câmeras começavam a divergir de forma significativa, comprometendo futuras estimativas. Blasechi (2016) realizou

um experimento com dados simulados e inseriu uma terceira câmera ao sistema, formando um arranjo triangular, a fim de aumentar a qualidade da estimativa dos POE por meio da redundância de observações. De fato, a terceira câmera ajudou a controlar melhor a divergência da estimativa dos parâmetros, embora ainda tivesse dificuldades para se determinar a profundidade de um ponto presente nas imagens.

Este trabalho tem como objetivo reduzir a propagação de erros na determinação dos parâmetros de orientação exterior das câmeras no decorrer do caminhamento fotogramétrico, consequência da falta de pontos de apoio distribuídos pelo terreno e da fraca geometria do par de câmeras.

O arranjo formado por um par de câmeras possui uma deficiência em sua geometria, pois há somente dois raios homólogos por ponto; sendo assim, a determinação da posição tridimensional do ponto fica sujeita a erros inerentes à tomada das imagens, sendo que com apenas duas câmeras não é possível detectar esses erros. Espera-se que com a maior redundância das observações a determinação da posição tridimensional do ponto ganhe em precisão. Dessa forma, a hipótese estudada neste trabalho é a adição de uma terceira câmera ao sistema, disposta em um arranjo não-colinear a fim de aumentar a quantidade de observações e melhorar a determinação dos POE e coordenadas no espaço objeto. A nova câmera possibilita gerar redundâncias nas observações dos pontos, de modo que para cada ponto haja três raios homólogos, permitindo um ajuste no processo de interseção, do ponto de vista geométrico.

A precisão na determinação dos POE das câmeras no caminhamento fotogramétrico realizado apenas com imagens passa a ser ineficaz após certa quantidade de imagens processadas (LEMES NETO, 2014), os erros presentes nas primeiras determinações são propagados às demais estimativas, de modo que, em certo ponto, a precisão fique muito aquém do esperado. Na tentativa de solucionar tal problema, foi estudada a introdução de injunções de posição e atitude, obtidas por sensores GNSS e inerciais, no processo de fototriangulação. Embora os sensores utilizados fossem de baixo custo, e consequentemente, de pouca precisão, esperava-se que os valores estimados por estes pudessem contribuir no controle da propagação dos erros.

O processamento dos dados foi realizado de vários modos distintos, primeiramente, foram comparados os resultados obtidos nos caminhamentos com duas e três câmeras, além disso, foi comparado o caminhamento fotogramétrico na trajetória reta e trajetória curva. Em seguida, foi estudado o processamento em lote e sequencial. Por fim, foram analisadas as variações do tamanho do bloco processado e do avanço de base. O propósito de se realizar estes modos de processamento foi analisar a precisão posicional do pontos de verificação obtida para cada situação.

Devido à grande quantidade de dados coletados durante o levantamento e a invia-

bilidade de um operador realizar a identificação de pontos homólogos nas imagens e a preparação dos dados para o processo de fototriangulação, foi realizada a automatização dos processos de identificação e correspondência de pontos, bem como a fototriangulação.

Após este capítulo introdutório, a presente dissertação está organizada conforme a estrutura que segue.

No capítulo 2, são detalhadas as fundamentações teóricas acerca dos métodos, sensores, sistemas de referências e algoritmos utilizados no decorrer do trabalho.

No capítulo 3, são descritos os passos da metodologia, bem como os materiais utilizados.

O capítulo 4 apresenta os experimentos realizados e seus respectivos resultados, bem como análises dos resultados obtidos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas acerca da hipótese estudada e da metodologia proposta.

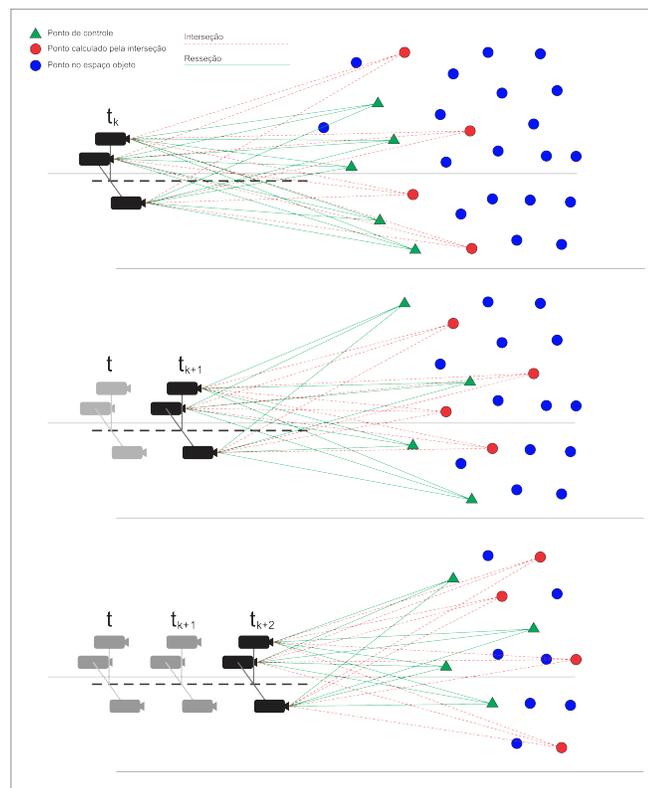
2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta uma revisão teórica sobre os assuntos envolvidos, direta e indiretamente, com o desenvolvimento do trabalho. Neste, estão expostos conceitos de fotogrametria, geodésia e visão computacional.

2.1 Caminhamento Fotogramétrico

O caminhamento fotogramétrico (CF) pode ser entendido como um modo especial de levantamento fotogramétrico, baseado em sucessivos pares, ou trios, de imagens terrestres que formem modelos estereoscópicos, obtidas de tal modo que a base estereoscópica seja posicionada aproximadamente perpendicular ao eixo do levantamento ou, em outras palavras, que os eixos ópticos sejam aproximadamente paralelos ao referido eixo do levantamento (BARBOSA, 2006; SILVA; OLIVEIRA, 1998). A Figura 3 apresenta o conceito de caminhamento fotogramétrico.

Figura 3 – Conceito de caminhamento fotogramétrico.



Como visto na Figura 3, o caminhamento fotogramétrico é realizado a partir do primeiro trio de imagens, deste, calcula-se as coordenadas-objeto de pelo menos quatro pontos (momento t_k). Seguindo, os pontos calculados por interseção do trio de imagens de t_k se tornam pontos de controle para a resseção espacial de cada imagem do trio t_{k+1} . Com as imagens de t_{k+1} orientadas, calcula-se novamente as coordenadas-objeto de novos pontos, que por sua vez, apoiarão a resseção espacial de cada imagem do trio t_{k+2} , e assim sucessivamente.

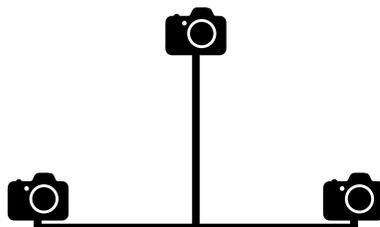
Além da sucessão de resseções-interseções, é possível realizar o caminhamento fotogramétrico por meio de fototriangulações por feixes de raios sucessivas em pequenos blocos de imagens (duas, três ou mais bases). Dessa forma, os POE e as coordenadas-objeto são calculadas simultaneamente para cada bloco de imagens, reduzindo a quantidade de processos matemáticos, e conseqüentemente, a propagação de erros.

2.2 Arranjo triangular de câmeras

Silva (1997) apresentou um modelo de sistema de mapeamento móvel utilizando um par estereoscópico de câmeras. Lemes Neto (2014) propôs uma metodologia para posicionar e orientar, de forma semiautomática, pares de imagens obtidas por um SMM. O posicionamento e a orientação foram realizados utilizando-se fotocoordenadas obtidas nas imagens, extraídas pelo SIFT, e a fototriangulação. No referido trabalho, não foram utilizados sensores do tipo GPS e/ou inercial, no entanto, foi utilizado um odômetro digital para fornecer a distância entre as tomadas dos pares de imagens.

Blasechi (2016) observou que na utilização de um par de câmeras há uma deficiência com relação à redundância de observações no alinhamento perpendicular à linha de base, e sugere a introdução de uma terceira câmera ao conjunto, de tal modo que crie uma geometria não-colinear entre as câmeras (Figura 4). Utilizando-se de experimentos com dados simulados e uma trajetória reta, o autor concluiu que a introdução da terceira câmera permite um melhor controle sobre as observações, de modo a obter coordenadas tridimensionais dos pontos de enlace com maior acurácia.

Figura 4 – Arranjo triangular de câmeras



Devido ao espaço limitado sobre o automóvel para a disposição dos sensores de imageamento e ao fato do levantamento ter sido realizado ao longo de uma via, em sentido transversal à base, a relação base-altura é desfavorável (base pequena, altura grande). Dessa forma, pequenas variações na orientação dos sensores resultam em grandes variações nas coordenadas-objeto.

Ao se utilizar um arranjo formado por duas câmeras, erros inerentes à tomada das imagens são diretamente refletidos ao ponto no espaço objeto. Por haver somente dois raios homólogos por ponto, não é possível detectar erros de orientação das câmeras. Sendo assim, o arranjo com duas câmeras acaba não sendo muito adequado para um SMM. Uma solução a este problema seria a utilização de três câmeras em um arranjo colinear, no entanto, embora aumente a redundância de observações, a determinação da profundidade do ponto continua sendo deficiente. Dessa forma, o arranjo triangular de três câmeras solucionaria o problema da colinearidade, pois um terceiro raio homólogo não coplanar seria obtido para cada ponto, permitindo a detecção de erros de orientação em um dos sensores e conseqüentemente, melhorando a estimativa da profundidade do ponto.

Portanto, para este trabalho foi escolhido estudar a introdução da terceira câmera no SMM, dispostas em um arranjo triangular como sugerido por Blasechi (2016), esta geometria possibilita gerar redundâncias nas observações dos pontos, de modo que para cada ponto haja três raios homólogos, permitindo um ajuste geométrico no processo de interseção dos raios.

2.3 Sistemas de referência

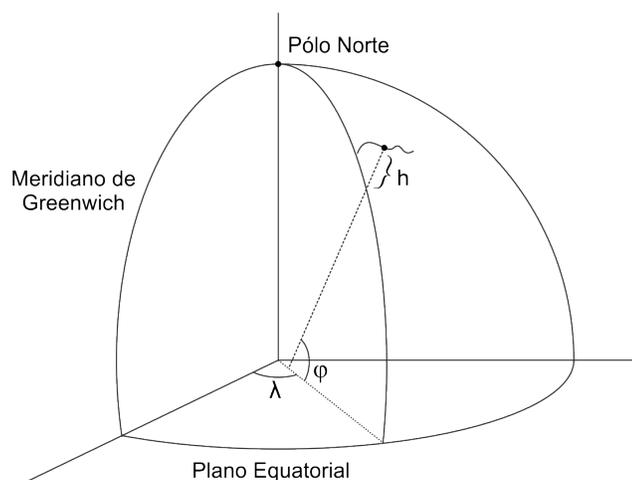
Neste trabalho, foram utilizados seis sistemas de coordenadas, são eles:

- Geodésico geocêntrico (WGS-84);
- Cartesiano geocêntrico (ECEF);
- Cartesiano local (ENU);
- Imagem;
- Fotogramétrico;
- Sensor.

2.3.1 Sistema Geodésico Geocêntrico

O sistema WGS-84 (*World Geodetic System - 1984*) é um sistema geodésico de referência utilizado pelo sistema de posicionamento GPS e tem sua origem no centro de massa da Terra (geocêntrico). As coordenadas de um ponto referentes a esse sistema são dadas em Latitude geodésica (φ), Longitude geodésica (λ) e altitude geométrica (h) (GEMAEL, 1972), como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Coordenadas geodésicas



Fonte: Adaptado de Gemael (1972)

Neste trabalho, as coordenadas obtidas pelo sensor GNSS serão todas referenciadas à esse sistema de referência.

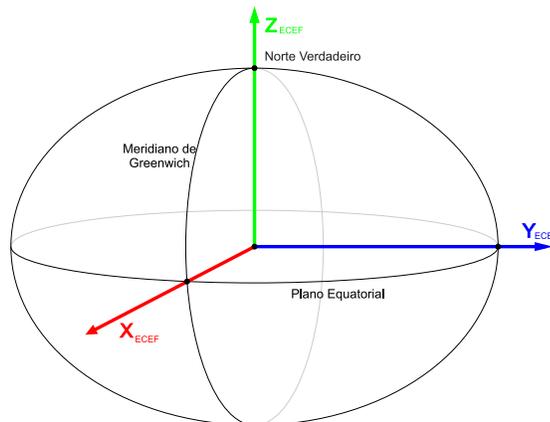
2.3.2 Sistema Cartesiano Geocêntrico

O sistema ECEF (*Earth-centered Earth-fixed*) é um sistema cartesiano geocêntrico e que gira junto com a Terra, por isso o nome "*Earth-centered*" e "*Earth-fixed*". Os eixos desse sistema são definidos por (GEMAEL, 1972):

- Eixo X : pertence ao plano equatorial e aponta para o meridiano de origem (Greenwich);
- Eixo Z : aponta para o norte verdadeiro;
- Eixo Y : perpendicular aos eixos X e Z de modo a tornar o sistema dextrógiro.

As coordenadas referenciadas a esse sistema são dadas por $(X, Y, Z)_{ECEF}$ como mostra a Figura 6. Neste trabalho, esse sistema foi utilizado como sistema intermediário para a transformação de coordenadas geodésicas para coordenadas locais.

Figura 6 – Coordenadas Geocêntricas

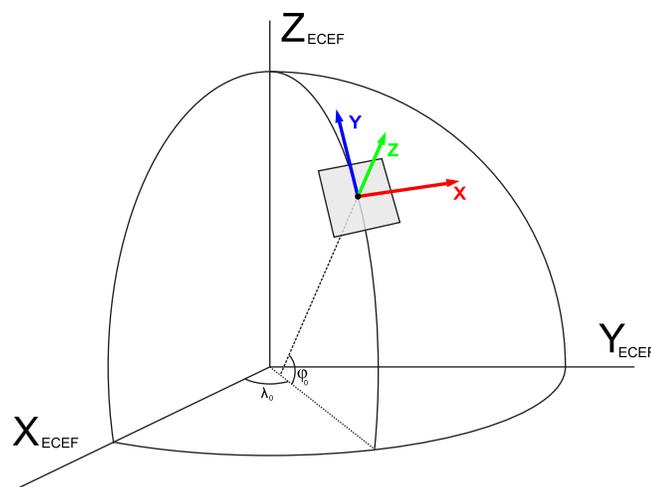


Fonte: Adaptado de Gemael (1972)

2.3.3 Sistema Cartesiano Local

O sistema cartesiano local é um sistema de referência que tem sua origem definida pelo usuário, bem como a orientação de seus eixos cartesianos. A orientação dos eixos utilizada foi seguindo o modelo ENU (*East-North-Up*), em que o eixo X aponta para o leste, o eixo Y aponta para o norte e o eixo Z aponta para o zênite (GEMAEL, 1972). A Figura 7 apresenta um sistema de referência local ENU.

Figura 7 – Coordenadas Cartesianas Locais



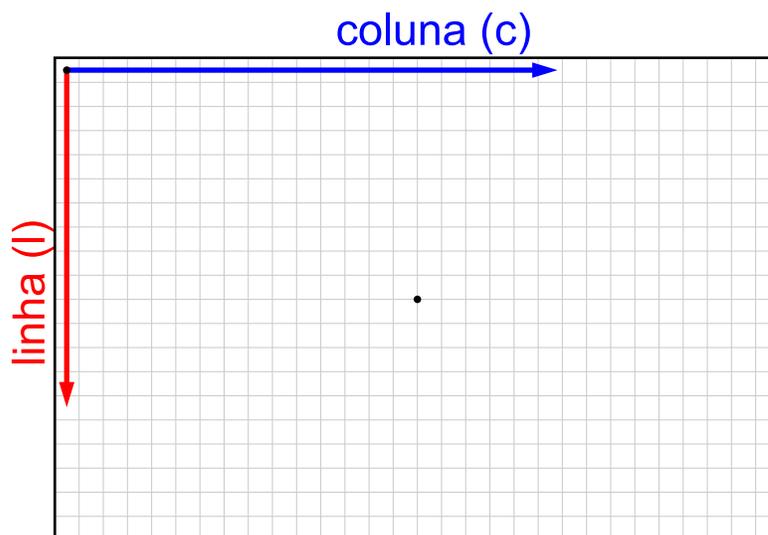
Fonte: Adaptado de Gemael (1972)

Neste trabalho, esse sistema foi utilizado como sistema de mapeamento, ou seja, todos os resultados obtidos foram referenciados à esse sistema de referência.

2.3.4 Sistema Imagem

O sistema imagem está relacionado com o sensor digital da câmera e é composto por uma matriz bidimensional definida por um conjunto de células ou *pixels*. Nesse sistema, as coordenadas de um ponto são dadas em *coluna* e *linha* (c, l) e a origem desse sistema situa-se no canto superior esquerdo da imagem, como mostra a Figura 8 (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Figura 8 – Sistema Imagem



Fonte: Adaptado de Gonzalez e Woods (2009)

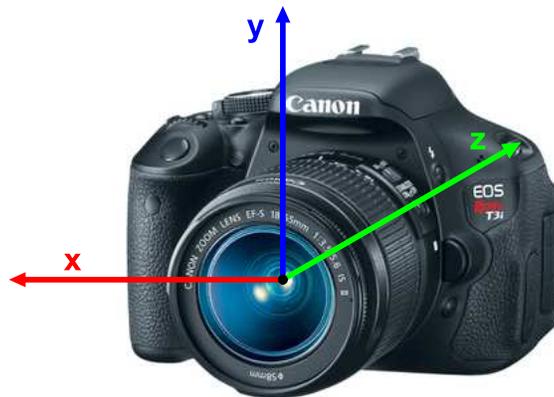
2.3.5 Sistema Fotogramétrico

O sistema fotogramétrico tem sua origem no centro de projeção do sistema de lentes, ou seja, o ponto nodal anterior. Os eixos do sistema fotogramétrico são orientados da seguinte forma: o eixo x encontra-se sobre o plano focal e aponta para a lateral direita da câmera, o eixo y também se encontra sobre o plano focal e aponta para a parte superior da câmera, por fim, o eixo z é coincidente com o eixo óptico da câmera e torna o sistema dextrógiro, isto é, apontando para a parte de trás da câmera. As coordenadas desse sistema são dadas em milímetro (mm). A Figura 9 apresenta o sistema fotogramétrico.

2.3.6 Sistema Sensor

O sistema sensor é o sistema em que estão referenciados os sensores, neste sistema são medidos os elementos de posição relativa (*lever arms*) necessários para o processo de determinação da orientação exterior (ANDRADE, 2003). A origem do sistema foi definida

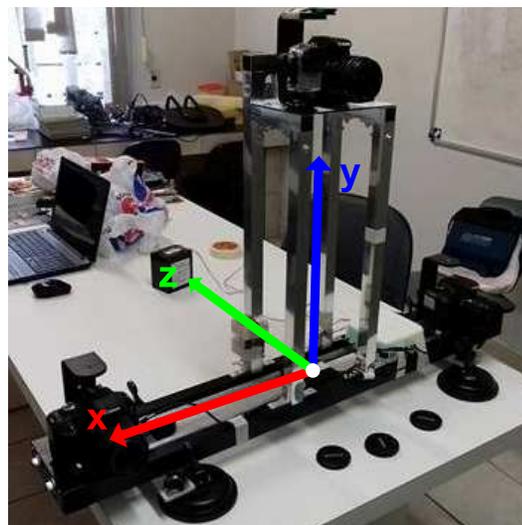
Figura 9 – Sistema Fotogramétrico



Fonte: Adaptado de www.canon.com

na junção do eixo vertical com o eixo horizontal do suporte dos sensores. Os eixos foram definidos de forma a serem paralelos aos eixos do sistema fotogramétrico. Dessa forma, o eixo x aponta para a câmera direita do SMM, o eixo y aponta para a câmera central do SMM e o eixo z aponta para a parte de trás do SMM de forma a tornar o sistema sensor dextrógiro. O sensor inercial foi colocado sobre a origem do sistema, e conseqüentemente, possui *lever arm* nulo. A Figura 10 apresenta o sistema sensor.

Figura 10 – Sistema Sensor



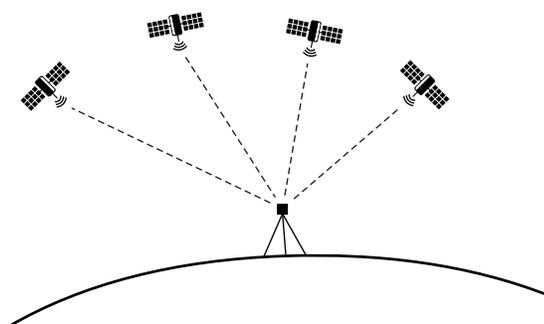
2.4 Posicionamento por GNSS

Segundo Monico (2007), posicionar um objeto é, simplesmente, atribuir coordenadas a este. Embora nos dias de hoje seja uma tarefa muito comum, esta sempre foi umas das preocupações do ser humano (MONICO, 2007). Diversos métodos e instrumentos foram utilizados ao longo do tempo, entre eles: posicionamento por estrelas, bússola, astrolábio e sextante. No entanto, estes métodos e instrumentos não propiciavam valores precisos, deixando uma lacuna a ser resolvida no problema.

Uma solução mais precisa do problema começou a tomar forma na década de 70. Nesta época, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos lançou o sistema que revolucionou as atividades dependentes da determinação da posição, o sistema NAVSTAR-GPS (*Global Positioning System*) (MONICO, 2007). Concomitantemente, na antiga União Soviética (URSS), era lançado o sistema GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*), um sistema semelhante ao NAVSTAR-GPS. Anos depois, foi criado o termo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para este método de posicionamento, por razão deste termo ser mais abrangente.

No sistema GNSS, para se calcular a posição de um ponto é necessário que haja, no mínimo, quatro satélites disponíveis. A posição de cada satélite é conhecida, logo, as distâncias entre os satélites e o ponto podem ser determinadas através de sinais emitidos pelos satélites e captados por um receptor localizado no ponto em questão. Do ponto de vista geométrico, seriam necessários apenas três satélites para se determinar a posição de um ponto, no entanto, devido ao não sincronismo entre os relógios dos satélites e do receptor, é necessário que haja um quarto satélite. A Figura 11 apresenta o princípio de posicionamento pelo GNSS.

Figura 11 – Posicionamento pelo GNSS



Fonte: Adaptado de (MONICO, 2007)

Os receptores GNSS podem ser classificados em duas categorias: tático/estratégico e civil (MONICO, 2007). Os receptores tático/estratégicos são reservados para uso militar, possuem alta acurácia e precisão. Os receptores civis são disponibilizados abertamente

aos usuários, a precisão de um receptor civil varia de acordo com o modelo e a faixa de preço. Neste trabalho foram utilizados receptores de baixo custo, e portanto, de baixa precisão.

2.5 Algoritmo SIFT

O algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) foi apresentado à comunidade científica no artigo *Distinctive Image Feature from Scale-Invariant Keypoints* no *International Journal of Computer Vision* (LOWE, 2004). O algoritmo pode ser basicamente dividido em duas partes, a do detector e a do descritor. O detector é responsável por identificar possíveis pontos de interesse baseado nos cálculos de diferença de Gaussianas (DoG - *Difference of Gaussian*), enquanto que o descritor descreve a vizinhança local dos pontos de interesse utilizando histogramas de gradientes.

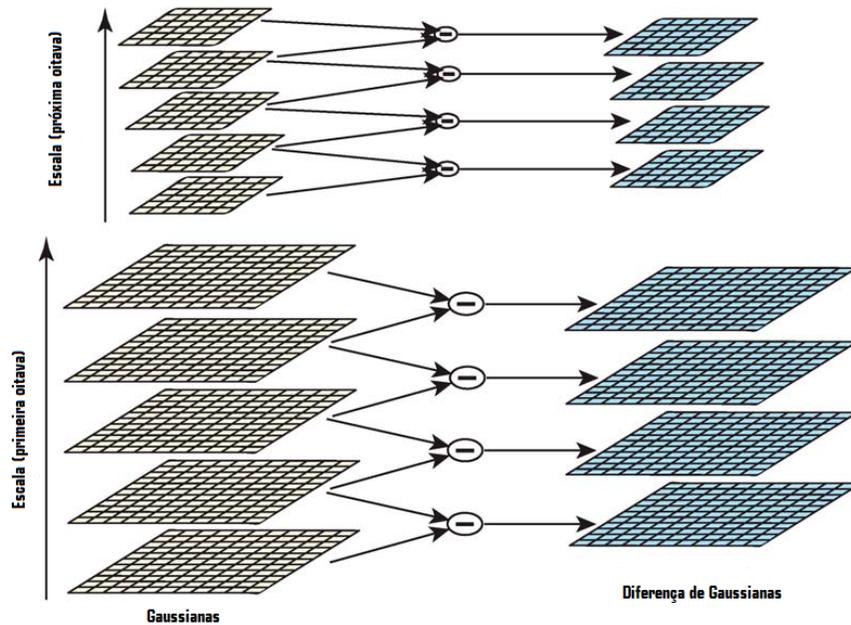
De modo geral, o objetivo do SIFT é obter os vetores descritores de pontos chave, os quais possibilitam realizar a correspondência em um banco de dados de descritores de diversas imagens. Os descritores têm como característica a invariância à translação, escala, rotação, e ser parcialmente invariante à mudança de iluminação e pequenas mudanças de perspectiva. Além disso, os descritores obtidos pelo SIFT são bem definidos no domínio do espaço e da frequência, fazendo com que a probabilidade de má determinação dos descritores devido à oclusão, ruído ou poluição visual da imagem, seja pequena. Rachid e Pereira (2009) destacam que o algoritmo SIFT tem a capacidade de analisar uma imagem e descrevê-la a partir de assinaturas ligadas a pontos chave e que estão relacionadas às posições relativas de cada pixel e sua intensidade de níveis de cinza.

Foi desenvolvido inicialmente para reconhecimento de objetos, porém, hoje, é possível encontrar aplicações em diversas áreas, como a navegação de robôs, modelagem 3D, o reconhecimento de gestos, detecção de objetos em imagem de vídeo, entre outras. A obtenção dos descritores pelo algoritmo SIFT é dado pela sequência de procedimentos listados a seguir (LOWE, 2004):

- A primeira etapa, *detecção de extremos*, é composta por processos de extração de pontos de interesse por diferença de filtros gaussianos em todas as escalas e locais de uma imagem, como apresentado na Figura 12. O espaço escala é definido como uma função de $L(x, y, \sigma)$ produzida pela convolução de uma Gaussiana de escala variável $G(x, y, \sigma)$ e uma imagem $I(x, y)$, de acordo com a Equação 2.1.

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2.1)$$

Figura 12 – Diferença de Gaussianas



Fonte: Adaptado de (LOWE, 2004)

Para a detecção de pontos chaves estáveis, Lowe (2004) propôs o uso dos extremos do espaço escala juntamente com uma função de diferença de gaussianas resultando em $D(x, y, \sigma)$, computada pela diferença entre duas imagens em escalas próximas, separadas por uma constante multiplicadora k , como mostra a Equação 2.2.

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \quad (2.2)$$

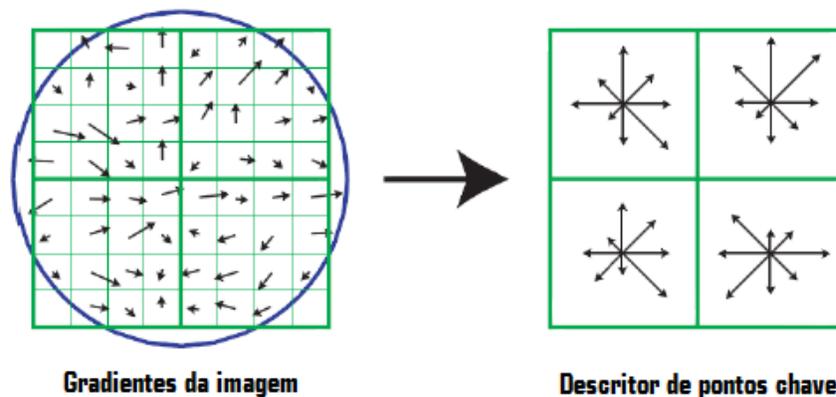
O resultado desta primeira etapa é a identificação de pontos invariantes à escala e rotação. Este é o estágio mais custoso computacionalmente do algoritmo.

- A segunda etapa, *localização de pontos chave*, define a localização dos pontos chave e também descarta os pontos considerados instáveis. Para isso, são calculados os máximos e mínimos locais comparando cada pixel da imagem com seus respectivos 8 pontos vizinhos na mesma imagem e os 9 pontos vizinhos nas imagens diretamente acima e abaixo no espaço escala. Os pontos máximos e mínimos são classificados como pontos de maior estabilidade. Todos os pontos detectados na etapa anterior são candidatos a tornarem-se pontos chave.
- A terceira etapa, *definição de orientação*, atribui para cada ponto chave uma ou mais orientações baseadas na direção dos gradientes. As operações seguintes são

realizadas em dados que foram relativamente transformados em relação à orientação, escala e localização de cada ponto chave, de forma a garantir invariância a estas transformações.

- Na quarta etapa, *descritores dos pontos chave*, os gradientes locais da imagem são medidos na escala selecionada, na região ao redor de cada ponto chave. Estas medidas são então transformadas para uma representação que permite observar níveis significantes de distorção de forma e mudança na iluminação. São então criados histogramas de orientação para compor o vetor descritor de 128 dimensões. A Figura 13 apresenta um exemplo, de dimensões reduzidas, para os gradientes ao redor de um ponto chave (esquerda) e o descritor para o respectivo ponto chave (direita).

Figura 13 – Gradientes e descritor de ponto chave



Fonte: Adaptado de (LOWE, 2004)

Segundo Gonzales (2010), descritores são vetores que contém as características de uma imagem ou regiões da mesma. Em Nunes et al. (2009) é mencionado que o descritor mais simples é um vetor com as intensidades dos pixels de uma determinada imagem e que, também, pode ser a distribuição de intensidades de uma região representada por seu histograma. Os descritores gerados pelo SIFT são então utilizados para o processo de correspondência entre imagens.

2.6 Correspondência dos descritores SIFT

Para realizar a correspondência (*matching*) entre pontos de diferentes imagens, são comparados os vetores descritores de cada ponto com os descritores dos pontos nas demais imagens em busca de encontrar o melhor candidato a ser seu homólogo. Através do método de vizinho mais próximo, é encontrada a melhor correspondência candidata para cada ponto chave, isto é, o melhor candidato da imagem de busca é aquele ponto chave que possua a menor distância euclidiana para o ponto da imagem de referência. Como exemplo, sendo duas imagens I1 e I2, com descritores de pontos chave sendo respectivamente di_1 e di_2 dados por:

$$di_1 = (m_1i_1, m_1i_2, \dots, m_1i_k) \quad (2.3)$$

$$dj_2 = (m_2j_1, m_2j_2, \dots, m_2j_k) \quad (2.4)$$

onde:

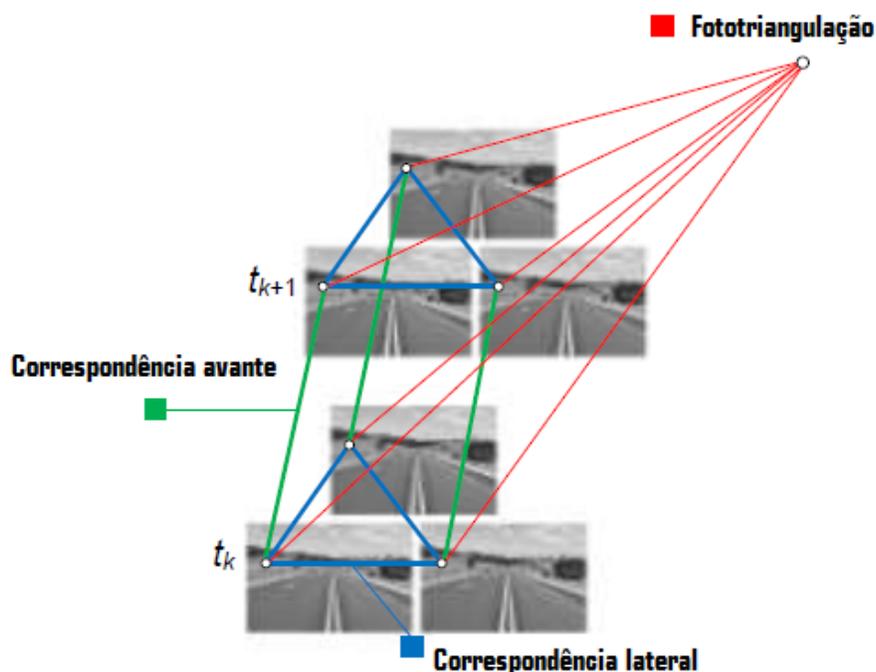
- i e j são os índices para cada descritor de cada imagem;
- m é a magnitude de cada valor dos vetores;
- k é o tamanho de cada descritor.

O melhor candidato é definido pelo descritor dj_2 que possui menor distância euclidiana em relação à di_1 , ou seja, encontrar j para qual i minimize a Equação 2.5 (SILVA, 2012).

$$|di_1 - dj_2| = \sqrt{(m_1i_1 - m_2j_1)^2 + (m_1i_2 - m_2j_2)^2 + \dots + (m_1i_k - m_2j_k)^2} \quad (2.5)$$

Neste trabalho, a correspondência de pontos foi dividida em duas nomenclaturas distintas para efeito de melhor organização e entendimento. A "correspondência lateral" é aquela realizada em imagens tomadas num mesmo instante por câmeras distintas. A "correspondência avante" é realizada em imagens tomadas pela mesma câmera em instantes distintos, ou seja, ao longo do caminhamento fotogramétrico. A Figura 14 ilustra o conceito de correspondência lateral e avante.

Figura 14 – Correspondência lateral e avante



Fonte: Adaptado de (LEMES NETO, 2014)

2.7 Algoritmo RANSAC

O algoritmo RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) é um algoritmo de determinação robusta de modelos, apresentado por Fischler e Bolles (1981). É dito como robusto pois é capaz de obter resultados confiáveis mesmo contendo uma porcentagem significativa (até 50%) de erros grosseiros (*outliers*) nos dados de entrada utilizados. A estimativa é apenas correta com uma certa probabilidade, já que o RANSAC é um estimador randomizado. O algoritmo pode ser aplicado a uma ampla gama de problemas de estimativa de parâmetros, como a correspondência de características, registro ou detecção de primitivas geométricas.

Diferentemente de outros estimadores que utilizam a totalidade do conjunto de dados para obter a solução inicial e depois eliminar os erros grosseiros, o RANSAC usa apenas uma pequena amostra inicial para a determinação da solução, e vai agregando novos valores consistentes com os iniciais. Como passo inicial então, é escolhida uma amostra aleatória a partir do conjunto de dados, de forma que cada ponto tenha a mesma probabilidade de ser escolhido. Para cada amostra, um modelo hipotético é definido através do cálculo de seus parâmetros, usando os dados da amostra inicial. O tamanho da amostra depende do modelo que se deseja encontrar, geralmente, é utilizado o menor tamanho

possível e que seja suficiente para determinar os parâmetros do modelo desejado. Por exemplo, para se determinar uma linha, são necessários apenas 2 pontos. A utilização de um número de dados além do mínimo necessário se torna ineficiente, uma vez que a probabilidade de utilizar dados com erros grosseiros na amostra inicial aumenta (FISCHLER; BOLLES, 1981).

Na sequência, a qualidade do modelo hipotético é avaliada de acordo com uma função custo, e são adicionados à amostra novos dados que sejam consistentes com o modelo, de acordo com uma tolerância pré-estabelecida. Geralmente, o modelo inicial estimado não possui boa precisão, sendo assim, os parâmetros do modelo são recalculados pelo método dos mínimos quadrados com todos os dados da nova amostra. No entanto, o conjunto de dados pode gerar modelos diferentes de acordo com a amostra inicial selecionada. Portanto, o algoritmo é repetido para uma nova amostra inicial, obtida a partir dos pontos que não foram utilizados anteriormente, de modo a garantir que ao menos uma amostra inicial seja composta somente por pontos considerados como corretos ao modelo (*inliers*).

Ainda segundo Fischler e Bolles (1981), para controlar a estimativa do modelo, são utilizados três parâmetros, sendo o primeiro, uma tolerância para definir se um novo ponto está de acordo com o modelo (w). O segundo parâmetro é o número de modelos hipotéticos gerados (k), este valor é dependente da probabilidade de se escolher uma amostra inicial composta somente por *inliers*. Dessa forma, conforme a proporção de *outliers* aumenta em relação ao tamanho da amostra inicial, deve-se aumentar o número mínimo de modelos hipotéticos. Por fim, o terceiro parâmetro (t) é utilizado para descobrir se um modelo correto foi gerado, sendo assim, um modelo é validado se tiver dados suficientes que se enquadrem no modelo gerado.

Neste trabalho, o modelo utilizado é uma transformação projetiva planar entre as imagens, de modo que são necessários estimar os parâmetros da matriz fundamental (homografia) da transformação. Sendo assim, ao se determinar corretamente os parâmetros da transformação, os pontos utilizados como amostra da transformação são classificados como *inliers*. Este processo foi repetido até que não existisse mais *inliers* no conjunto de pontos encontrados pelo SIFT, ou até atingir uma certa quantidade definida a ser descartada.

2.8 Fototriangulação

Uma imagem pode ser considerada como uma composição de raios ópticos que convergem ao centro perspectivo da câmera, com posição e orientação indefinidos no espaço objeto. A fototriangulação por feixe de raios é responsável pela determinação da orientação e posição de cada imagem, utilizando seus respectivos conjunto de raios ópticos (MIKHAIL;

BETHEL; MCGLONE, 2001). Esta técnica tem como objetivo, fornecer simultaneamente os parâmetros de orientação exterior das câmeras e determinar coordenadas tridimensionais de pontos objeto, a partir de fotocoordenadas e de valores aproximados (provenientes dos sensores de navegação e posicionamento, ou então, estimados pela resseção no caso do processamento apenas com imagens) para as incógnitas (parâmetros). Utiliza o modelo matemático baseado na condição de colinearidade que impõe que o ponto no espaço imagem, o centro perspectivo do sensor (câmera) e o correspondente ponto-objeto pertençam a uma mesma reta no espaço, conforme as equações de colinearidade 2.6 e 2.7 (MERCHANT, 1984; MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001):

$$x = x_0 + \Delta x - f \frac{r_{11}(X - X_{cp}) + r_{12}(Y - Y_{cp}) + r_{13}(Z - Z_{cp})}{r_{31}(X - X_{cp}) + r_{32}(Y - Y_{cp}) + r_{33}(Z - Z_{cp})} \quad (2.6)$$

$$y = y_0 + \Delta y - f \frac{r_{21}(X - X_{cp}) + r_{22}(Y - Y_{cp}) + r_{23}(Z - Z_{cp})}{r_{31}(X - X_{cp}) + r_{32}(Y - Y_{cp}) + r_{33}(Z - Z_{cp})} \quad (2.7)$$

em que:

- f : distância focal da câmera;
- r_{ij} : elementos da matriz de rotação passiva entre os sistemas;
- (X, Y, Z) : coordenadas do ponto no espaço objeto;
- (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) : coordenadas do centro perspectivo da câmera no espaço objeto;
- (x, y) : coordenadas no espaço imagem;
- (x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal;
- $(\Delta x, \Delta y)$: nestes parâmetros estão embutidas as correções de erros sistemáticos de distorção radial simétrica, dada em função das fotocoordenadas do ponto e dos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 ; de distorção descentrada, dada em função das fotocoordenadas e dos parâmetros p_1 e p_2 ; e da não ortogonalidade entre os eixos.¹

O ajustamento das observações foi realizado pelo Método dos Mínimos Quadrados, na forma paramétrica com ponderação generalizada dos parâmetros (GEMAEL, 1994; SILVA, 1987). Devido ao modelo funcional ser não-linear, foi necessário fornecer valores iniciais

¹ Os modelos de correção das distorções podem ser encontrados em Merchant (1984).

aproximados aos parâmetros que foram ajustados. Desta forma, o modelo funcional pode ser apresentado como:

$$L_a = F(X_a) \quad (2.8)$$

$$G(X_a) = 0 \quad (2.9)$$

$$V = A.X + L \quad (2.10)$$

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_L \quad (2.11)$$

$$V_i = C + L_i \quad (2.12)$$

$$P_i = \sigma_0^2 \Sigma_{L_i} \quad (2.13)$$

$$X = -(A^t P A + C^t P_i C)^{-1} \cdot (A^t P L + C^t P_i L_i) \quad (2.14)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (2.15)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^t P V + V_i^t P_i V_i}{n - u + c} \quad (2.16)$$

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 (A^t P A + C^t P_i C)^{-1} \quad (2.17)$$

em que:

L : vetor de observações;

L_i : vetor de injunções;

L_a : vetor de observações ajustadas;

X : vetor dos parâmetros;

X_a : vetor dos parâmetros ajustados;

A : matriz design do modelo funcional;

C : matriz design das equações de injunção;

V : vetor de resíduos das observações;

V_i : vetor de resíduos das injunções;

$F(X_a)$: modelo funcional (equações de colinearidade);

$G(X_a)$: equações de injunção;

σ_0^2 : fator de variância *a priori*;

$\hat{\sigma}_0^2$: fator de variância *a posteriori*;

Σ_L : matriz de covariância das observações;

Σ_X : matriz de covariância dos parâmetros;

Σ_{L_i} : matriz de covariância das injunções;

P : matriz peso das observações;

P_i : matriz peso das injunções.

A introdução de injunções foi realizada a partir da ponderação de todos os parâmetros (ponderação generalizada) seguindo a regra de que parâmetros com maior confiabilidade em relação aos demais, recebem pesos maiores. Analogamente, para os parâmetros com menor confiabilidade foram atribuídos pesos de menor valor.

2.9 Calibração de câmeras

Segundo Andrade (2003), para que seja possível garantir a confiabilidade e a exatidão em processos fotogramétricos, é fundamental que se conheça os parâmetros necessários para reconstruir o feixe perspectivo que gerou a imagem fotográfica, no instante de exposição do sensor fotográfico à luz refletida no objeto fotografado. Os parâmetros de orientação interior, ou parâmetros intrínsecos, são responsáveis por definir as características internas da câmera e permitir a reconstrução analítica dos feixes de raios, e podem ser calculados por meio de diversos métodos de calibração de câmeras.

Dentre os métodos existentes, estes podem ser divididos em dois grupos: métodos de laboratório e de campo. Geralmente, os métodos de laboratório são de difícil implementação, necessitam de equipamentos específicos e um ambiente muito controlado, dessa forma, esses métodos são mais utilizados por empresas especializadas ou os próprios fabricantes das câmeras e lentes. Como exemplo de métodos de laboratório tem-se o método do Multicolimador e o método do Goniômetro (ANDRADE, 2003).

Os métodos de campo, são utilizados com mais frequência pela comunidade fotogramétrica, muito devido à sua facilidade de implementação e aos avanços na área de automação de alguns processos, tais como a identificação de alvos e a medição de suas coordenadas no espaço imagem. De maneira geral, os métodos de campo oferecem soluções mais completas, permitindo a determinação de todos os parâmetros no processo de calibração (ANDRADE, 2003). Além disso, estes métodos possibilitam uma superabundância de observações, tornando possível um rigoroso controle estatístico do processo. Como exemplo de métodos de campo tem-se o método dos Campos Mistos e o das Câmeras Convergentes, este último foi o método utilizado neste trabalho.

2.9.1 Método das Câmeras Convergentes

O método das Câmeras Convergentes é um método robusto na discriminação dos parâmetros recuperados. Segundo Andrade (2003), embora seja de difícil adequação prática para uso em aerofotogrametria, para o caso terrestre a sua utilização pode ser considerada relativamente simples. Este método consiste em obter imagens convergentes, sendo uma das imagens com rotação em torno do eixo z da câmera (em 90°), a fim de distinguir os coeficientes da distorção radial simétrica dos coeficientes da distorção descentrada. Dessa forma, são necessárias, no mínimo, três imagens, sendo duas delas convergentes, e a terceira rotacionada em torno do eixo z .

O modelo matemático utilizado são as equações de colinearidade (equações 2.6 e 2.7), com a adição dos modelos paramétricos (linearizados) dos efeitos das distorções radial simétrica, descentrada e da afinidade. Dessa forma, as equações podem ser reescritas como (FRYER, 1996):

$$x = x_0 - \Delta k_x - \Delta p_x - \Delta a_x - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.18)$$

$$y = y_0 - \Delta k_y - \Delta p_y - \Delta a_y - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.19)$$

em que:

- f : distância focal da câmera;
- r_{ij} : elementos da matriz de rotação passiva entre os sistemas;
- (X, Y, Z) : coordenadas do ponto no espaço objeto;

- (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) : coordenadas do centro perspectivo da câmera no espaço objeto;
- (x, y) : coordenadas no espaço imagem;
- (x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal;
- Δk : deslocamento causado pela distorção radial simétrica nas direções x e y ;
- Δp : deslocamento causado pela distorção descentrada nas direções x e y ;
- Δa : deslocamento causado pela afinidade nas direções x e y .

A distorção radial simétrica tem como efeito o deslocamento radial de um ponto na imagem com relação a sua posição correta. A distorção é causada pela refração sofrida pelo raio de luz ao atravessar o sistema óptico, ocasionando uma mudança no ângulo entre o raio de luz e o eixo óptico (FRYER, 1996; WOLF; DEWITT, 2000).

A distorção descentrada é o efeito de deslocar a posição de um ponto na imagem causada pela impossibilidade de alinhar os eixos ópticos das lentes que compõem o sistema de lentes (ANDRADE, 2003).

Por fim, os parâmetros de afinidade são responsáveis por modelar a diferença de escala e a não ortogonalidade entre os eixos x e y do sistema de coordenadas (HABIB; MORGAN, 2003).

3 Metodologia

Nesta seção são descritas as etapas do trabalho realizado, ordenadas de forma a trilhar o caminho metodológico para a construção da solução proposta.

3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a implementação dos algoritmos, montagem do sistema, testes e desenvolvimento em geral do trabalho são:

- Três câmeras digitais (modelo Canon EOS Rebel T3i);
 - Distância focal nominal: 35 mm
 - Sensor CMOS de 22,3 x 14,9 mm
- Um receptor GNSS/GPS Ublox NEO-M8N (baixo custo);
- Um sensor inercial IMU/MEMS SparkFun 9 DOF (baixo custo);
- Uma placa de prototipagem eletrônica Arduino (versão Uno);
- Um módulo relé eletromecânico de 4 saídas;
- Um módulo regulador de voltagem DC-DC 5a;
- 4 cartões de memória SD (64 Gb);
- Um módulo de cartão SD Card;
- Suporte de alumínio, para a montagem do sistema;
- Receptor GNSS geodésico (Topcon GNSS Hiper SR);
- Estação Total Robótica Topcon IS – 203.

Os sensores e a placa Arduino foram fixados sobre uma estrutura de suporte colocada em um veículo da frota da FCT/Unesp para os testes de rua.

Todo o desenvolvimento computacional, desde os algoritmos de sincronização dos sensores, captura e armazenamento dos dados, filtragem dos dados e pós-processamento, aqui descritos, foram implementados nas linguagens de programação C++/C#.

Os processos da pesquisa foram, em sua maior parte, desenvolvidos no Laboratório de Mapeamento Móvel da FCT/Unesp (LaMMov).

3.2 Montagem do sistema

A montagem do sistema de mapeamento móvel foi realizada no Laboratório de Mapeamento Móvel (LaMMov), nas dependências da FCT/Unesp. Nesta etapa, as câmeras foram fixadas em uma estrutura de alumínio, com uma base de 82,9 centímetros entre as câmeras laterais e 50 centímetros de altura para a câmera central superior.

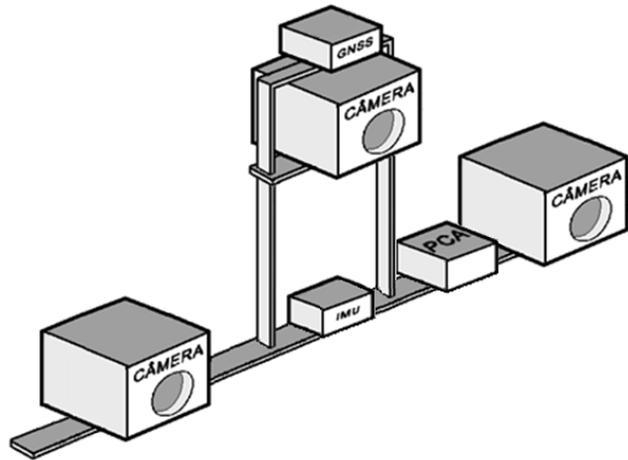
Para garantir o sincronismo dos disparos das câmeras, a PCA foi conectada à um relé eletromecânico. A PCA ao emitir um sinal eletrônico para o relé, este o subdivide em três novos sinais e os redireciona para cada câmera. Os sensores de posição e navegação também foram conectados à PCA, de forma que ao enviar o sinal para as câmeras dispararem, eram coletadas as informações de posição e atitude do sistema para aquele instante e armazenados no cartão de memória.

A PCA foi colocada no interior de um invólucro plástico, por motivo de proteção. O sensor GNSS foi colocado na parte superior do equipamento, para que não sofresse interferência na captação de sinal e o sensor inercial foi fixado na base do suporte. Por fim, a estrutura foi fixada na parte superior do veículo. A Figura 15 apresenta o sistema montado ainda no laboratório e o sistema montado no veículo e a Figura 16 apresenta um croqui da composição deste sistema.

Figura 15 – Sistema de mapeamento móvel finalizado

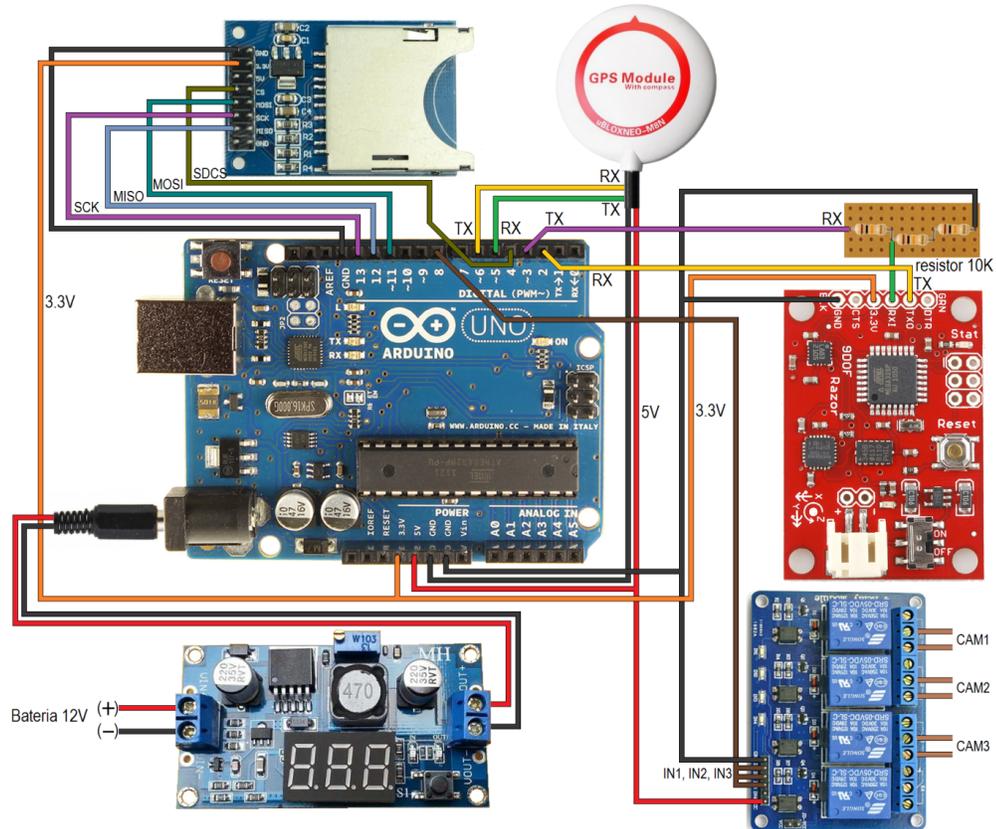


Figura 16 – Croqui da composição do SMM



Na Figura 17 é apresentado o esquema de ligação do Arduino (PCA controladora) com os dispositivos utilizados na montagem do sistema de obtenção de dados do SMM.

Figura 17 – Diagrama de ligação dos componentes eletrônicos



3.3 Calibração das câmeras

A calibração das câmeras do SMM foi realizada no campo de calibração 3D instalado pelo grupo de pesquisa em Fotogrametria da FCT-UNESP, em 2013, no terraço do prédio da central de laboratórios do Departamento de Cartografia. Este campo é formado por 139 alvos (quadrados) com dimensões de 35 x 35 cm, codificados internamente no padrão ArUco. A localização e identificação dos alvos é realizada automaticamente pelo programa desenvolvido também pelo grupo de pesquisa e fornece coordenadas no espaço imagem com precisão subpixel. Para detalhes sobre o campo de calibração e o software de localização automática, consultar Silva, Tommaselli e Artero (2014). O campo de calibração 3D pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Campo de calibração 3D - FCT/Unesp



Para se realizar o processo de calibração e a estimativa dos parâmetros de orientação interior foram tomadas 12 imagens para cada câmera. Essas 12 imagens foram tomadas de três estações distintas, separadas entre si por 3 m ao longo do eixo x , sendo que em cada estação as câmeras foram rotacionadas em relação ao eixo y em -45° , 0° e 45° . Além disso, pra cada estação foram tomadas 4 imagens, sendo elas rotacionadas 0° , -90° , 180° , 90° , em torno do eixo z (sentido anti-horário) como mostra a Figura 19. Este procedimento é adotado no intuito de minimizar a dependência linear entre alguns parâmetros de OI e OE além de garantir uma melhor geometria para o bloco.

Figura 19 – Rotação das imagens em torno do eixo z 

O processo de calibração foi realizado no software CMC (Calibração com Múltiplas Câmaras), desenvolvido pelo grupo de Pesquisa em Fotogrametria/Unesp, em linguagem C/C++ e possui modelos de calibração para câmeras perspectivas convencionais e câmeras com lentes "olho de peixe", com estimação pelo Método dos Mínimos Quadrados, modelo combinado. Além disso, permite a calibração com injunções de estabilidade da orientação relativa (RUY et al., 2007).

Como modelo para a correção das distorções radial simétrica e descentrada foi utilizado o modelo de Conrady-Brown (BROWN, 1971; FRYER, 1996; WOLF; DEWITT, 2000). Pelo fato dos parâmetros de afinidade exercerem pouca influência na correção das coordenadas fotogramétricas, isto é, variação de baixa magnitude, estes parâmetros foram desconsiderados neste trabalho.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de orientação interior obtidos para cada uma das câmeras:

Tabela 1 – POI das câmeras obtidos na calibração

	Câmera Esquerda	Câmera Direita	Câmera Centro
$f(\text{mm})$	$34,483 \pm 0,006$	$34,792 \pm 0,006$	$34,285 \pm 0,008$
$x_0(\text{mm})$	$0,461 \pm 0,007$	$0,135 \pm 0,006$	$0,242 \pm 0,008$
$y_0(\text{mm})$	$-0,233 \pm 0,005$	$-0,197 \pm 0,004$	$-0,483 \pm 0,005$
$k_1(\text{mm}^{-2})$	$-3,396 \times 10^{-5} \pm 0,215$	$-3,270 \times 10^{-5} \pm 0,196$	$-3,297 \times 10^{-5} \pm 0,247$
$k_2(\text{mm}^{-4})$	$1,308 \times 10^{-7} \pm 0,325$	$1,591 \times 10^{-7} \pm 0,272$	$1,063 \times 10^{-7} \pm 0,356$
$k_3(\text{mm}^{-6})$	$0,053 \times 10^{-9} \pm 0,149$	$-0,133 \times 10^{-9} \pm 0,116$	$0,215 \times 10^{-9} \pm 0,156$
$p_1(\text{mm}^{-1})$	$7,601 \times 10^{-5} \pm 0,219$	$5,532 \times 10^{-5} \pm 0,205$	$4,026 \times 10^{-5} \pm 0,237$
$p_2(\text{mm}^{-1})$	$-6,196 \times 10^{-5} \pm 0,160$	$-0,006 \times 10^{-5} \pm 0,149$	$-15,587 \times 10^{-5} \pm 0,173$

3.4 Levantamento de campo

Blasechi (2016) e Lemes Neto (2014) realizaram experimentos em trajetória retilínea a fim de se ter um ambiente de estudo com maior controlabilidade, e conseqüentemente, melhor entendimento sobre os resultados obtidos. O desafio neste trabalho foi aplicar o método de caminhamento fotogramétrico em uma trajetória curva e analisar o seu comportamento. Dessa forma, o levantamento foi realizado no entorno de uma quadra, na cidade de Presidente Prudente.

Além da trajetória curva, foi analisada a influência da terceira câmera, na prática, e a contribuição dos sensores de navegação e posição na tentativa de controlar a propagação de erros ao longo do caminhamento fotogramétrico.

O levantamento de campo foi realizado no bairro Residencial Parque dos Girassóis, em 14 de fevereiro de 2017. A área de estudo escolhida é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Área de estudo

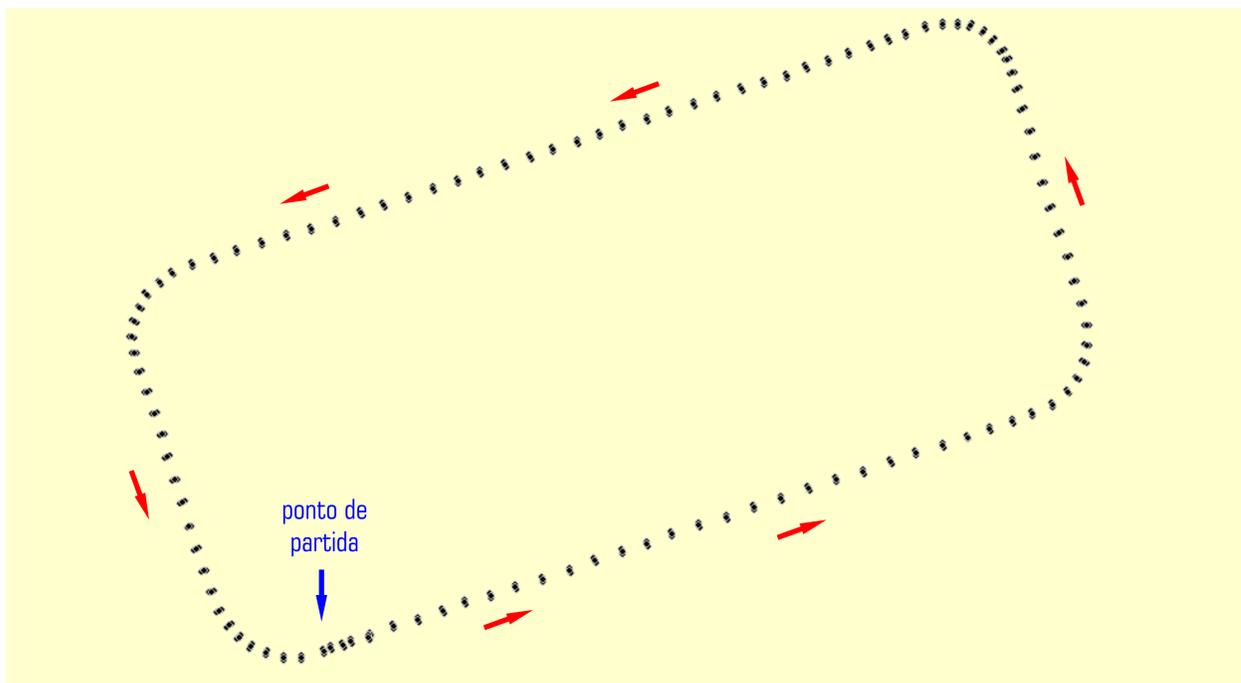


Fonte: Modificado de Google Earth.

Durante o levantamento, o veículo se deslocou a uma velocidade média de 5 m/s (18 km/h) e a tomada das imagens ocorreu a cada 1 s, dessa forma, foi tomada em média 1 imagem a cada 5 m percorridos. Nos trechos em curva, a velocidade de deslocamento do veículo foi reduzida, e assim obteve-se um espaçamento menor entre as imagens,

tendo em vista que o intervalo de tempo entre as exposições não variou. Ao todo foram tomadas 114 imagens por câmera, totalizando 342 imagens para o sistema todo. A Figura 21 apresenta as posições das câmeras no momento da tomada das imagens.

Figura 21 – Posições das câmeras nos instantes de exposição



Após alguns testes preliminares realizados com imagens no algoritmo de *matching* (tema da Seção 3.5.1), ficou escolhido o tamanho da imagem como 3456 x 2403 pixels (8 megapixels) por obter o melhor resultado na identificação de pontos homólogos em comparação com imagens de menor resolução. Embora a câmera permitisse a tomada de imagens de 16 megapixels, esse aumento de resolução não era significativo no resultado do *matching*, como o aumento da resolução implica no aumento do tamanho de armazenamento de cada imagem e no tempo de processamento do bloco, a utilização de imagens de 16 megapixels ao invés de 8 megapixels não se justificou.

Para a obtenção da posição do SMM foi utilizado o receptor GNSS Ublox NEO-M8N, com precisão posicional de 2 m. Pelo fato de ter sido utilizado apenas 1 sensor GNSS, foi preciso realizar a transformação dos dados obtidos pelo sensor para cada uma das câmeras, essa transformação será descrita na seção 3.5.2.

Por fim, foi utilizado um sensor inercial SparkFun de 9 DoF (giroscópio 3 eixos, acelerômetro 3 eixos 13 bits de resolução, magnetômetro digital 3 eixos) para a medição dos parâmetros de atitude do SMM. No entanto, ao ser feita uma análise dos dados coletados, percebeu-se que os dados provenientes do sensor inercial eram incoerentes com a

verdade de campo. Foram realizadas inúmeras tentativas de calibração deste sensor a fim de minimizar os erros em sua medição, porém, o sensor se mostrou muito sensível ao campo magnético gerado pelo demais sensores e pelo SMM em si. Por fim, optou-se por não utilizar os dados provenientes do sensor inercial.

Uma vez que a atitude do SMM não pode ser medida, os parâmetros $(\omega, \varphi, \kappa)$ tiveram que ser estimados com base na posição estimada pelo sensor GNSS, os modelos matemáticos utilizados estão descritos na Seção 3.5.2.

3.4.1 Levantamento dos pontos de verificação

Para se realizar o controle de qualidade do método utilizado, foi preciso obter coordenadas de alguns pontos no espaço objeto por um método de alta precisão. Dessa forma, foi realizado um levantamento topográfico na área de estudo e foram coletados 67 pontos de verificação distribuídos ao longo de toda a área.

O levantamento topográfico foi realizado a partir do rastreamento de dois pontos (E1 e E2) intervisíveis com um receptor GNSS Hiper SR geodésico pelo método relativo estático rápido. As respectivas coordenadas geodésicas foram calculadas e transformadas para o sistema ECEF no software TBC (*Trimble Business Center*) e são apresentadas na Tabela 2. Estes pontos serviram como estação de partida e chegada da poligonal.

Tabela 2 – Coordenadas ECEF das estações de partida

	E1		E2	
	Coordenada	Desvio	Coordenada	Desvio
X (m)	3685701,792	0,018	3685718,608	0,019
Y (m)	-4621764,426	0,017	-4621714,183	0,031
Z (m)	-2388030,457	0,014	-2388087,437	0,016

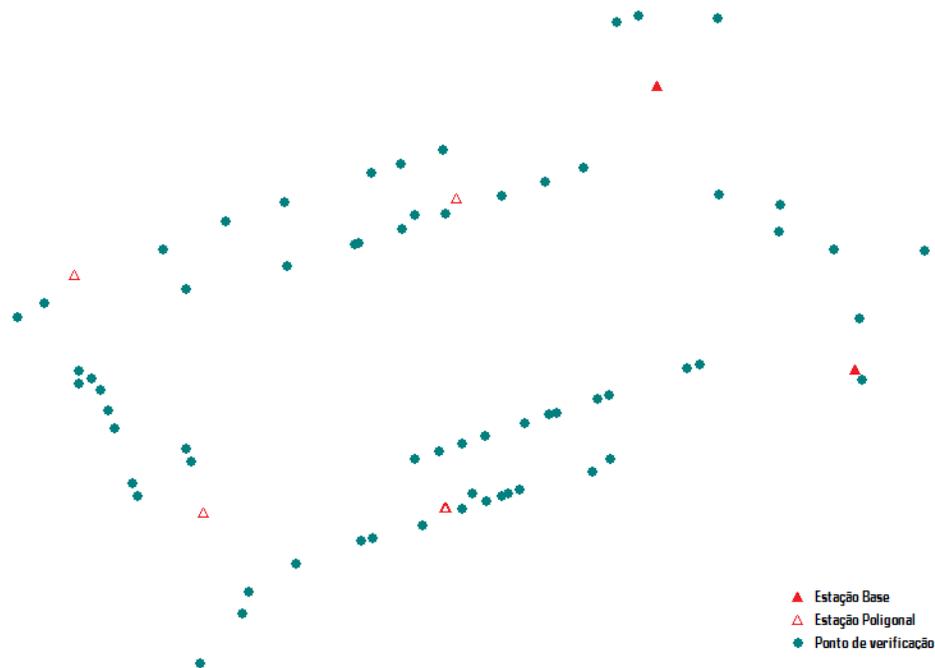
As coordenadas ECEF dos pontos E1 e E2 foram então convertidas para o sistema local (Equação 3.12), as respectivas coordenadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Coordenada local das estações de partida

	E1	E2
X (m)	122,100	166,572
Y (m)	125,517	61,886
Z (m)	38,398	33,189

A partir destes pontos, foram calculados os respectivos azimutes de partida e de chegada, que serviram para o controle do fechamento angular da poligonal. Ao todo, foram utilizadas seis estações poligonais. O equipamento utilizado para a coleta foi uma estação total robótica da marca Topcon, modelo IS (Image Station) 203 com desvio padrão angular de 3" (três segundos de arco) e linear de 2mm + 2ppm*D. Os 67 pontos foram escolhidos de modo que todos fossem fotointerferíveis em pelo menos duas bases sequentes (6 imagens), e então irradiados a partir das seis estações poligonais. As coordenadas para cada ponto foram calculadas no software Topcon Link. A Figura 22 apresenta a distribuição dos pontos de verificação coletados.

Figura 22 – Distribuição dos pontos de verificação



O controle de qualidade do caminhamento fotogramétrico foi realizado comparando-se as coordenadas calculadas dos pontos de verificação com as coordenadas obtidas pelo levantamento de campo. Como forma de análise, foi utilizada a raiz do erro médio quadrático (REMQ), que foi calculado de acordo com a Equação 3.1, em que X representa qualquer coordenada planimétrica ou altimétrica e n é o número de pontos de verificação utilizados.

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{calculado} - X_{real})^2}{n}} \quad (3.1)$$

3.5 Processamento dos dados

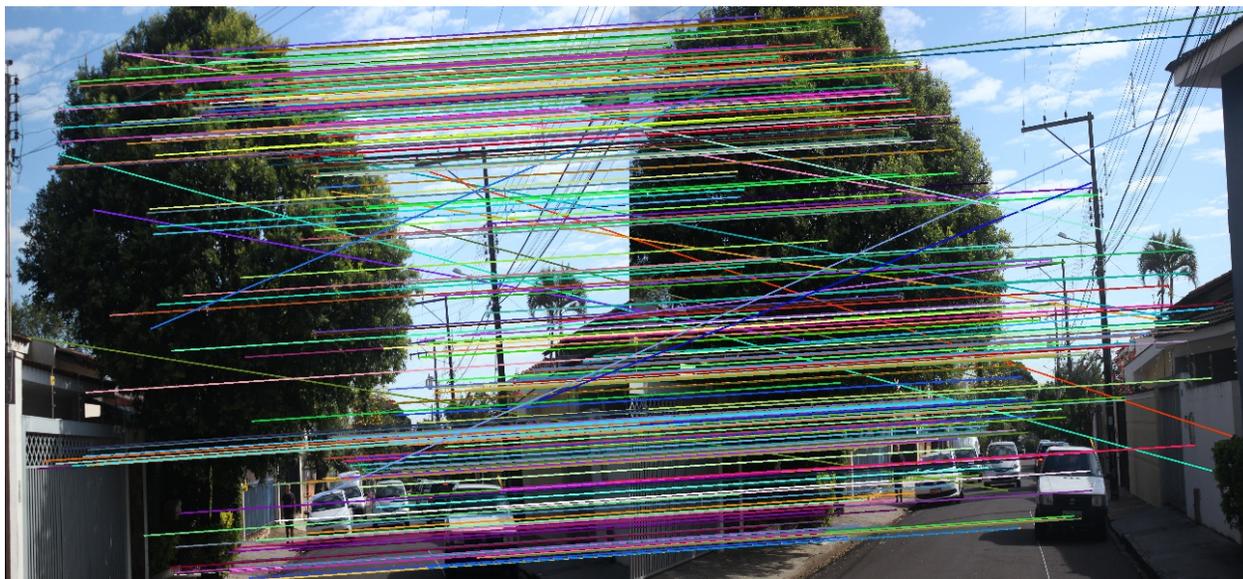
Após realizada toda a coleta de dados pelo SMM, deu-se início ao processamento dos dados obtidos visando organizá-los para o processo de fototriangulação. O primeiro passo foi a identificação de pontos homólogos entre as imagens, para isso, primeiramente foram utilizados os algoritmos SIFT e RANSAC nas imagens obtidas.

3.5.1 Aplicação do algoritmo SIFT e RANSAC nas imagens

O algoritmo SIFT foi utilizado neste trabalho para detectar pontos chave candidatos ao processo de correspondência entre as imagens. Para cada ponto chave foi gerado um vetor descritor de 128 dimensões. Os descritores de cada ponto de uma imagem foram comparados com os descritores de uma segunda imagem pelo método do vizinho mais próximo, para isso calculou-se a distância euclidiana entre os descritores e foi atribuído como ponto correspondente àquele candidato que minimizou a função.

Primeiramente, foi realizada a correspondência entre a imagem da câmera da esquerda com a imagem da direita, em seguida, a correspondência de cada uma delas com a imagem do centro, processo doravante chamado de correspondência lateral. A Figura 23 mostra um exemplo de correspondência lateral.

Figura 23 – Exemplo de correspondência lateral



No entanto, parte das correspondências encontradas não condizem com a verdade de campo, são as chamadas falsas correspondências (*outliers*). Como forma de eliminar as falsas correspondências grosseiras, foi implementado um controle levando-se em

consideração a inclinação da reta formada pela ligação dos pontos homólogos, quando colocadas as imagens lado a lado. Este controle foi realizado estipulando-se um limiar angular com relação à média das inclinações de todas as retas de um par de imagens, de forma que as retas que possuíam inclinação fora do intervalo definido pelo limiar foram classificadas como falsas correspondências grosseiras. As equações que descrevem o controle realizado são:

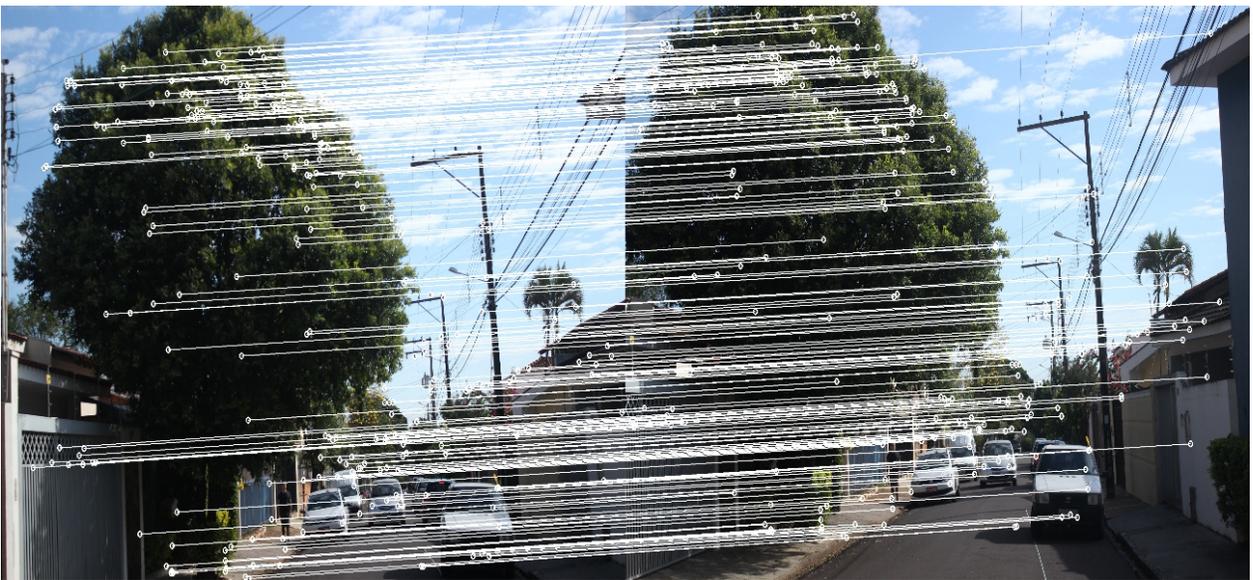
$$I = \arctg\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (3.2)$$

$$m_I - L \leq I_{aceitável} \leq m_I + L \quad (3.3)$$

Sendo, I a inclinação da reta, m_I a média das inclinações, L o limiar de aceitação e (x_1, y_1, x_2, y_2) as coordenadas dos pontos nas imagens.

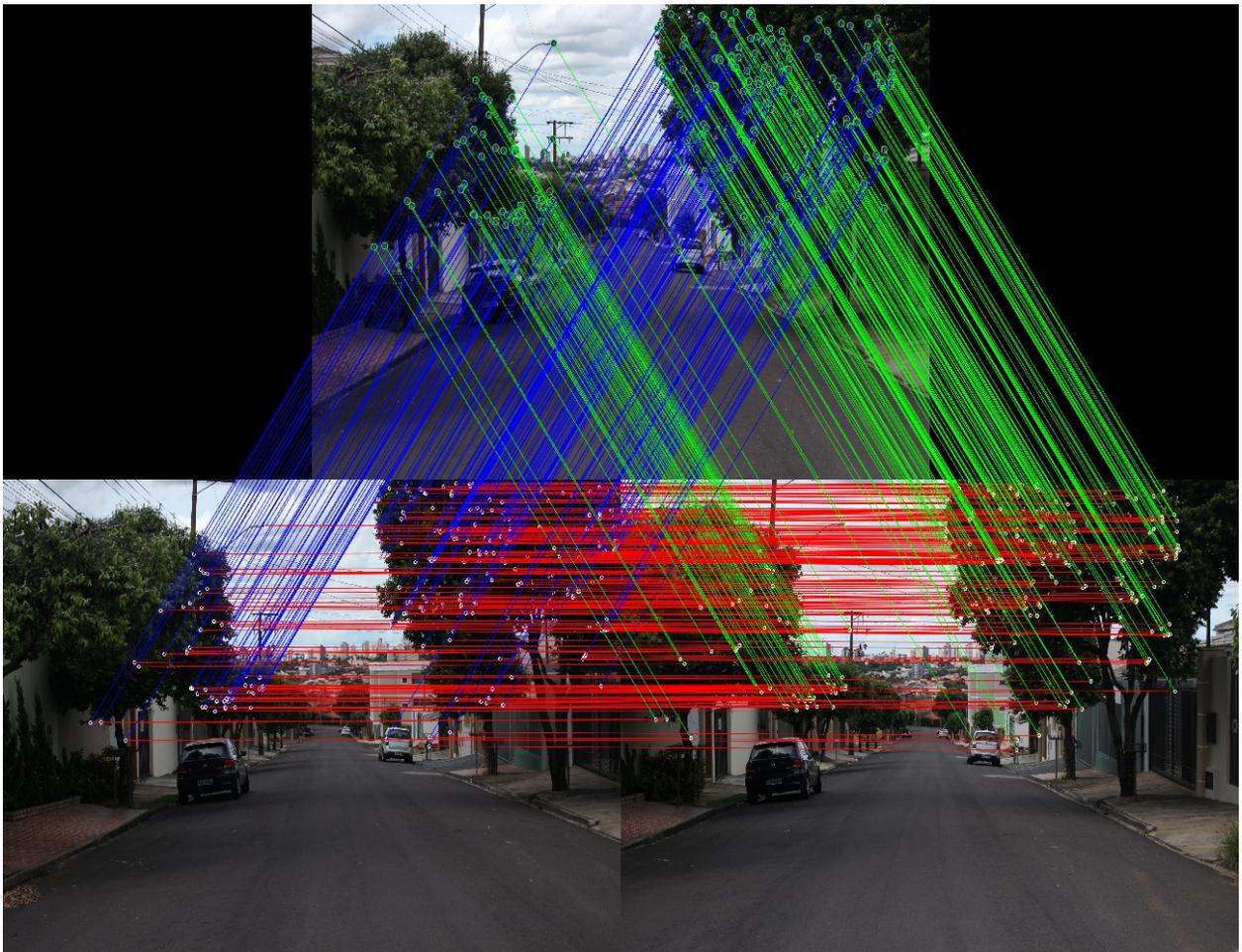
O limiar escolhido foi de $0,5^\circ$ para correspondência Esquerda x Direita e $1,7^\circ$ para correspondência Esquerda/Direita x Centro. Estes valores foram escolhidos de forma empírica após análise da variação máxima da inclinação de um grupo de retas formadas por pontos correspondentes julgados como correspondência verdadeira (*inliers*) pelo observador. Vale ressaltar que este valor pode variar dependendo da disposição dos sensores no SMM. Após a inserção do controle de retas, obteve-se o resultado apresentado na Figura 24. Pela imagem é possível perceber que as falsas correspondências grosseiras foram eliminadas.

Figura 24 – Correspondências após a aplicação do controle por retas



Eliminadas as correspondências grosseiras, fez-se necessário o uso do algoritmo RANSAC para separar as correspondências verdadeiras das falsas correspondências restantes. Após a aplicação do RANSAC, foram descartados também os demais pontos que pertencessem a apenas um par de imagens, sendo assim, ao final desta etapa restaram apenas os *inliers* pertencentes às três imagens. Este processo foi repetido para as 114 bases do levantamento. A Figura 25 apresenta um exemplo de correspondência entre pontos em 3 imagens de uma mesma base.

Figura 25 – Correspondências no trio de imagens



Pelo fato desta etapa visar detectar pontos de enlace para o processo de fototriangulação, era necessário que os pontos encontrados pertencessem a mais de uma base, ou seja, a dois trios de imagens, pelo menos, preferencialmente consecutivos (para que haja o caminhamento fotogramétrico). Portanto, foi feita a correspondência entre imagens de uma mesma câmera em instantes diferentes, isto é, foi comparada a imagem da câmera da esquerda na primeira exposição com a imagem da câmera da esquerda na segunda

exposição, repetiu-se analogamente para a câmera da direita e central. Este processo de correspondência entre imagens de uma mesma câmera tomadas em instantes distintos é chamado de correspondência avante. A correspondência avante foi realizada entre imagens tomadas nos instantes t_n , t_{n+1} e t_{n+2} . A correspondência avante limitou-se a apenas três instantes consecutivos devido à significativa variação da cena imageada. Quando comparadas duas exposições distantes espacialmente entre si, resultou-se em pouquíssimas ou nenhuma correspondência. A Figura 26 apresenta um exemplo de correspondência avante.

Figura 26 – Exemplo de correspondência avante (Esq. x Esq.+1)



Sumarizando os passos da aplicação dos algoritmos SIFT, correspondência e RANSAC tem-se:

- Aplicação do SIFT em todas as 342 imagens para identificar pontos chave candidatos;
- Cálculo da correspondência entre os pontos chave das imagens Esquerda x Direita, execução do controle de retas e RANSAC para eliminar os outliers;
- Cálculo da correspondência entre os pontos chave das imagens Esquerda x Centro, execução do controle de retas e RANSAC para eliminar os outliers;
- Cálculo da correspondência entre os pontos chave das imagens Direita x Centro, execução do controle de retas e RANSAC para eliminar os outliers;
- Eliminação dos pontos que não pertençam a todos os três pares (Esq. x Dir., Esq. x Cent. e Dir. x Cent.);
- Cálculo da correspondência, execução do controle de retas e RANSAC para as imagens Esquerda x Esquerda+1;

- Cálculo da correspondência, execução do controle de retas e RANSAC para as imagens Direita x Direita+1;
- Cálculo da correspondência, execução do controle de retas e RANSAC para as imagens Centro x Centro+1;
- Manutenção dos pontos que pertençam a todos os três pares (Esq. x Esq.+1, Dir. x Dir.+1 e Cent. x Cent.+1);
- Cálculo da correspondência, execução do controle de retas e RANSAC para as imagens Esquerda x Esquerda+2;
- Cálculo da correspondência, execução do controle de retas e RANSAC para as imagens Direita x Direita+2;
- Cálculo da correspondência, execução do controle de retas e RANSAC para as imagens Centro x Centro+2;
- Manutenção dos pontos que pertençam a todos os três pares (Esq. x Esq.+2, Dir. x Dir.+2 e Cent. x Cent.+2);

Portanto, ao final desta etapa restaram apenas pontos que fossem homólogos em, pelo menos 6 imagens, sendo que em alguns casos ocorreu de os pontos estarem presentes em 9 imagens. No total, foram extraídos 5773 pontos e geradas 40567 observações.

O algoritmo SIFT foi programado na linguagem C++ e operou diretamente na GPU (NVIDIA GeForce 820M) do computador, de modo a otimizar o tempo de processamento, tendo em vista a grande quantidade de imagens processadas.

3.5.2 Geração dos POE das câmeras

Durante o levantamento de campo realizado, foram coletados os parâmetros de orientação exterior do sistema. O sensor GNSS realizou a coleta das coordenadas geodésicas do SMM para cada tomada de foto, enquanto que o sensor inercial coletou a atitude do sistema.

Para realizar o processo de fototriangulação são necessários os parâmetros de atitude $(\omega, \varphi, \kappa)$ dos sensores, no momento de tomada das fotos. Como dito na seção 3.4, os dados do sensor inercial não puderam ser aproveitados. Sendo assim, foi preciso estimar os parâmetros de atitude de outro modo.

Devido às vias do trajeto levantado não serem inclinadas no sentido transversal ao sentido de caminhar, o parâmetro φ foi aproximado para 0 (zero). Os parâmetros κ e

ω puderam ser aproximados com base nas sucessivas posições do SMM, de acordo com as seguintes equações:

$$\omega_i = -90^\circ - \arctg \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{\sqrt{(\Delta x_{i+1,i}^2 + \Delta y_{i+1,i}^2)}} \right) \quad (3.4)$$

$$\varphi_i = 0 \quad (3.5)$$

$$\kappa_i = 90^\circ - \arctg \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (3.6)$$

Para os trechos em curva, foi calculada a diferença entre o κ do início da curva e o κ do final da curva, e foi distribuída igualmente para as exposições tomadas durante o processo de guinada.

Além dos parâmetros de atitude do sistema, para se realizar a fototriangulação é preciso também as coordenadas dos CPs. No entanto, as coordenadas dos centros perspectivos (CP) das câmeras devem estar relacionadas à um sistema 3D cartesiano. Dessa forma, as coordenadas geodésicas do SMM necessitaram ser transformadas para um sistema 3D local.

A conversão entre o sistema geodésico (φ, λ, h) e um sistema local (X_l, Y_l, Z_l) não pode ser realizada diretamente, para isso é preciso utilizar um sistema intermediário. O sistema cartesiano geocêntrico ECEF permite que essa transformação seja realizada, para isso é preciso transformar primeiramente as coordenadas geodésicas para o sistema ECEF, e na sequência, transformar as coordenadas ECEF obtidas em coordenadas do sistema local.

A transformação do sistema geodésico para o sistema ECEF foi feita segundo o modelo de Helmert (1880) :

$$X_{ECEF} = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \quad (3.7)$$

$$Y_{ECEF} = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \sen\lambda \quad (3.8)$$

$$Z_{ECEF} = (N(1 - e^2) + h) \cdot \sen\varphi \quad (3.9)$$

sendo:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (3.10)$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (3.11)$$

em que a e b são os semi-eixo maior e semi-eixo menor do elipsóide de referência, respectivamente.

Uma vez transformadas em coordenadas ECEF, foi possível então, fazer a transformação para o sistema 3D local. O sistema local foi definido a partir da escolha de uma origem e a orientação de seus eixos. Para a origem foi escolhido um ponto a sudoeste e perto da área de levantamento, de coordenadas geodésicas:

Tabela 4 – Coordenadas geodésicas da origem do sistema local

φ_0	-22.13222222°
λ_0	-51.43°
h_0	400 m

Os eixos foram definidos seguindo o modelo ENU (*East-North-Up*):

- Eixo X: aponta para Leste;
- Eixo Y: aponta para o Norte;
- Eixo Z: aponta para o zênite.

A conversão do sistema ECEF para o sistema local foi então realizada com base na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{GNSS}^{local} = \begin{pmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 * \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 * \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 * \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 * \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_P^{ECEF} - X_0^{ECEF} \\ Y_P^{ECEF} - Y_0^{ECEF} \\ Z_P^{ECEF} - Z_0^{ECEF} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

sendo:

- $(X, Y, Z)_{GNSS}^{local}$: coordenadas de cada posição do sensor GNSS no referencial local;
- (φ_0, λ_0) : coordenadas da origem do sistema local no referencial geodésico;
- $(X, Y, Z)_P^{ECEF}$: coordenadas de cada posição do sensor GNSS no referencial ECEF;
- $(X, Y, Z)_0^{ECEF}$: coordenadas da origem do sistema local no referencial ECEF.

Portanto, após estas duas transformações teve-se as coordenadas do sensor GNSS referenciadas ao sistema local. Seguindo, foi necessário converter as coordenadas do sensor para cada câmera, para isso foi medido o *lever arm* (a) de cada um dos sensores, sendo a origem do sistema sensor situada na junção do eixo vertical com o eixo horizontal do suporte. Sendo assim, o *lever arm*, em metros, para cada um dos sensores ficou definido pelos vetores:

$$a_{GNSS}^s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.640 \\ 0 \end{bmatrix} \quad a_{ce}^s = \begin{bmatrix} -0.42 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad a_{cd}^s = \begin{bmatrix} 0.41 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad a_{cc}^s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.535 \\ 0 \end{bmatrix}$$

As coordenadas (X, Y, Z) para cada câmera foram calculadas pela Equação 3.13:

$$\begin{bmatrix} X_{c_i} \\ Y_{c_i} \\ Z_{c_i} \end{bmatrix}_{local} = \begin{bmatrix} X_{GNSS} \\ Y_{GNSS} \\ Z_{GNSS} \end{bmatrix}_{local} + R_s^{local} \cdot (a_{GNSS}^s - a_{c_i}^s) \quad (3.13)$$

sendo:

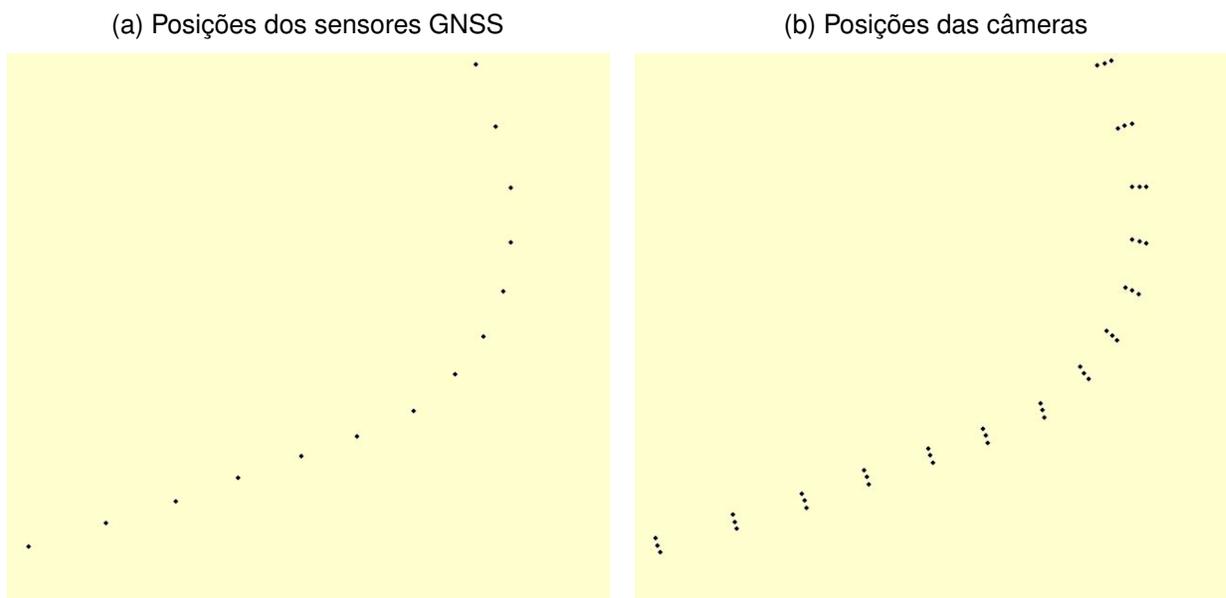
$$R_s^{local} = \begin{pmatrix} \cos\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \text{sen}\kappa + \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \cos\kappa & \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\kappa - \cos\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \cos\kappa \\ -\cos\varphi \cdot \text{sen}\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa - \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\kappa & \text{sen}\omega \cdot \cos\kappa + \cos\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\kappa \\ \text{sen}\varphi & -\text{sen}\omega \cdot \cos\varphi & \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

em que:

- $(X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i})_{local}$: coordenadas da câmera no referencial local;
- $(X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS})_{local}$: coordenadas do receptor GNSS no referencial local;
- R_s^{local} : matriz de transformação do sistema sensor para o sistema local;
- i : indicador da câmera calculada.

Finalmente, foram obtidas as coordenadas dos CP's das câmeras no referencial local. A Figura 27 apresenta um trecho do levantamento, em (a) as posições dos sensores coletadas em campo e em (b) as posições das câmeras calculadas:

Figura 27 – POE's gerados

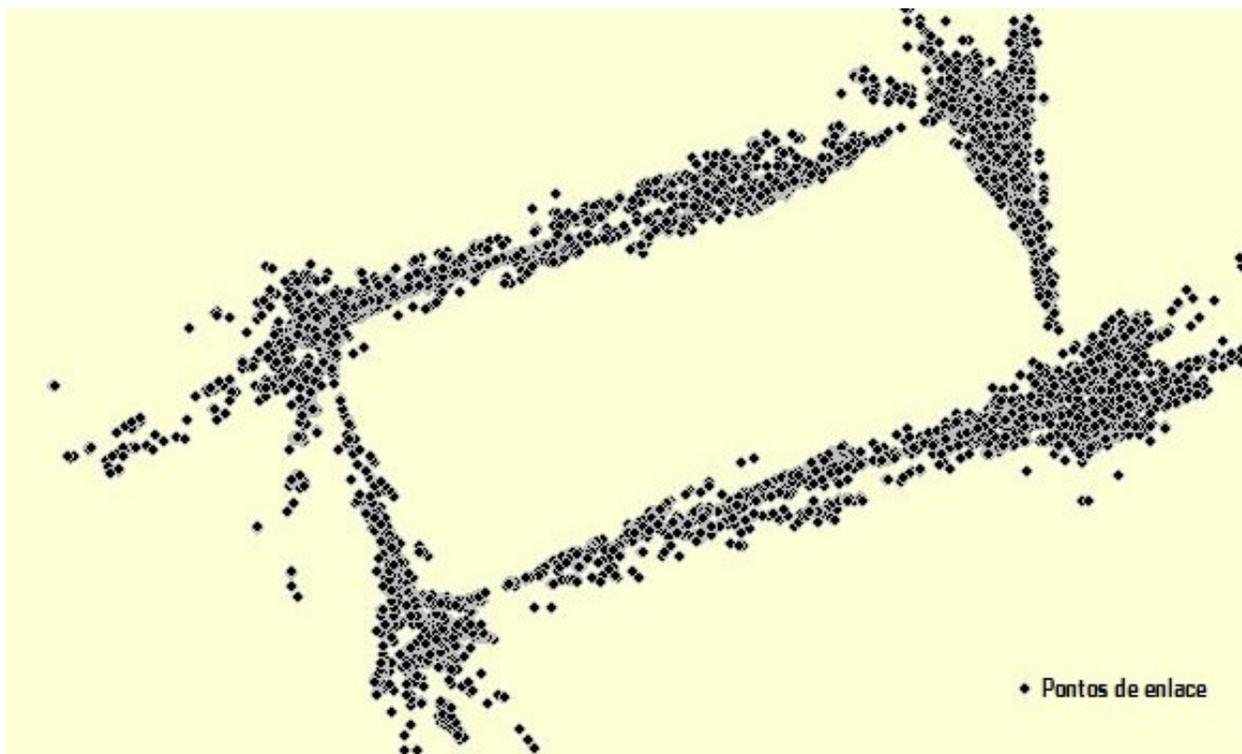


3.5.3 Geração das coordenadas-objeto e filtragem dos dados

Como última etapa de preparação dos dados necessários para o processo de fototriangulação, tem-se a geração das coordenadas dos pontos de enlace referenciadas ao espaço objeto local. Pelo fato dos POE das câmeras já estarem referenciados ao sistema local, ao se realizar o processo de interseção fotogramétrica, as coordenadas dos pontos de enlace são, conseqüentemente, geradas também referenciadas ao espaço objeto local.

O processo de interseção fotogramétrica foi realizado partindo-se das equações de colinearidade linearizadas. No entanto, este método requer uma aproximação inicial para os parâmetros. Neste trabalho, foi utilizado o método de interseção fotogramétrica por agrupamento de parâmetros, mais detalhes sobre este método pode ser encontrado em Oliveira (2003). Após determinar as coordenadas-objeto aproximadas dos pontos de enlace, foi realizado um refinamento destas coordenadas de forma iterativa até que a correção das coordenadas fosse de magnitude desprezível. O processo completo de interseção fotogramétrica, amplamente difundido na comunidade fotogramétrica, pode ser consultado em Wolf e Dewitt (2000), Ghosh (2005). A Figura 28 apresenta os pontos de enlace calculados no processo de interseção fotogramétrica.

Figura 28 – Pontos de enlace calculados por interseção fotogramétrica



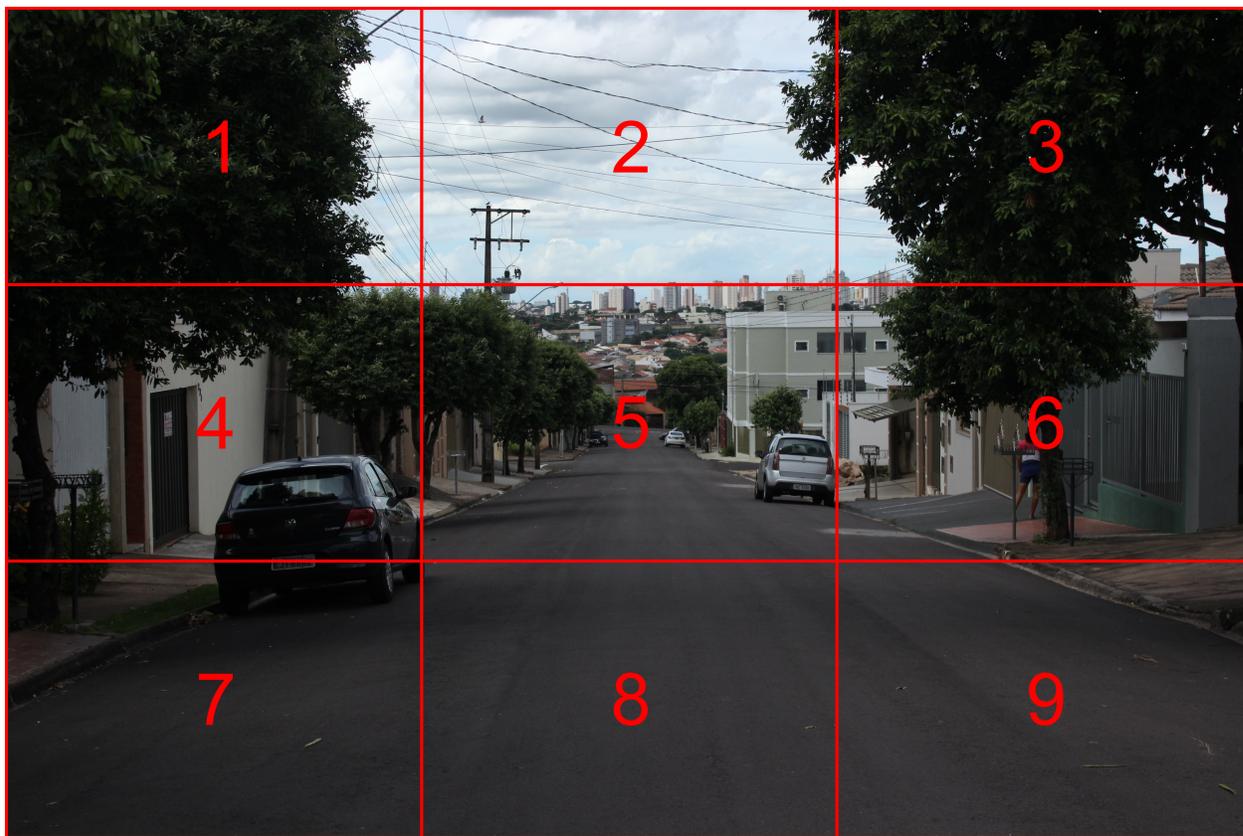
Em uma tentativa prévia de fototriangulação do percurso, percebeu-se que a grande quantidade de pontos fazia com que os dados da triangulação preenchessem toda a memória disponibilizada pelo computador para o programa, dessa forma, o procedimento era terminado sem que fosse obtido o resultado do bloco triangulado. Além disso, notou-se aglomerações de pontos em pequenos espaços, de forma que a abundância de pontos em um mesmo lugar não é vantajoso para a fototriangulação, os pontos devem estar espalhados pelo espaço objeto. Sendo assim, decidiu-se por realizar uma filtragem dos pontos de enlace, de forma a reduzir a quantidade de pontos por foto e ao mesmo tempo, homogeneizar a distribuição dos pontos, em termos de quantidade por foto.

A filtragem foi realizada de acordo com alguns critérios. Primeiramente, foram determinados dois limiares, um de distância mínima entre câmera-ponto e um de distância máxima. Dessa forma, apenas pontos que se situassem no intervalo entre os limiares eram considerados aptos a serem utilizados. Os valores escolhidos foram de 4 metros para distância mínima e 40 metros para distância máxima. O valor de distância mínima foi escolhido a fim de evitar que pontos sobre objetos desfocados fossem escolhidos. O valor de distância máxima foi adotado para evitar pontos muito distantes, uma vez que quanto maior a distância câmera-ponto, mais afetadas serão as coordenadas-objeto do

ponto devido à imprecisões nas coordenadas imagem.

Após a filtragem por distâncias, foi realizada a filtragem por quantidade de pontos por foto. Para isso foi escolhido um valor máximo de pontos possíveis por foto, o valor utilizado foi de 15 pontos. No entanto, para garantir uma geometria equilibrada para a determinação da orientação da imagem no processo de fototriangulação, é preciso que os pontos de enlace se situem nas extremidades das imagens, ou seja, pontos situados próximos ao centro da imagem resultam em uma determinação menos acurada da orientação da imagem. Sendo assim, as imagens foram divididas em 9 quadrantes (Figura 29), e para cada quadrante foi atribuído um peso diferente.

Figura 29 – Divisão dos quadrante de uma imagem

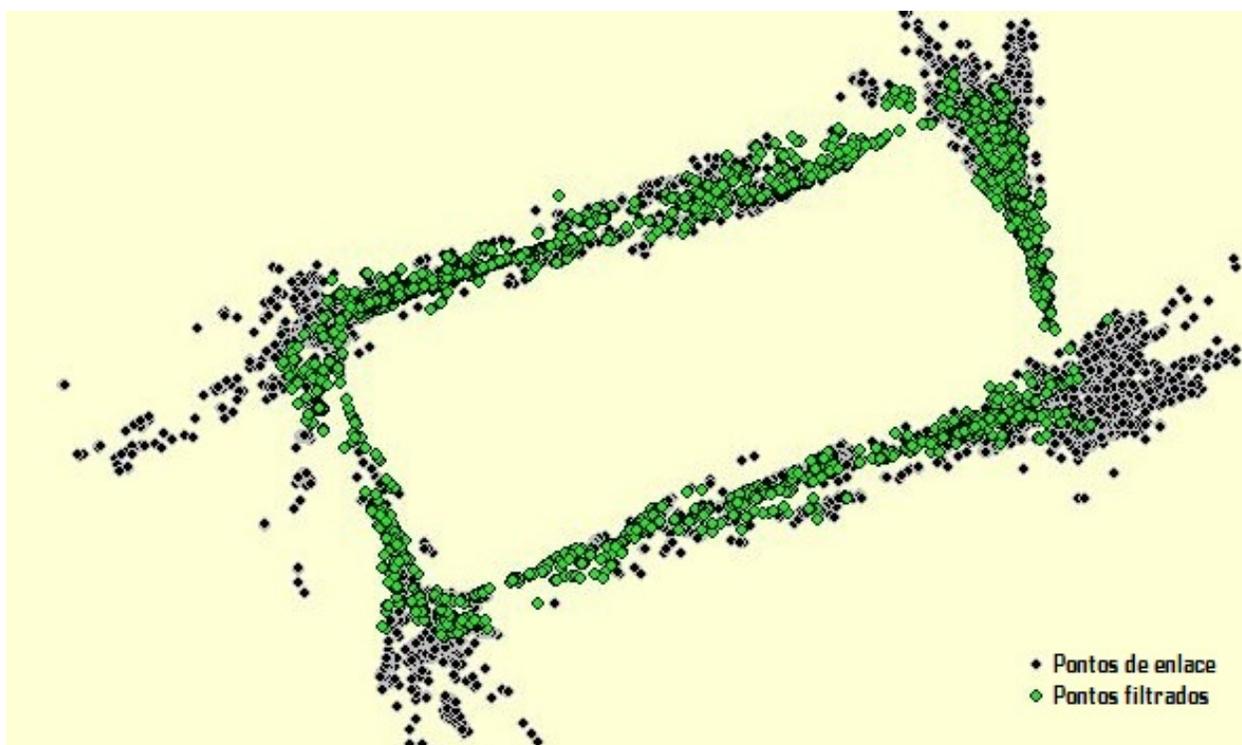


Para os quadrantes 1-3-7-9 (cantos) foram atribuídos peso 3, para os quadrantes 2-4-6-8 (laterais) foram atribuídos peso 2, e para o quadrante 5 (central) foi atribuído peso 1. Os pontos para cada imagem foram escolhidos levando em consideração o peso de seu quadrante e uma proporção pré-estabelecida de 50% dos pontos para os cantos, 40% para os laterais e 10% para o quadrante central.

Portanto, dado um número máximo de pontos por foto, foi escolhido 1 ponto por

quadrante do canto (para os quadrantes que haviam pontos). Em seguida foi escolhido o ponto mais longe, dentro do mesmo quadrante, do ponto já escolhido, esse processo foi repetido para todos os quadrantes dos cantos até atingir o limite percentual do número máximo de pontos por foto ou esgotarem os pontos nestes quadrantes. Na sequência, foi repetido o mesmo procedimento para os quadrantes laterais e central. Por fim, os pontos que foram identificados em 9 imagens diferentes, foram inseridos no grupo de pontos, independentemente do seu respectivo quadrante. A Figura 30 apresenta uma sobreposição dos pontos escolhidos no processo de filtragem sobre o total de pontos de enlace gerados pelos algoritmos de extração.

Figura 30 – Pontos de enlace filtrados

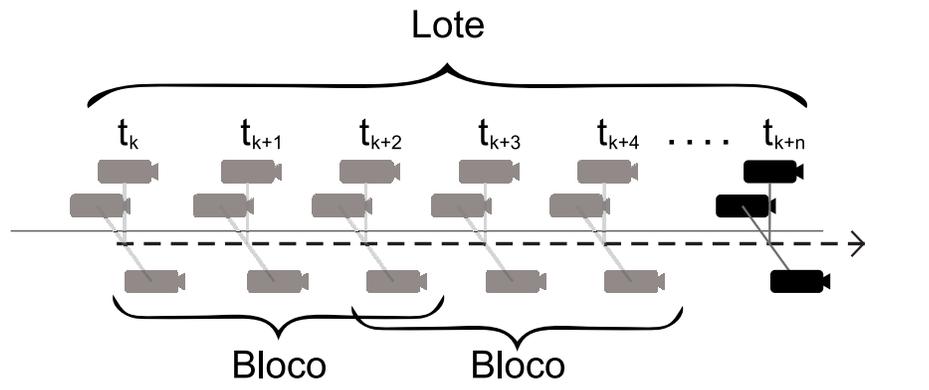


3.5.4 Fototriangulação

Uma vez calculados os POE das câmeras e as coordenadas-objeto aproximadas dos pontos de enlace, foi possível dar início então ao processo de fototriangulação. Os processamentos dos dados foram realizados tendo em vista as hipóteses do trabalho: analisar a influência da adição da terceira câmera no sistema de mapeamento móvel e analisar o caminhamento fotogramétrico em um trecho curvo e um trecho reto.

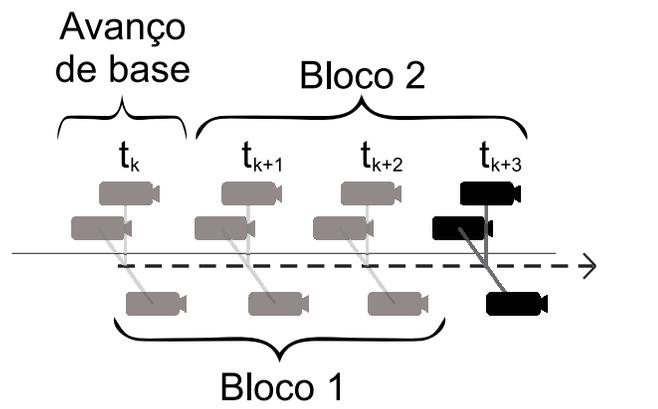
Além disso, foi estudado o processamento em lote e sequencial. No processamento em lote, foram considerados todos os parâmetros e imagens de forma simultânea. No processamento sequencial, o levantamento foi segmentado em pequenos blocos de imagens subsequentes, onde cada bloco foi triangulado isoladamente. É chamado de "bloco" o conjunto de imagens tomadas por sucessivas exposições t_k . A Figura 31 ilustra o conceito de bloco e lote.

Figura 31 – Conceito de bloco e lote



Além disso, um conceito que se faz necessário é o "avanço de base", que é a quantidade de exposições t_k descartadas na formação de um novo bloco. Por exemplo, considerando um bloco com 3 exposições (9 imagens), após a fototriangulação deste bloco, pode-se descartar a primeira exposição (3 imagens) e criar um novo bloco com as 2 exposições não descartadas e o acréscimo de 1 nova exposição, tendo um bloco de 3 exposições novamente. Neste caso, o avanço de base é 1. A Figura 32 ilustra o conceito de avanço de base.

Figura 32 – Conceito de avanço de base



Em um primeiro momento, foi realizada uma tentativa de processamento em lote de todo o levantamento (114 bases). No entanto, a quantidade de dados utilizados neste processamento era muito grande, de forma que o processo era interrompido durante sua execução por falta de memória disponível para o programa. Mesmo reduzindo a quantidade de pontos por foto, este problema não era solucionado.

Um segundo teste então foi realizado, neste foi feito o processamento sequencial do levantamento completo, dessa forma a quantidade total de dados era dividida em processamentos menores de poucas bases. Embora tenha solucionado o problema da quantidade excessiva de dados, após aproximadamente 11 ou 12 bases processadas, a propagação de erros na determinação da orientação das imagens e, conseqüentemente, nas coordenadas dos pontos de enlace, era muito grande e o ajustamento divergia. Sendo assim, optou-se pela redução da quantidade de bases processadas para 10 bases consecutivas e foram escolhidos dois trechos distintos, um de trajetória reta e outro de trajetória curva para efeito de comparação dos resultados. A Figura 33 apresenta os trechos selecionados (amarelos) para os experimentos.

Figura 33 – Trechos, reto e curvo, selecionados

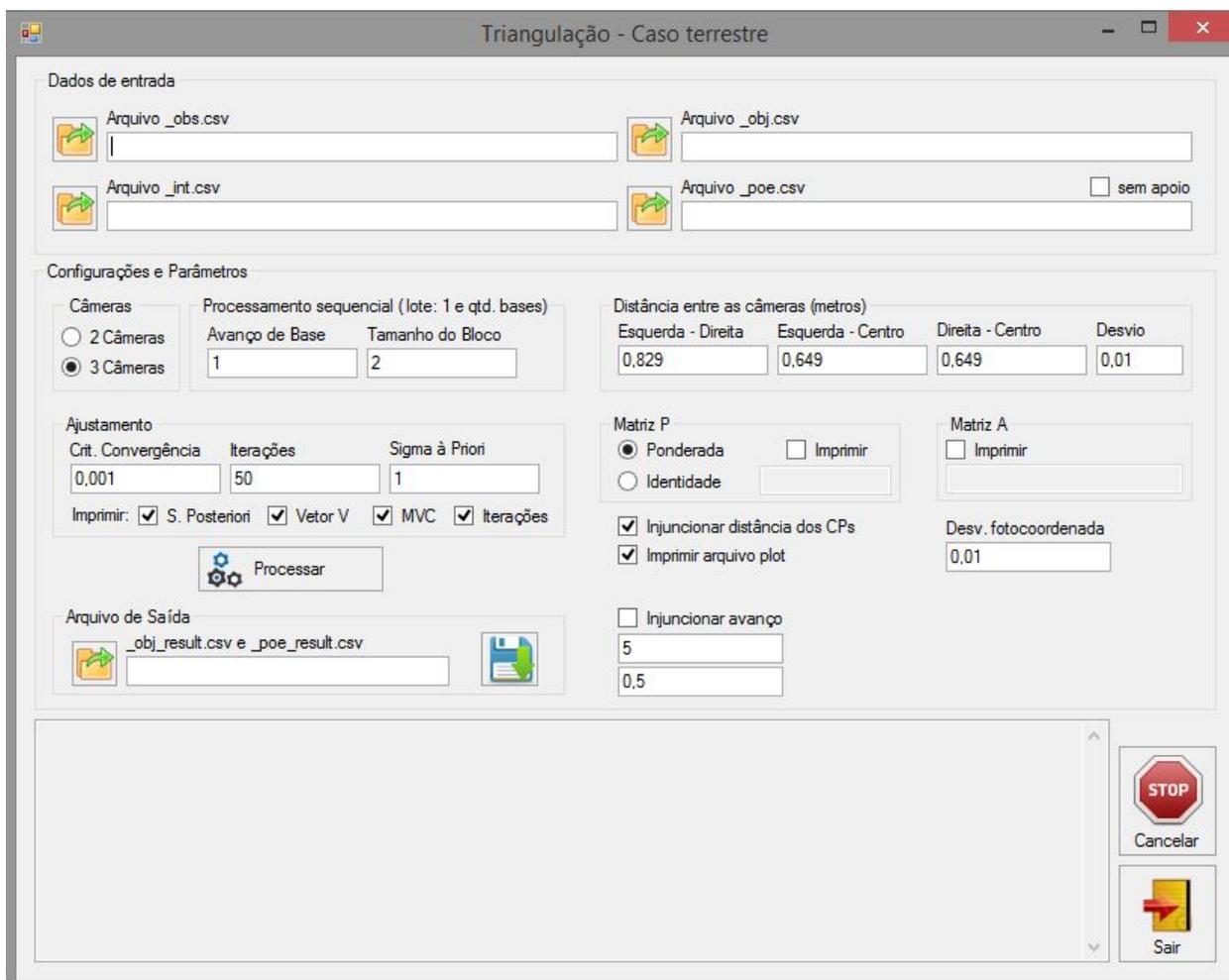


Portanto, os experimentos foram realizados variando-se a quantidade de câmeras (2 ou 3), o trecho percorrido (reta ou curva) e o tipo de processamento, em lote ou sequencial.

É válido ressaltar que apesar de ter sido realizado o processamento com 2 e 3 câmeras, foi feito um único levantamento, sendo os dados da terceira câmera desconsiderados para quando o processamento do par.

Para o processamento da fototriangulação foi desenvolvido um software, no qual é possível carregar os arquivos texto com os dados referentes ao levantamento, como as observações, os POEs aproximados, coordenadas aproximadas dos pontos de enlace e a orientação interior das câmeras. Além disso, é possível configurar alguns parâmetros adicionais como a quantidade de câmeras, tamanho do bloco e avanço de base, número de iterações máximas, critério de convergência e variância *a priori*, bem como escolher alguns dados a serem impressos no final do processamento. A Figura 34 apresenta a tela inicial do software.

Figura 34 – Tela inicial do software de fototriangulação



Na montagem da matriz dos pesos (P), a ponderação dos parâmetros foi realizada de três formas diferentes. Primeiramente, assumiu-se que os POI foram invariantes durante

o levantamento de campo devido ao trecho de levantamento ser curto e as câmeras utilizadas, apesar de não-métricas, serem de alta qualidade. Sendo assim, os POI das câmeras, obtidos no processo de calibração, foram injuncionados absolutamente. Aliado a isto, pelo fato da calibração ser um processo robusto e retornar valores com boa precisão, a injunção absoluta dos POI evita que esses parâmetros absorvam erros provenientes dos demais parâmetros no ajustamento.

Os parâmetros posicionais das câmeras foram injuncionados relativamente, levando em consideração a precisão do sensor GNSS utilizado. De forma análoga, os pesos dos parâmetros de atitude das câmeras também foram determinados em função das variâncias estipuladas pelo usuário. Ambos pesos dos parâmetros foram calculados segundo a Equação 3.15:

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (3.15)$$

em que:

- P_i : peso de um parâmetro (i);
- σ_0^2 : variância *a priori*;
- σ_i^2 : variância do parâmetro.

Por fim, os pontos de enlace foram considerados como variáveis livres por não ter sido feita qualquer medição sobre estes pontos e por não possuir pontos de apoio ao modelo. Sendo assim, os pontos de enlace não foram injuncionados no processo de fototriangulação.

4 Experimentos e Resultados

Os experimentos realizados permitiram analisar a influência da terceira câmera no caminhamento fotogramétrico, estudar seu comportamento em trechos curvos, comparar o processamento sequencial e em lote, e por fim, analisar variações do tamanho do bloco e avanço de base. Portanto, os experimentos foram divididos de forma a analisar cada quesito separadamente.

De forma geral, para todos os processamentos, alguns parâmetros se mantiveram constantes. Além dos POI descritos na seção 3.3, tem-se:

- Injunção de base:
 - 0,829 m entre as câmeras Esquerda x Direita;
 - 0,649 m entre as câmeras Esquerda x Centro;
 - 0,649 m entre as câmeras Direita x Centro;
 - Desvios-padrão das injunções de base: 0,01 m;
- Tamanho do pixel: 0,0064 mm;
- Critério de convergência: 0,001 m;
- Iterações máximas: 50;
- Variância *a priori*: 1;
- Desvio-padrão das fotocoordenadas: 0,0064 mm (1 pixel);
- Desvio-padrão das injunções posicionais dos CPs da primeira base: 0,5 m;
- Desvio-padrão das injunções posicionais dos CPs das demais bases: 2 m;
- Desvio-padrão das injunções de atitude dos CPs da primeira base: 1°;
- Desvio-padrão das injunções de atitude dos CPs das demais bases: 5°.

4.1 Trajetória Reta

Neste experimento foram processadas 10 bases consecutivas tomadas em uma trajetória praticamente reta. Como forma de controle para a estimativa das coordenadas

dos pontos no espaço objeto, foram utilizados 8 pontos de verificação coletados em campo, como visto em 3.4.1. A Tabela 5 apresenta as coordenadas-objeto dos pontos de verificação no sistema local.

Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de verificação

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
V1	187,288	83,697	40,073
V2	188,847	84,204	40,137
V3	207,822	89,166	40,275
V4	178,400	95,473	40,337
V5	173,225	93,731	40,602
V6	199,857	102,379	39,415
V7	208,848	105,588	38,806
V8	191,471	85,099	39,652

Sendo assim, com as coordenadas obtidas no levantamento de campo e as calculadas no processamento, foram calculadas as REMQ para cada coordenada, bem como a média das resultantes das coordenadas. Como exemplo, na Tabela 6 tem-se o cálculo do erro para cada uma das coordenadas e o erro resultante (ER) obtidos por um processamento com 2 câmeras, sequencial, e com tamanho do bloco TB = 3 e avanço de base AB = 1, e na Tabela 7 as respectivas REMQ e a resultante média (R).

Tabela 6 – Erro obtido para cada coordenada - Sequencial 2C

Ponto	Calculada 2C			Erro (calculado - real)			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	EX (m)	EY (m)	EZ (m)	ER (m)
V1	180,133	81,427	38,925	-7,155	-2,270	-1,148	7,594
V2	180,985	81,805	39,099	-7,862	-2,399	-1,038	8,285
V3	198,606	86,119	39,748	-9,216	-3,047	-0,527	9,721
V4	172,244	93,695	39,073	-6,156	-1,778	-1,264	6,531
V5	167,565	92,287	39,261	-5,660	-1,444	-1,341	5,993
V6	192,032	99,039	38,754	-7,825	-3,340	-0,661	8,534
V7	200,132	101,626	38,426	-8,716	-3,962	-0,380	9,581
V8	183,561	82,606	38,701	-7,910	-2,493	-0,951	8,348

Tabela 7 – REMQ das coordenadas - Sequencial 2C

REMQ			
X (m)	Y (m)	Z (m)	R (m)
7,646	2,704	0,972	8,168

Os resultados do processamento sequencial para o arranjo de 3 câmeras estão dispostos na Tabela 8 e suas respectivas REMQ na Tabela 9.

Tabela 8 – Erro obtido para cada coordenada - Sequencial 3C

Ponto	Calculada 3C			Erro (calculado - real)			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	EX (m)	EY (m)	EZ (m)	ER (m)
V1	181,038	81,478	39,448	-6,250	-2,219	-0,625	6,661
V2	181,720	81,863	39,561	-7,127	-2,341	-0,576	7,524
V3	198,432	86,139	40,610	-9,390	-3,027	0,335	9,872
V4	171,699	93,331	39,501	-6,701	-2,142	-0,836	7,084
V5	167,422	92,214	39,654	-5,803	-1,517	-0,948	6,073
V6	191,319	98,695	39,542	-8,538	-3,684	0,127	9,300
V7	199,772	101,494	39,402	-9,076	-4,094	0,596	9,974
V8	184,276	82,682	39,214	-7,195	-2,417	-0,438	7,603

Tabela 9 – REMQ das coordenadas - Sequencial 3C

REMQ			
X (m)	Y (m)	Z (m)	R (m)
7,613	2,798	0,612	8,134

De modo a facilitar a análise de cada processamento, doravante serão apresentados apenas as respectivas REMQ obtidas para cada coordenada e as resultantes médias.

4.1.1 Análise: 2 x 3 câmeras

Para realizar a comparação do caminhamento fotogramétrico com duas e três câmeras, foram realizadas fototriangulações com diversas configurações de tamanho do bloco e avanço de base. Os resultados obtidos para cada processamento usando apenas duas câmeras são apresentados na Tabela 10 e os resultados dos processamentos com três câmeras na Tabela 11.

Tabela 10 – Resultados para os processamentos com duas câmeras

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
2	2	1	9	7,553	2,719	0,970	7,926
2	3	1	8	7,646	2,704	0,972	8,073
2	4	1	7	6,935	2,420	0,983	7,387
2	5	1	6	5,618	2,117	1,006	5,998
2	6	1	5	5,518	2,125	1,007	5,916
2	7	1	4	5,862	2,186	0,988	6,294
2	8	1	3	5,764	2,096	0,989	6,173
2	9	1	2	5,658	2,061	1,006	6,067
2	10	0	1	5,213	2,052	1,057	5,675

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

Tabela 11 – Resultados para os processamentos com três câmeras

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
3	2	1	9	7,725	2,926	0,559	8,011
3	3	1	8	7,613	2,798	0,612	8,011
3	4	1	7	6,802	2,480	0,650	7,258
3	5	1	6	5,296	2,041	0,660	5,550
3	6	1	5	5,320	2,064	0,634	5,613
3	7	1	4	5,917	2,195	0,608	6,300
3	8	1	3	5,813	2,105	0,589	6,169
3	9	1	2	5,706	2,069	0,572	6,056
3	10	0	1	5,324	2,069	0,492	5,709

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

A partir dos resultados presentes nas Tabelas 10 e 11, é possível perceber que em alguns casos os resultados foram melhores utilizando três câmeras, enquanto que em outros casos, utilizando duas câmeras. O arranjo de câmeras com melhor resultado para cada experimento é mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Arranjo com melhor resultado para cada processamento

TB	AB	Arranjo			
		X	Y	Z	R
2	1	2	2	3	2
3	1	3	2	3	3
4	1	3	2	3	3
5	1	3	3	3	3
6	1	3	3	3	3
7	1	2	<u>2</u>	3	<u>2</u>
8	1	2	<u>2</u>	3	<u>3</u>
9	1	2	<u>2</u>	3	3
10	0	2	2	3	2

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Nas células sublinhadas a diferença de resultado foi menor que 1 cm.

Analisando a Tabela 12 é possível dizer que na maioria dos casos, o arranjo formado com três câmeras gerou resultados melhores que o arranjo com duas apenas. Analisando cada coordenada isoladamente, o arranjo de duas câmeras é o que apresenta melhor resultado com relação as coordenadas X (eixo paralelo ao do levantamento) e as coordenadas Y (eixo transversal ao do levantamento), na maioria dos processamentos. Para a coordenada Z (altura), o arranjo com três câmeras obteve resultados melhores em todos os casos. As Figuras 35 e 36 apresentam os pontos de verificação calculados no processamento em lote para ambos os arranjos de câmera.

De forma geral, apesar do arranjo de duas câmeras obter menores erros em X e Y, e maiores em Z, o arranjo de três câmeras obteve resultados melhores em relação à resultante das coordenadas, na maioria dos casos. No total, das 36 REMQs calculadas, o arranjo triangular obteve melhores resultados em 58.3% dos casos e o arranjo de duas câmeras em 41.7% dos casos. Ao analisar a resultante, o arranjo triangular obteve melhores resultados em 66.7% dos casos e o arranjo de duas câmeras em 33.3% dos casos. Sendo assim, é possível dizer que a adição de uma terceira câmera, não colinear, ao arranjo contribui para a estimativa das coordenadas-objeto dos pontos.

Figura 35 – Pontos de verificação do trecho reto - Visto de perfil

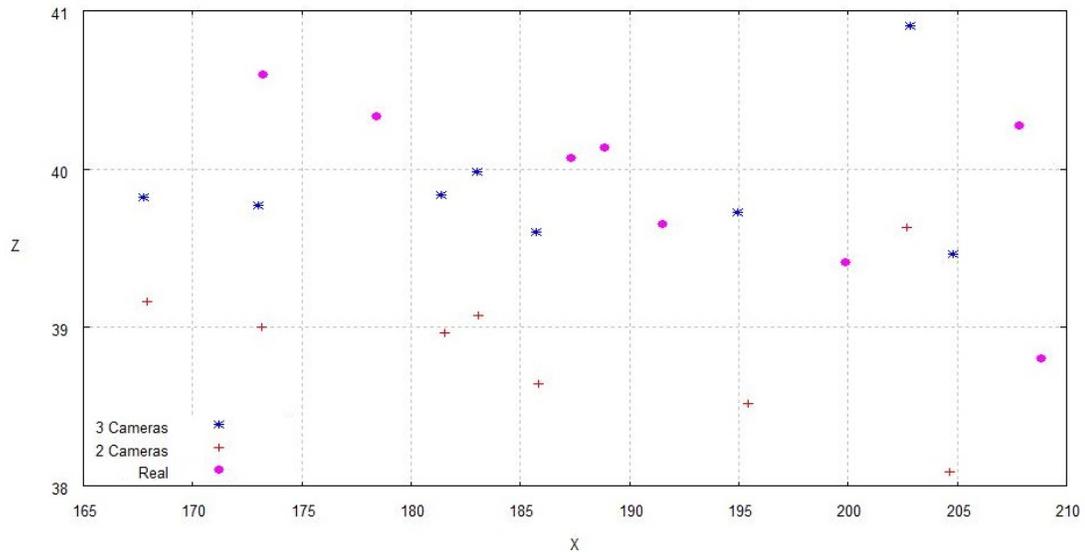
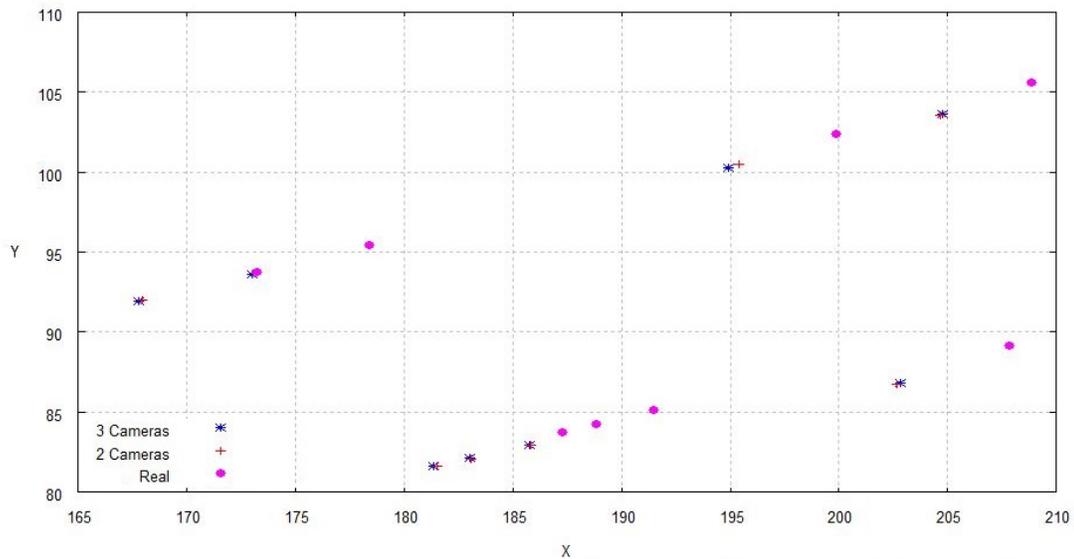


Figura 36 – Pontos de verificação do trecho reto - Visto de cima



Em relação aos parâmetros de atitude dos CPs das câmeras, não foi possível realizar um controle da sua estimativa, uma vez que não foram medidos seus POE com alto grau de confiabilidade. Portanto, como análise da sua estimativa foram utilizados os desvios-padrão calculados a partir da matriz de variância-covariância dos parâmetros. No entanto, este não é o melhor método de análise, uma vez que a matriz de variância-covariância é calculada com base na variância *a posteriori* do processo de ajustamento, sendo que essa variância é dependente da qualidade do ajustamento, o que não necessariamente

representa a verdade de campo. Os desvios-padrão obtidos para cada parâmetro nos processamentos com duas câmeras são apresentados na Tabela 13 e para três câmeras na Tabela 14.

Tabela 13 – Desvios-padrão dos POE - 2C

TB	AB	ω	φ	κ	X_{CP}	Y_{CP}	Z_{CP}
2	1	1° 25' 30"	1° 25' 54"	1° 25' 30"	0,575	0,576	0,575
3	1	1° 03' 31"	1° 04' 16"	1° 03' 31"	0,430	0,436	0,436
4	1	0° 51' 37"	0° 52' 49"	0° 51' 37"	0,355	0,366	0,366
5	1	0° 43' 22"	0° 44' 55"	0° 43' 22"	0,304	0,318	0,319
6	1	0° 37' 34"	0° 39' 35"	0° 37' 34"	0,271	0,289	0,289
7	1	0° 32' 38"	0° 34' 54"	0° 32' 38"	0,239	0,261	0,263
8	1	0° 29' 45"	0° 32' 26"	0° 29' 45"	0,225	0,250	0,252
9	1	0° 26' 54"	0° 29' 51"	0° 26' 54"	0,208	0,235	0,237
10	0	0° 14' 04"	0° 15' 30"	0° 14' 05"	0,129	0,135	0,135

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Tabela 14 – Desvios-padrão dos POE - 3C

TB	AB	ω	φ	κ	X_{CP}	Y_{CP}	Z_{CP}
2	1	1° 46' 56"	1° 47' 24"	1° 46' 56"	0,717	0,720	0,720
3	1	1° 21' 44"	1° 22' 43"	1° 21' 44"	0,553	0,561	0,561
4	1	1° 06' 28"	1° 07' 55"	1° 06' 28"	0,456	0,469	0,470
5	1	0° 56' 50"	0° 59' 04"	0° 56' 50"	0,402	0,420	0,420
6	1	0° 49' 42"	0° 52' 24"	0° 49' 43"	0,358	0,382	0,383
7	1	0° 43' 08"	0° 46' 08"	0° 43' 09"	0,315	0,345	0,347
8	1	0° 38' 57"	0° 42' 27"	0° 38' 57"	0,294	0,327	0,329
9	1	0° 34' 54"	0° 38' 43"	0° 34' 54"	0,270	0,305	0,307
10	0	0° 18' 02"	0° 19' 46"	0° 18' 02"	0,165	0,172	0,173

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

De acordo com as Tabelas 13 e 14, os POE referentes ao arranjo com duas câmeras tiveram maior precisão que os estimados com o arranjo de três câmeras, para todos os processamentos. No entanto, isto não implica que os valores obtidos para os POE sejam mais acurados. Como mostrado na Tabela 12, na maioria dos casos obteve-se melhores

estimativas para as coordenadas dos pontos com o arranjo triangular, mesmo que este tivesse menor precisão na determinação dos respectivos POE. Uma explicação para os desvios-padrão serem maiores para os POE do arranjo triangular, é a dificuldade de se ajustar geometricamente o bloco de imagens, uma vez que foram utilizadas mais imagens no processo. As Figuras 37 e 38 apresentam os POE calculados no processamento em lote, para ambos os arranjos de câmeras.

Figura 37 – POE - Visto de perfil

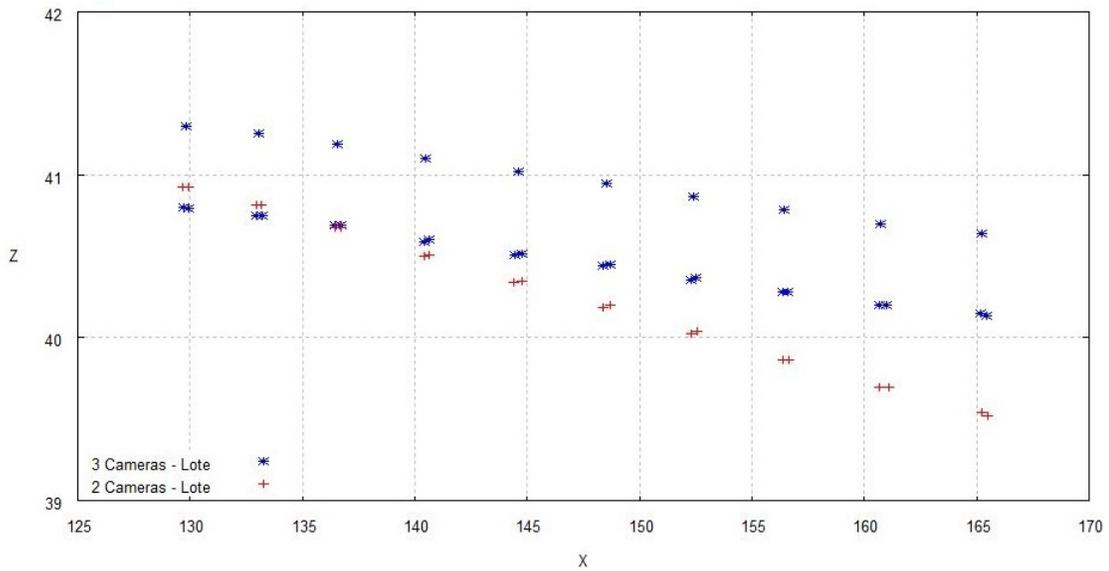
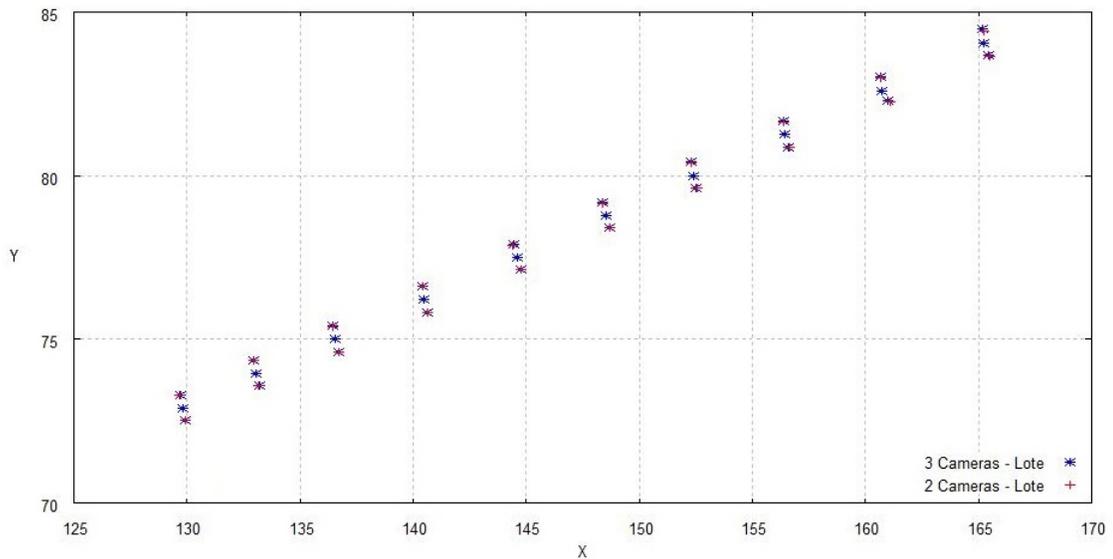


Figura 38 – POE - Visto de cima



4.1.2 Análise: Sequencial x Lote e variações do tamanho do bloco e avanço de base

Para realizar a análise do processamento sequencial e do processamento em lote, foram utilizados os dados apresentados na Tabela 15, onde estão dispostos os resultados obtidos para ambos os processamentos, e para cada arranjo de câmera.

Tabela 15 – Lote x Sequencial

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
2	2	1	9	7,553	2,719	0,970	7,926
	10	0	1	5,213	2,052	1,057	5,675
3	2	1	9	7,725	2,926	0,559	8,011
	10	0	1	5,324	2,069	0,492	5,709

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

Como é mostrado na tabela 15, a triangulação em lote teve melhores resultados quando comparada com a triangulação sequencial para ambos os arranjos de câmeras. Na sequencial os erros de um bloco são propagados para os blocos seguintes, dessa forma, os últimos blocos processados possuem um elevado acúmulo de erro proveniente dos processamentos anteriores. Já na triangulação em lote, os erros são distribuídos de forma mais uniforme para todos os pontos. De forma análoga, o mesmo aconteceu para os resultados dos POE. A Tabela 16 apresenta os desvios-padrão para cada parâmetro de orientação exterior, obtidos a partir da matriz variância-covariância gerada no ajustamento.

Tabela 16 – Desvios-padrão obtidos nos processamentos em lote e sequencial

CAM	TB	AB	ω	φ	κ	X_{CP}	Y_{CP}	Z_{CP}
2	2	1	1° 25' 30"	1° 25' 54"	1° 25' 30"	0,575	0,576	0,575
	10	0	0° 14' 04"	0° 15' 30"	0° 14' 05"	0,129	0,135	0,135
3	2	1	1° 46' 56"	1° 47' 24"	1° 46' 56"	0,717	0,720	0,720
	10	0	0° 18' 02"	0° 19' 46"	0° 18' 02"	0,165	0,172	0,173

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Os valores dos POE estimados no processamento em lote tiveram desvios-padrão significativamente menores que os estimados no processamento sequencial. Para os desvios-padrão angulares, os valores obtidos no processamento sequencial chegaram

a até seis vezes o valor obtido no processamento em lote. Enquanto que para os parâmetros posicionais, essa diferença chegou a aproximadamente quatro vezes o valor do processamento em lote.

Para a análise da influência do tamanho do bloco, foram utilizados os dados já apresentados na Tabela 11, que por motivo de facilitar o acompanhamento da análise, são apresentados novamente na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados para os processamentos em lote e sequencial

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
3	2	1	9	7,725	2,926	0,559	8,011
3	3	1	8	7,613	2,798	0,612	8,011
3	4	1	7	6,802	2,480	0,650	7,258
3	5	1	6	5,296	2,041	0,660	5,550
3	6	1	5	5,320	2,064	0,634	5,613
3	7	1	4	5,917	2,195	0,608	6,300
3	8	1	3	5,813	2,105	0,589	6,169
3	9	1	2	5,706	2,069	0,572	6,056
3	10	0	1	5,324	2,069	0,492	5,709

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

Portanto, conforme aumentou-se o tamanho do bloco de imagens na triangulação, o erro médio obtido para cada coordenada diminuiu. As coordenadas X e Y são as mais afetadas pela variação do tamanho do bloco, sendo que REMQ destas podem reduzir a aproximadamente metade ao comparar a triangulação sequencial de blocos com 2 bases com a triangulação em lote (10 bases).

Em valores absolutos, a coordenada X é a que possui a maior REMQ. Sendo o eixo X o mais próximo do sentido de caminhamento do levantamento, o valor elevado para estas coordenadas é mais um indicativo da deficiência na determinação de coordenadas ao longo do eixo perpendicular à base em um caminhamento fotogramétrico. Já o REMQ da coordenada Z é menos sensível à variação do tamanho do bloco e varia muito pouco de caso pra caso. De forma análoga, a média das resultantes das coordenadas também diminui com o aumento do bloco, podendo na triangulação em lote chegar a aproximadamente 70% do valor obtido na triangulação sequencial com blocos de 2 bases.

Blocos maiores de imagens permitem a distribuição dos erros de maneira mais uniforme e diminuem a propagação de erros de uma base para a outra. Além do tamanho do bloco, a quantidade de blocos processados também contribui para uma melhora do resultado. Os

resultados dos processamentos realizados variando o avanço de base são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados obtidos para diferentes avanços de base

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
3	4	1	7	6,802	2,480	0,650	7,258
3	4	2	4	6,750	2,470	0,623	7,193
3	4	3	3	6,765	2,484	0,596	7,213

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

Ao manter o tamanho do bloco e aumentar o avanço de base, a quantidade de blocos necessários para cobrir toda a área levantada diminuiu. Essa diminuição é positiva pois reduz a propagação de erro de uma sequência de blocos para a outra. Apesar de contribuir, a variação do avanço de base não é tão significativa quanto a variação do tamanho do bloco para a melhora do resultado final.

4.2 Trajetória Curva

Neste experimento foram processadas 10 bases consecutivas tomadas em uma trajetória curva. Como forma de controle para a estimativa das coordenadas dos pontos no espaço objeto, foram utilizados 7 pontos de verificação coletados em campo. A Tabela 19 apresenta as coordenadas-objeto dos pontos de verificação no sistema local.

Tabela 19 – Coordenadas dos pontos de verificação

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
V1	78,421	123,881	45,260
V2	84,532	127,001	45,109
V3	92,373	111,896	45,134
V4	95,290	110,028	43,618
V5	97,284	107,607	43,629
V6	100,371	98,862	44,982
V7	98,933	102,991	45,273

A partir das coordenadas obtidas no levantamento de campo e as calculadas no processamento, foram calculadas as REMQ para cada coordenada e as médias das resultantes. Na Tabela 22 estão as coordenadas calculadas para o processamento em lote com o arranjo de duas câmeras, seus respectivos erros (E) e o erro resultante (ER). As REMQ calculadas para esse processamento e a resultante média (R) estão dispostas na Tabela 23.

Tabela 20 – Coordenadas e seus erros - Lote 2C

Ponto	Calculada 2C			Erro (calculado - real)			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	EX (m)	EY (m)	EZ (m)	ER (m)
V1	82,301	128,104	42,754	3,880	4,223	-2,506	6,259
V2	88,553	130,833	42,794	4,021	3,832	-2,315	6,018
V3	94,959	115,263	42,423	2,586	3,367	-2,711	5,037
V4	97,646	113,246	40,908	2,356	3,218	-2,710	4,821
V5	99,485	111,126	40,881	2,201	3,519	-2,748	4,978
V6	101,808	103,156	41,922	1,437	4,294	-3,060	5,465
V7	100,736	106,831	42,306	1,803	3,840	-2,967	5,177

Tabela 21 – REMQ das coordenadas - Lote 2C

REMQ			
X (m)	Y (m)	Z (m)	R (m)
2,768	3,775	2,727	5,418

Os resultados do processamento em lote para o arranjo triangular estão dispostos na Tabela 20 e suas respectivas REMQ na Tabela 21.

Tabela 22 – Erro obtido para cada coordenada - Lote 3C

Ponto	Calculada 3C			Erro (calculado - real)			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	EX (m)	EY (m)	EZ (m)	ER (m)
V1	81,722	127,921	43,495	3,301	4,040	-1,765	5,507
V2	88,216	130,731	43,394	3,684	3,730	-1,715	5,516
V3	94,800	115,071	42,985	2,427	3,175	-2,149	4,538
V4	97,547	113,122	41,426	2,257	3,094	-2,192	4,413
V5	99,382	110,892	41,378	2,098	3,285	-2,251	4,501
V6	101,743	102,602	42,443	1,372	3,740	-2,539	4,724
V7	100,660	106,441	42,830	1,727	3,450	-2,443	4,566

Tabela 23 – REMQ das coordenadas - Lote 3C

REMQ			
X (m)	Y (m)	Z (m)	R (m)
2,527	3,517	2,170	4,844

4.2.1 Análise: 2 x 3 câmeras

A comparação do caminhamento fotogramétrico com duas e três câmeras foi realizada a partir dos resultados obtidos para os processamentos em lote e sequencial para cada arranjo de câmeras. Os resultados obtidos para o processamento do CF com o arranjo de duas câmeras estão dispostos na Tabela 24, e os resultados do arranjo triangular estão na Tabela 25.

Tabela 24 – Resultados para os processamentos com duas câmeras

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
2	2	1	9	5,686	7,146	2,284	9,413
2	3	1	8	5,383	7,307	2,335	9,372
2	4	1	7	5,063	7,437	2,354	9,300
2	10	0	1	2,768	3,775	2,727	5,418

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

Tabela 25 – Resultados para os processamentos com três câmeras

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
3	2	1	9	5,747	6,832	1,821	9,112
3	3	1	8	5,649	6,730	1,895	8,989
3	4	1	7	4,989	7,216	1,933	8,983
3	10	0	1	2,527	3,517	2,170	4,844

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: sequências processadas.

Como é possível verificar nas Tabelas 24 e 25, diferentemente do ocorrido na trajetória reta, alguns processamentos sequenciais perderam convergência nos blocos intermediários da curva. Após uma conferência cuidadosa dos dados à procura de erros grosseiros ou algum ponto fora dos padrões, optou-se por desconsiderar estes dados da análise, uma vez que foi obtido sucesso nos processamentos sequenciais com blocos menores de imagens e no processamento em lote, sendo estes suficientes para avaliar os quesitos propostos. Portanto, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 24 e 25, foi possível gerar a Tabela 26, a qual apresenta o arranjo de câmeras com melhor resultado para cada experimento realizado na trajetória curva.

Tabela 26 – Arranjo com o melhor resultado para cada processamento

TB	AB	Arranjo			
		X	Y	Z	R
2	1	2	3	3	3
3	1	2	3	3	3
4	1	3	3	3	3
10	0	3	3	3	3

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Analisando a Tabela 26, é possível concluir que o arranjo triangular obteve melhores resultados que o arranjo de duas câmeras na trajetória curva, na maioria dos casos. Com relação à coordenada X, o arranjo de duas câmeras obteve resultados melhores nos processamentos sequenciais com tamanho de bloco igual a 2 e 3, enquanto que o arranjo de três câmeras foi melhor nos demais casos. Já nas coordenadas Y e Z, o arranjo triangular gerou resultados melhores para todos os casos, e que conseqüentemente, obteve resultantes menores para cada ponto.

Ao todo, dos 16 valores comparados, o arranjo triangular obteve resultados melhores em 87.5% dos casos, enquanto que o arranjo de duas câmeras em apenas 12.5% dos casos. Analisando somente as resultantes obtidas, o arranjo triangular se provou melhor em 100% dos casos. Esta melhora pode ser atribuída ao fato do aumento de observações para cada ponto causada pela adição da terceira câmera, de forma que uma maior quantidade de observações permite restringir a variação posicional do ponto no espaço objeto. Sendo o trecho curvo mais propenso a ter variações significativas nos POE, uma maior redundância nas observações é um fator positivo na determinação dos pontos e da OE.

As Figuras 39 e 40 apresentam os POE calculados no processamento em lote, para ambos os arranjos de câmera.

Figura 39 – Pontos de verificação - Visto de cima

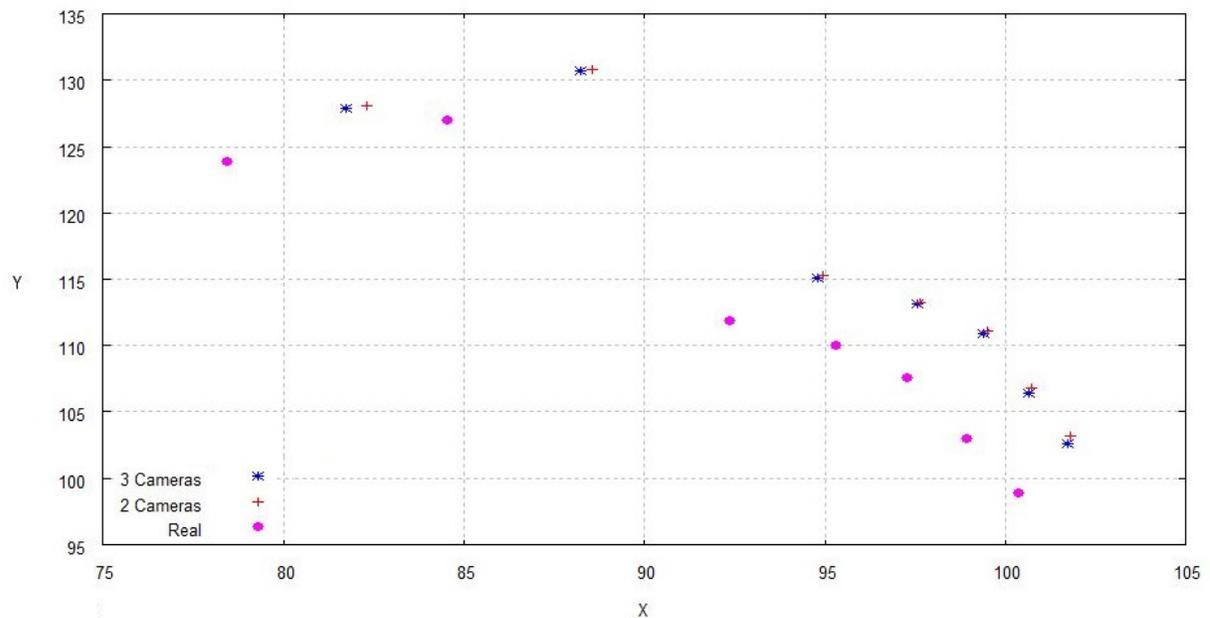
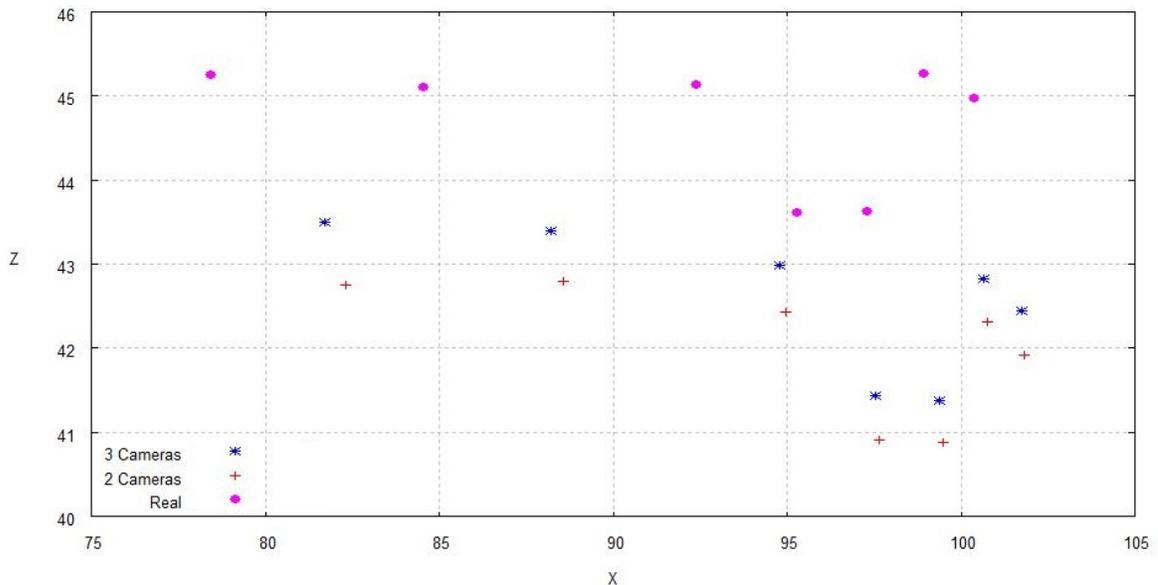


Figura 40 – Pontos de verificação - Visto de perfil



Os desvios-padrão obtidos para cada POE nos processamentos com o arranjo de duas câmeras são apresentados na Tabela 27, e os valores para os processamentos com três câmeras são apresentados na Tabela 28.

Tabela 27 – Desvios-padrão dos POE - 2C

TB	AB	ω	φ	κ	X_{CP}	Y_{CP}	Z_{CP}
2	1	1° 57' 10"	1° 57' 17"	1° 57' 09"	0,782	0,783	0,783
3	1	1° 30' 13"	1° 30' 30"	1° 30' 11"	0,605	0,606	0,607
4	1	1° 16' 22"	1° 16' 41"	1° 16' 16"	0,515	0,515	0,517
10	0	0° 25' 40"	0° 26' 49"	0° 25' 16"	0,222	0,230	0,219

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Tabela 28 – Desvios-padrão dos POE - 3C

TB	AB	ω	φ	κ	X_{CP}	Y_{CP}	Z_{CP}
2	1	2° 07' 30"	2° 07' 39"	2° 07' 29"	0,852	0,852	0,852
3	1	1° 42' 13"	1° 42' 31"	1° 42' 11"	0,686	0,686	0,687
4	1	1° 26' 28"	1° 26' 55"	1° 26' 22"	0,583	0,585	0,586
10	0	0° 25' 21"	0° 26' 32"	0° 25' 00"	0,220	0,229	0,216

TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

De acordo com as Tabelas 27 e 28, os POE obtidos no processamento sequencial tiveram maior precisão quando utilizado o arranjo com 2 câmeras. Em contrapartida, no processamento em lote, os POE obtidos com o arranjo de 2 câmeras tiveram precisão inferior aos obtidos pelo arranjo triangular. Analogamente ao experimento realizado na trajetória reta, a menor precisão dos POE estimados não resultaram na direta melhora da precisão posicional dos pontos de verificação. As Figuras 41 e 42 mostram os POE calculados no processamento em lote, para ambos os arranjos de câmeras.

Figura 41 – POE - Visto de cima

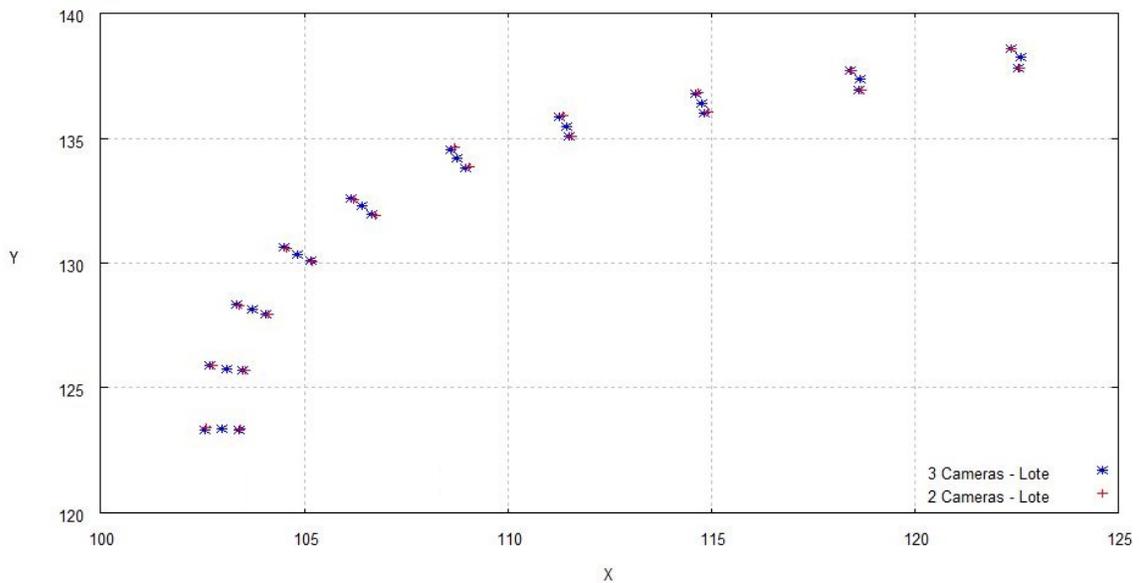
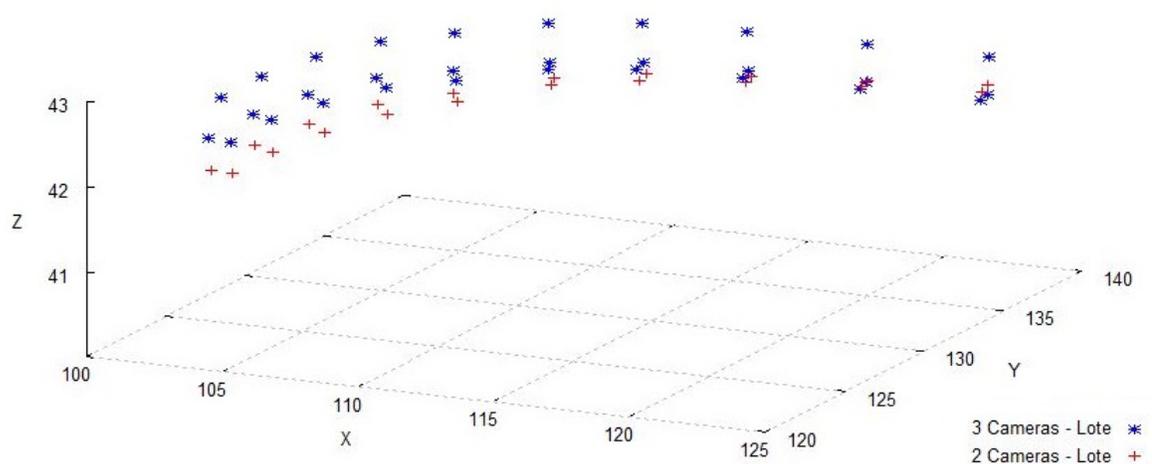


Figura 42 – POE - Visto de perfil



4.2.2 Análise: Sequencial x Lote e variações do tamanho do bloco e avanço de base

Para a análise do processamento em lote e sequencial em uma trajetória curva, foram utilizados os dados apresentados na Tabela 29, tais quais obtidos para ambos os processamentos e para cada arranjo de câmeras.

Tabela 29 – Lote x Sequencial

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
2	2	1	9	5,686	7,146	2,284	9,413
	10	0	1	2,768	3,775	2,727	5,418
3	2	1	9	5,747	6,832	1,821	9,112
	10	0	1	2,527	3,517	2,170	4,844

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 29, os resultados para os processamentos em lote e sequencial em uma trajetória curva foram análogos aos resultados obtidos para a trajetória reta, ou seja, o processamento em lote obteve melhores resultados para ambos os arranjos de câmeras. Mais uma vez, a propagação de erros de um bloco para seus subsequentes acaba resultando em baixa precisão para as estimativas dos blocos finais, tanto que, em algumas combinações do processamento sequencial não foi possível processar o trajeto por completo.

Similarmente às precisões dos pontos de verificação, estão as precisões obtidas para os POE nos processamentos em lote e sequencial. De modo geral, os desvios-padrão obtidos no processamento em lote são relativamente bem menores que os obtidos no processamento sequencial. A Tabela 30 apresenta os desvios-padrão obtidos para cada POE.

Tabela 30 – Desvios-padrão obtidos nos processamentos em lote e sequencial

CAM	TB	AB	ω	φ	κ	X_{CP}	Y_{CP}	Z_{CP}
2	2	1	1° 57' 10"	1° 57' 17"	1° 57' 09"	0,782	0,783	0,783
	10	0	0° 25' 40"	0° 26' 49"	0° 25' 16"	0,222	0,230	0,219
3	2	1	2° 07' 30"	2° 07' 39"	2° 07' 29"	0,852	0,852	0,852
	10	0	0° 25' 21"	0° 26' 32"	0° 25' 00"	0,220	0,229	0,216

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base.

Analisando a Tabela 30, conclui-se que em termos angulares, os valores obtidos no processamento sequencial chegaram a até 5 vezes o valor obtido no processamento em lote. Entretanto, essa diferença pode chegar a 4 vezes o valor do processamento em lote no caso dos parâmetros de posição.

Para se analisar a influência do tamanho do bloco na determinação das coordenadas dos pontos no espaço objeto, foram utilizados os dados dos processamentos sequenciais já apresentados na Tabela 25, e reapresentados na Tabela 31 por motivo de facilitar a visualização dos dados.

Tabela 31 – Resultados para os processamentos com três câmeras

CAM	TB	AB	SP	REMQ (m)			R (m)
				X	Y	Z	
3	2	1	9	5,747	6,832	1,821	9,112
3	3	1	8	5,649	6,730	1,895	8,989
3	4	1	7	4,989	7,216	1,933	8,983
3	10	0	1	2,527	3,517	2,170	4,844

CAM: número de câmeras, TB: tamanho do bloco, AB: avanço de base, SP: seqüências processadas.

Analisando a Tabela 31, apesar de não possuir todas as combinações possíveis de tamanho do bloco, é possível concluir que a precisão dos pontos de verificação aumentam de acordo com o também aumento do tamanho do bloco. Assim como no trecho reto, para o trecho em curva, as coordenadas que foram mais afetadas pela variação do tamanho do bloco foram as coordenadas X e Y. Nestas coordenadas, os valores de REMQ obtidos para o processamento sequencial com menor tamanho de bloco foram em torno de 2 vezes maiores se comparados com os valores obtidos do processamento com o maior tamanho de bloco possível (lote). Porém, para a coordenada Z, o mesmo não se aplica, nesta coordenada ocorreu um aumento do REMQ quando processadas as imagens em lote, entretanto, este aumento foi relativamente pequeno se comparado com os valores para X e Y. Assim como para X e Y, os valores das resultantes também foram menores no processamento em lote, em torno de até 50% dos valores do processamento sequencial.

Semelhantemente ao aumento do tamanho do bloco no processamento sequencial, a variação do avanço de base não resultou em bons processamento dos dados. Para o trecho em curva, só foi possível completar o caminhamento fotogramétrico quando utilizados avanços de base unitários. As demais combinações de processamentos com avanços de bases variados resultaram na não convergência do ajustamento da fototriangulação. Sendo assim, não foi possível analisar a influência da variação do avanço de base para o caminhamento fotogramétrico em trecho curvo.

4.3 Resumo das análises dos resultados

Nesta seção é apresentado um resumo das análises dos resultados apresentados nas seções 4.1 e 4.2.

4.3.1 2 x 3 câmeras

Para o trecho reto:

- 2 câmeras: X e Y melhores na maioria dos casos;
- 3 câmeras: Z em todos os casos e R na maioria.

De modo geral:

X, Y, Z e R

- 2 câmeras: melhor em 41,7% dos casos;
- 3 câmeras: melhor em 58,3% dos casos.

Apenas R

- 2 câmeras: melhor em 33,3% dos casos;
- 3 câmeras: melhor em 66,7% dos casos.

Para o trecho curvo:

- 2 câmeras: X foi melhor em metade dos casos;
- 3 câmeras: X em metade dos casos e Y, Z e R em todos.

De modo geral:

X, Y, Z e R

- 2 câmeras: melhor em 12,5% dos casos;
- 3 câmeras: melhor em 87,5% dos casos.

Apenas R

- 2 câmeras: melhor em 0% dos casos;
- 3 câmeras: melhor em 100% dos casos.

4.3.2 Lote x Sequencial

Lote obteve melhores resultados para todos os casos (reta e curva).

- Sequencial: grande propagação de erros de bloco a bloco.
- Lote: melhor distribuição dos erros pelo bloco

4.3.3 Tamanho do bloco

Quanto maior o bloco, menor a REMQ obtida para as coordenadas.

Para o trecho reto:

- Coordenadas X e Y foram as mais afetadas, redução à até 70% da REMQ do processamento com menor tamanho de bloco;
- Coordenada Z é menos sensível à variação;
- Resultante reduziu à aproximadamente 70% da REMQ.

Para o trecho curvo:

- Coordenadas X e Y foram as mais afetadas, redução à até 50% da REMQ do processamento com menor tamanho de bloco;
- Coordenada Z é menos sensível à variação, no entanto, o REMQ aumentou;
- Resultante reduziu à aproximadamente 50% da REMQ.

4.3.4 Avanço de base

- Reta: pequena melhora, em torno de 1%, não tão significativa;
- Curva: não foi possível analisar a variação do avanço de base.

5 Conclusões

Um sistema de mapeamento móvel é uma plataforma multissensorial que possibilita a rápida obtenção de informações ao seu entorno. Os sensores GNSS foram responsáveis pela determinação posicional das câmeras, e estas por sua vez, realizaram o imageamento da área percorrida. O caminhamento fotogramétrico é um modo especial de levantamento fotogramétrico em que o eixo de levantamento é aproximadamente paralelo ao eixo óptico das câmeras. Neste método de levantamento, as imagens foram tomadas sequencialmente, de modo que houve uma grande variação de escala entre bases consecutivas. Como forma de calcular os parâmetros de orientação exterior das câmeras e as coordenadas de pontos no terreno, foram utilizadas sucessivas fototriangulações por feixe de raios.

No que concerne aos sensores, este trabalho teve como proposta a utilização de sensores de baixo custo, e conseqüentemente, de pouca precisão. Após testes realizados com os sensores, foi observado que o sensor inercial não obtinha dados consistentes com a verdade de campo, sofrendo forte influência do campo magnético gerado pelos demais sensores e pela própria plataforma de mapeamento. Sendo assim, este tipo de sensor acabou se tornando ineficaz para o objetivo desejado. Em relação ao sensor GNSS, apesar deste também possuir pouca precisão, foi possível obter os parâmetros posicionais do sistema de forma satisfatória. Além disso, com os dados do sensor GNSS foi possível calcular parâmetros de atitude aproximados, o que acabou compensando, em parte, a ausência do sensor inercial.

Uma vez que a utilização de um par de câmeras em um SMM apresenta deficiência na determinação das coordenadas-objeto dos pontos, foi estudada a influência da adição de uma terceira câmera ao sistema, de modo a formar um arranjo coplanar triangular de câmeras. O arranjo triangular teve como objetivo aumentar a redundância de raios homólogos por pontos, de modo a permitir um ajuste desses raios, do ponto de vista geométrico.

Os experimentos mostraram que de fato a adição da terceira câmera ao arranjo contribuiu para a determinação das coordenadas dos pontos de enlace no espaço objeto. Esta melhora foi mais perceptível para a trajetória curva, onde a melhora foi verificada em 100% dos casos, enquanto que na trajetória reta, a melhora foi de 66.7%. Analisando cada coordenada isoladamente, o arranjo triangular obteve melhores resultados para as coordenadas Y e Z na trajetória curva e para Z na trajetória reta. O arranjo com duas câmeras obteve resultados melhores para a coordenada Y no trecho reto. Nos demais casos, houve um equilíbrio entre os resultados dos dois arranjos. Dessa forma, comprovou-

se que a adição da terceira câmera é benéfica para levantamentos em trechos de grande variação de atitude (curva), pois a redundância de observações melhorou a estimativa posicional do ponto de enlace no terreno.

No caso de trajetórias com pouca variação de atitude (reta), a adição da terceira câmera não se mostrou tão vantajosa, pois ao ter adicionado uma terceira câmera ao arranjo, foram inseridos mais parâmetros a serem estimados na triangulação sem que tenha havido uma melhora significativa na questão das observações. Uma possível solução a isto seria a introdução de observações relativas à distância de avanço do sistema, isto é, realizar a medição de quanto o sistema avançou entre duas exposições consecutivas. Portanto, como sugestão a trabalhos futuros tem-se a adição das observações de avanço do sistema, com a inserção de um odômetro ao SMM.

Juntamente com a variação do arranjo de câmeras, foi avaliado o processamento sequencial e em lote. Para ambos os trechos levantados (reta e curva), os resultados obtidos pelos respectivos processamentos em lote foram melhores para os dois arranjos de câmeras. Os experimentos mostraram que ao se realizar o processamento sequencial, houve uma grande propagação de erros entre as sucessivas triangulações realizadas, de modo que os últimos blocos acumularam os erros provenientes dos blocos processados anteriormente. Já no caso do processamento em lote, os erros foram distribuídos de modo mais homogêneo entre todas as bases levantadas.

Neste trabalho, foi analisado também o efeito da variação do tamanho do bloco e do avanço de base no processamento sequencial. Os experimentos mostraram que conforme era aumentado o tamanho do bloco processado, diminuía-se o erro médio obtido para cada coordenada, de modo que as coordenadas mais afetadas foram as coordenadas X e Y, reduzindo pela metade o erro médio obtido para cada uma delas. No entanto, para os processamentos na trajetória curva, alguns tamanhos de bloco utilizados resultaram na não convergência do processo de fototriangulação. Para a variação do avanço de base, conclui-se que o aumento deste melhora os resultados, pois diminui a quantidade de processamentos em sequência, e conseqüentemente, reduz a propagação de erros de um bloco para outro. No entanto, a contribuição da variação do avanço de base não é tão significativa quanto a variação do tamanho do bloco.

Por fim, com relação à automação do processo, foi possível concluir que a utilização dos algoritmos SIFT e RANSAC conjuntamente, permitiram identificar pontos homólogos com eficácia em meio à grande variação de escala entre as imagens. Foi detectada uma grande quantidade de pontos homólogos pertencentes a duas e três bases (6 e 9 imagens, respectivamente), de modo a permitir uma melhor concatenação entre as imagens de bases sucessivas. Além disso, foi possível realizar a integração de todos os softwares utilizados para cada processo da metodologia descrita.

Referências

- ANDRADE, J. B. de. *Fotogrametria*. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003.
- BARBOSA, R. L. *Caminhamento fotogramétrico utilizando o fluxo óptico filtrado*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.
- BLASECHI, V. *Caminhamento fotogramétrico com arranjo triangular de câmaras fotográficas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2016.
- BOSSLER, J. et al. Gps and gis map the nation's highways. *GeoInfo Systems Magazine*, March issue, p. 26–37, 1991.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.
- EL-SHEIMY, N.; SCHWARZ, K. P. Navigating urban areas by visat—a mobile mapping system integrating gps/ins/digital cameras for gis applications. *Navigation*, Wiley Online Library, v. 45, n. 4, p. 275–285, 1998.
- ELLUM, C.; EL-SHEIMY, N. Land-based mobile mapping systems. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, v. 68, n. 1, p. 13–17, 2002.
- FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, ACM, v. 24, n. 6, p. 381–395, 1981.
- FRYER, J. Camera calibration. *Close range photogrammetry and machine vision*, Whittler Publishing: Caithness, Scotland, UK, p. 156–179, 1996.
- GEMAEL, C. *Geodesia I. Notas Complementares*. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Paraná, 1972.
- GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Editora UFPr, 1994.
- GHOSH, S. K. *Fundamentals of computational photogrammetry*. [S.l.]: Concept Publishing Company, 2005. 254 p.
- GONZALES, G. L. G. *Aplicação da Técnica SIFT para Determinação de Campos de Deformações de Materiais*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2010.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. *Processamento digital de imagens*. [S.l.]: Pearson Education, 2009.
- HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Automatic calibration of low-cost digital cameras. *Optical Engineering*, International Society for Optics and Photonics, v. 42, n. 4, p. 948–955, 2003.

- HELMERT, F. R. *Theorieen der Höheren Geodäsie*. Teubner: Leipzig, 1880. 377 p.
- LEMES NETO, M. C. *Orientação semi-automática de uma sequência de pares de imagens frontais por fototriangulação a partir de fotocoordenadas extraídas pelo SIFT*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2014.
- LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, Springer, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.
- MERCHANT, D. C. *Analytical Photogrammetry Theory and Practice*. [S.l.]: Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, 1984.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J.; MCGLONE, J. *Introduction to Modern Photogrammetry*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 479 p.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Editora UNESP, 2007.
- NUNES, L. C. S. et al. Identification of material properties using fulfilled and non-contact measurements. *J. Braz. Soc. Mech. Sci & Eng*, v. 31, n. 3, jul 2009.
- OLIVEIRA, E. B. *Implementação do módulo de interseção fotogramétrica em um banco de imagens georreferenciadas*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2003.
- RACHID, C. L.; PEREIRA. AAS Algoritmos de busca SIFT e SURF no uso de dispositivos móveis. *II Encontro Multidisciplinar da Unipac Ubá (SEMULT)*. Minas Gerais, 2009.
- RUY, R. d. S. et al. Saapi: a lightweight airborne image acquisition system: design and preliminary tests. *Proceedings of the 7th Geomatic Week—High resolution sensors and their applications*, p. 1–8, 2007.
- SHAO, H. et al. Application of land-based mobile mapping system in wenchuan earthquake. In: *6th International Symposium on Mobile Mapping Technology*. [S.l.: s.n.], 2009.
- SILVA, F. A. *Georreferenciamento automático de placas de sinalização com imagens obtidas com um sistema móvel de mapeamento*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2012.
- SILVA, J. et al. A street map built by a mobile mapping system. *Int Arch Photogramm Remote Sensing*, v. 33, n. B2, p. 510–517, 2000.
- SILVA, J. F. C. *A inferencia bayesiana e a detecção e localização automática de erros grosseiros em fototriangulação por feixes de raios*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 1987.
- SILVA, J. F. C. *Fototriangulação no caminhamento fotogramétrico*. Presidente Prudente: [s.n.], 1997.
- SILVA, J. F. C.; OLIVEIRA, R. *Triangulation of a sequence of terrestrial digital images*. Cambridge, UK, 1998. 273–277 p.

SILVA, S. L. A. D.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados do tipo aruco na automação do processo de calibração de câmaras. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, v. 20, n. 3, p. 636, 2014.

TAO, C. V.; LI, J. *Advances in mobile mapping technology*. [S.l.]: CRC Press, 2007. v. 4.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. *Elements of Photogrammetry: with applications in GIS*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2000. v. 3.

WU, S. et al. L-mms used in railway applications. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 6.