



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FCT - Campus de Presidente Prudente

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

André Luís Olivete

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS OMNIDIRECIONAIS
GEORREFERENCIADAS COMO CONTROLE DE CAMPO
PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS**

Presidente Prudente
2014

André Luís Olivete

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS OMNIDIRECIONAIS
GEORREFERENCIADAS COMO CONTROLE DE CAMPO
PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Presidente Prudente

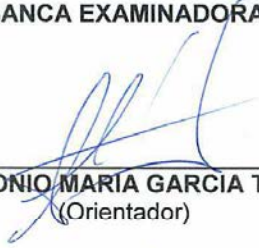
2014

Olivete, André Luís.
O111u Utilização de imagens omnidirecionais georreferenciadas como
controle de campo para orientação de imagens orbitais / André Luís
Olivete. - Presidente Prudente : [s.n], 2014
171 f.: il.

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Sistemas
omnidirecionais catadióptricos. 4. Georreferenciamento. 5. *Matching*
multiescala. I. Olivete, André Luís. II. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
(Orientador)



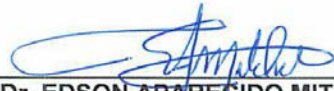
Prof. Dr. MAURICIO GALO
(UNESP/FCT)



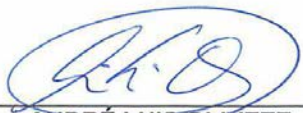
Prof. Dr. JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO DA SILVA
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. ROBERTO DA SILVA RUY
(SENSORMAP)



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA
(UFPr)



ANDRÉ LUIS OLIVETE

Presidente Prudente (SP), 29 de agosto de 2014.

Resultado: APROVADO

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha esposa Kátia, meu filho Luís Henrique, meus pais Celso e Cidnéa, e a toda minha família, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento da pesquisa não depende apenas de nossos esforços e dedicação, mas também de várias pessoas que nos apoiam e auxiliam nessa tarefa. Gostaria de agradecer sinceramente a todos que colaboraram com o trabalho e em particular:

À minha esposa Kátia e meu filho Luís Henrique pelo amor e compreensão nos momentos em que não foi possível dar a atenção devida.

Aos meus pais Celso e Cidnéa pelo carinho nesses anos de duras batalhas.

Ao professor Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela orientação acadêmica, auxílio na resolução dos problemas encontrados no desenvolvimento da pesquisa, nos trabalhos de campo em que sempre esteve presente e por ter oferecido a oportunidade de trabalhar nesse projeto.

Ao Eng. Cart. Thiago Tiedtke dos Reis, pelo auxílio no processamento dos dados de posicionamento, como pela montagem do sistema de alimentação e sincronismo.

Aos companheiros do grupo de pesquisa Marcato, Adilson e Marcus pelo auxílio prestado nos trabalhos de campo, processamento de dados e na resolução de dúvidas sobre assuntos da área de Engenharia Cartográfica.

Aos professores do Departamento de Cartografia da UNESP de Presidente Prudente, pelos conhecimentos passados durante as disciplinas cursadas.

Aos funcionários da UNESP de Presidente Prudente, pela ajuda, compreensão e disponibilidade no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

Com o aumento da utilização de imagens orbitais para a produção de cartas e ortoimagens, a eliminação de erros sistemáticos residuais causados pela imprecisão na determinação direta do movimento da plataforma é fundamental para atingir a precisão necessária. Esses erros podem ser corrigidos por meio de pontos de controle, mas o levantamento desses pontos representa parcela importante do tempo e custo para a geração do produto final, sendo esse custo relacionado tanto ao tempo gasto para o levantamento, como também à quantidade de profissionais e equipamentos requeridos para essa atividade. A hipótese deste trabalho é que a utilização de uma imagem de vista aérea do ponto de controle, juntamente com a posição precisa desse ponto, permitiria a determinação automática de correspondência entre essa vista aérea e a imagem orbital, determinando-se a posição do ponto de controle na imagem orbital. A imagem de vista aérea pode ser adquirida através de uma câmara catadióptrica com um espelho cônico direcionado para o solo e o eixo óptico da câmara apontado para esse espelho. O georreferenciamento da imagem catadióptrica pode ser realizado de forma rápida e em movimento com a utilização de um receptor GNSS integrado a uma unidade de medição inercial. Para validar esta hipótese desenvolveu-se neste projeto um sistema para coleta e processamento de imagens omnidirecionais catadióptricas georreferenciadas como controle de campo para a orientação de imagens orbitais. Foram desenvolvidos os elementos de hardware e software para o processamento geométrico e radiométrico das imagens coletadas, utilizados na produção de cenas com vista aérea, cujo ponto central possui coordenadas conhecidas e são localizadas nas imagens orbitais por métodos de correspondência por área. Foram realizados experimentos com imagens ALOS-PRISM, que mostraram a viabilidade de se obter correspondências corretas para um número suficiente de pontos que permitiram a correção geométrica da imagem.

Palavras chave: Visão omnidirecional, Georreferenciamento, Orientação de imagens orbitais, Matching multiescala

ABSTRACT

The increasing of the usage of satellite images in the maps and orthoimages production makes the elimination of residuals systematic errors, generated by inaccuracy in the direct determination of the platform motion, fundamental to achieving the necessary precision. These errors can be corrected through control points, but the survey of control points has great cost in the final product, which is related to time and number of professionals required for that activity. The use of an image with an aerial view of the control point, with the precise location of this point, would allow the automatic determination of correspondence between that aerial view and the orbital image, determining the control point position in the orbital image. The aerial view image may be acquired using a catadioptric camera with a conical mirror directed to the ground, and the camera optical axis pointed to this mirror. The georeferencing of catadioptric image may be performed in motion and quickly through the use of a GNSS receiver integrated with inertial measurement unit. This project aims to develop a system for collecting and processing georeferenced catadioptric omnidirectional images as ground control for satellite images orientation. Hardware and software elements have been developed for geometric and radiometric processing of the collected images. Those elements were used to produce scenes with aerial view whose central point has known coordinates and can be located in the orbital images by area based image matching methods. The experiments with ALOS-PRISM images showed that correct matches to a sufficient number of points were obtained, allowing geometric image correction.

Keywords: Omnidirectional vision, Georeferencing, Orbital image orientation, Multiscale matching

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ângulos de Atitude da Plataforma.....	25
Figura 2.2 - Efeitos causados pela variação dos ângulos de atitude.....	25
Figura 2.3 - Efeito na imagem causado pelo movimento de rotação da Terra.	26
Figura 2.4 - (a) alvo pré-sinalizado proposto, (b) perfil radiométrico suavizado do alvo, (c) imagem aérea, (d) intensidades do alvo localizado e (e) modelo ajustado das intensidades.....	34
Figura 2.5 - Geometria do sistema proposto por Cauchois et al. (1999) com os três sistemas de coordenadas.	39
Figura 2.6 - Representação de um Sistema Geocêntrico.....	43
Figura 2.7 - Sistema de Coordenadas do Veículo.....	44
Figura 2.8 – Componentes de uma IMU, com acelerômetros e giroscópios.	47
Figura 2.9 - (a) Integração com laço aberto (b) Integração com laço fechado.	48
Figura 2.10 - Problema gerado pela reamostragem.....	49
Figura 3.1 - Protótipo para determinar a configuração do espelho.	54
Figura 3.2 - Imagem feita com o espelho cônico.....	55
Figura 3.3 - Projeto do suporte do espelho com as medidas.	56
Figura 3.4 - Suporte com os equipamentos.	56
Figura 3.5 - Imagem catadióptrica em ambiente externo com lente de 6mm (adaptador).	57
Figura 3.6 - Imagem catadióptrica com a lente Bower de 8mm.	58
Figura 3.7 - Rack com os componentes do sistema de georreferenciamento.....	59
Figura 4.1 - Sistemas envolvidos no modelo de coordenadas polares.	63
Figura 4.2 - Reamostragem da imagem omnidirecional.....	64
Figura 4.3 - Interface da ferramenta <i>Curve Fitting Tool</i> (cftool) do MATLAB: na janela <i>Fitting</i> (esquerda) são definidos os parâmetros para o ajustamento do modelo e na janela da direita são apresentados os dados e o modelo ajustado e os resíduos resultantes do ajustamento.	67
Figura 4.4 - Vista aérea do ambiente usado na simulação com o POV-Ray.....	70
Figura 4.5 - Imagem gerada pela simulação com a câmara catadióptrica.	70
Figura 4.6 - Imagem gerada pela simulação com espelho esférico.	71
Figura 4.7 - Imagens reamostradas com modelo RFM. (a) RFM 3° grau e (b) RFM 4° grau.	75
Figura 4.8 - Imagens reamostradas com polinômios de (a) 6° e (b) 8° grau.	76
Figura 4.9 - Imagem reamostrada utilizando modelo de coordenadas polares.....	76
Figura 4.10 - Área utilizada como campo de calibração.....	77
Figura 4.11 - Sistema de coordenada local definido para o espaço objeto (estacionamento).	78
Figura 4.12 - Distribuição dos pontos de controle e verificação.	79
Figura 4.13 - Resultados da Estimação dos Parâmetros utilizando o RFM com Polinômios de 3° Grau.	81

Figura 4.14 - Resultados da Estimção dos Parâmetros utilizando o RFM com Polinômios de 4° Grau	81
Figura 4.15 - Resultados da Estimção dos Parâmetros utilizando o modelo de Coordenadas Polares.	82
Figura 4.16 - Resultados da Estimção dos parâmetros utilizando o modelo de Distância Polar com Polinômio Unidimensional de 6° Grau	83
Figura 4.17 - Resultados utilizando o modelo de Distâncias Polares com função Exponencial da Equação (4.17).	83
Figura 4.18 - Resultados utilizando o modelo de Distâncias Polares com Razão entre Polinômios apresentada na Equação (4.18).	84
Figura 4.19 - Imagem omnidirecional catadióptrica capturada com o sistema construído.	86
Figura 4.20 - Imagem reamostrada utilizando o modelo RFM de 4° grau.	87
Figura 4.21 - Imagem reamostrada utilizando o modelo de distâncias polares.	87
Figura 5.1 - Diagrama de blocos da metodologia para orientação de imagens orbitais utilizando imagens omnidirecionais georreferenciadas como controle de campo.	88
Figura 6.1 - Imagens omnidirecionais adquiridas com o sistema desenvolvido.	93
Figura 6.2 - Elementos utilizados no cálculo do desvio padrão e variância relacionada a uma posição de uma sequência de imagens.	94
Figura 6.3 - (a) Imagem normalizada dos desvios padrão e (b) imagem após a aplicação do limiar.	95
Figura 6.4 - Imagens envolvidas no processo de retirada da estrutura: (a) imagem omnidirecional reamostrada com GSD de 50cm, (b) máscara das áreas repetidas e (c) imagem sem as estruturas do sistema e do veículo.	96
Figura 6.5 - Imagem retificada e suas distorções causadas pelas irregularidades do espelho.	96
Figura 6.6 - Histograma da imagem orbital.	97
Figura 6.7 - Histograma dos canais de uma imagem omnidirecional.	98
Figura 6.8 - Transformação da imagem omnidirecional colorida em níveis de cinza.	99
Figura 6.9 – Imagens para a análise dos níveis de cinza com os polinômios apresentados.	101
Figura 6.10 - Gráficos dos resíduos dos processos de ajustamento com os polinômios.	102
Figura 6.11 - Janela de busca, referência e resultado do processo de correlação cruzada em locais onde não há características que identificam o ponto correto de correspondência dentro da janela de busca.	108
Figura 8.1 - Área de realização do experimento.	116
Figura 8.2 - Área imageada com a distribuição das rodovias.	117
Figura 8.3 - Produto ALOS/PRISM 1B2G - visada nadiral.	118
Figura 8.4 - Percorso realizado no experimento.	119
Figura 8.5 - Segmento 1 – Área entre Presidente Prudente e Presidente Bernardes.	119
Figura 8.6 - Segmento 2 - Presidente Prudente à Martinópolis.	120
Figura 8.7 - Segmento 3 - Presidente Prudente à Taciba.	120
Figura 8.8 - Segmento 4 - Pirapozinho, Narandiba e Tarabai.	120
Figura 8.9 - Segmento 5 – Presidente Prudente à Alfredo Marcondes.	121
Figura 8.10 - Imagem reamostrada com os parâmetros da imagem do campo de calibração.	123

Figura 8.11 - Distribuição dos pontos de controle no espaço objeto.....	125
Figura 8.12 - Comportamento dos resíduos no ajustamento por distâncias polares.....	126
Figura 8.13 - Resíduos do ajustamento utilizando polinômio para a distância polar.....	129
Figura 8.14 - Resíduos após a correção das distâncias polares.....	129
Figura 8.15 - Resultados com o ajustamento de distâncias polares com correção.....	130
Figura 8.16 - Resíduos em pixels em relação à distância polar do espaço objeto (metros).....	130
Figura 8.17 - Variação dos ângulos de arfagem (<i>pitch</i>) e rolagem (<i>roll</i>) nas imagens coletadas.	132
Figura 8.18 - Exemplo de área na imagem orbital com informações parciais de níveis de cinza. ..	134
Figura 8.19 - Resíduos resultantes do ajustamento dos pontos em relação à coordenada X.....	137
Figura 8.20 - Resíduos resultantes do ajustamento dos pontos em relação à coordenada Y.....	138
Figura 8.21 - Resíduos no final do processo de eliminação das correspondências com falsos-positivos utilizando transformação Afim.....	138
Figura 8.22 - Resíduos da coordenada Y no ajustamento com transformação Afim	139
Figura 8.23 - Resíduos da coordenada X no ajustamento com transformação Afim	139
Figura 8.24 - Distribuição dos pontos de controle na imagem para o conjunto com correlação superior a 50%.....	140
Figura 8.25 - Resultados do processamento.....	141
Figura 8.26 - Distribuição dos pontos do conjunto com correlação superior ou igual a 60%	141
Figura 8.27 - Resultados do processo de avaliação com o conjunto de dados com coeficiente de correlação igual ou superior a 60%.....	142
Figura 8.28 - Distribuição dos pontos de controle na imagem orbital.....	143
Figura 8.29 - Gráfico de agulhas mostrando os resíduos do ajustamento.	147
Figura 8.30 - Distribuição dos pontos de verificação.....	148
Figura 8.31 - Gráfico de agulhas para os erros resultantes dos pontos de verificação.	149
Figura 9.1 - Janela principal da aplicação com os dados do projeto atual.	151
Figura 9.2 - Estrutura da tabela com os dados de controle e verificação.....	151
Figura 9.3 - Interface para a importação dos pontos de controle e verificação utilizados na estimação dos parâmetros do modelo para reamostragem da imagem omnidirecional.....	152
Figura 9.4 - Janela de definição dos parâmetros para a calibração.....	153
Figura 9.5 - Janela de apresentação dos resultados da calibração.	153
Figura 9.6 - Janela de apresentação de dados da verificação dos pontos.....	154
Figura 9.7 - Janela de reamostragem das imagens omnidirecionais	155
Figura 9.8 - Janela de visualização das imagens reamostradas.....	156
Figura 9.9 - Interface da aplicação desenvolvida para coletar as observações e estimar os parâmetros da transformação em níveis de cinza.....	157
Figura 9.10 - Interface para análise visual das imagens transformadas em níveis de cinza com os polinômios propostos.	157
Figura 9.11 - Janela de importação dos dados GNSS/INS.	158
Figura 9.12 - Interface de apresentação dos gráficos referentes aos dados GNSS/INS durante o trajeto realizado.	159

Figura 9.13 - Janela de visualização dos pontos de controle na imagem georreferenciada.	160
Figura 9.14 - Interface de localização dos pontos na imagem orbital.....	161
Figura 9.15 - Interface para a análise da correspondência.	162
Figura 9.16 - Interface para a análise das discrepâncias.	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultado da avaliação dos pontos de verificação para o modelo RFM de 3º grau.....	72
Tabela 4.2 - Resultado da avaliação dos pontos de verificação para o modelo RFM de 4º grau.....	73
Tabela 4.3 - Resultados para o modelo de polinômio para distâncias polares de 6º grau.....	73
Tabela 4.4 - Resultados para o modelo de polinômio para distâncias polares de 8º grau.....	74
Tabela 4.5 - Resultados para o modelo de coordenadas polares.	74
Tabela 4.6 - Comparação entre os modelos propostos.	74
Tabela 4.7 – Estatísticas dos resíduos do processo de estimação dos parâmetros dos modelos.....	80
Tabela 4.8 - Resultado da análise das discrepâncias dos pontos de verificação.....	85
Tabela 6.1 - Análise dos resíduos do ajustamento com os polinômios, onde os valores são as discrepâncias entre os níveis de cinza estimados com os modelos e os medidos na imagem orbital.....	102
Tabela 6.2 - Análise dos resíduos com a retirada da observação com grande resíduo.	102
Tabela 6.3 - Estatísticas do processo de correspondência comparando o modelo padrão de conversão em níveis de cinza e o modelo de ajuste proposto.	104
Tabela 6.4 - Comparação das correspondências corretas e falsos-positivos da conversão padrão de níveis de cinza e do modelo de ajustamento proposto.	104
Tabela 6.5 - Correspondência utilizando o ajuste com imagens do segmento 1.....	105
Tabela 6.6 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 2.	106
Tabela 6.7 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 3.	106
Tabela 6.8 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 4.	106
Tabela 6.9 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 5.	107
Tabela 6.10 - Comparação das quantidades de correspondências para cada um dos limiares, utilizando ajustamento dos níveis de cinza com imagens do segmento 1 e do próprio segmento.	107
Tabela 6.11 - Comparação das correspondências corretas e falsos-positivos utilizando ajustamento dos níveis de cinza com imagens do segmento 1 e do próprio segmento.	108
Tabela 8.1 - Precisão estimada das medidas - Segmento 1.....	121
Tabela 8.2 - Precisão estimada das medidas - Segmento 2.....	122
Tabela 8.3 - Precisão estimada das medidas - Segmento 3.....	122
Tabela 8.4 - Precisão estimada das medidas - Segmento 4.....	122
Tabela 8.5 - Precisão estimada das medidas - Segmento 5.....	122
Tabela 8.6 - Informações sobre as imagens registradas durante o trabalho de campo.	133
Tabela 8.7 - Resultados do processo de correspondência.....	134

Tabela 8.8 - Resultados da análise visual das correspondências com coeficiente de correlação superior à 60%.	135
Tabela 8.9 - Resultados da análise visual das correspondências com coeficiente de correlação superior à 50%.	135
Tabela 8.10 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 1.	135
Tabela 8.11 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 2.	136
Tabela 8.12 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 3.	136
Tabela 8.13 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 4.	136
Tabela 8.14 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 5.	136
Tabela 8.15 - Informações sobre o processo de eliminação dos falsos-positivos nas correspondências com coeficientes de correlação superiores a 50%.	137
Tabela 8.16 - Informações sobre o processo de eliminação dos falsos-positivos nas correspondências com coeficientes de correlação superiores a 60%.	139
Tabela 8.17 - Valores do desvio padrão dentro de uma cena (Fonte: Jaxa, 2008) e os limiares para eliminação de pontos.....	143
Tabela 8.18 - Pontos de controle utilizados na correção geométrica da imagem orbital.....	145
Tabela 8.19 - Pontos de verificação.....	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Pontos de verificação com as coordenadas no espaço objeto (cm) e imagem (pixels). .	71
Quadro 8.1 - Coordenadas das extremidades da área do experimento.....	117
Quadro 8.2 - Características da imagem ALOS/PRISM utilizada no experimento.	118
Quadro 8.3 - Coeficientes dos polinômios do modelo estimados com o ajustamento.....	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
AOCS	Attitude and Orbital Control Systems – Sistemas de Controle de Órbita e Atitude
AVNIR-2	Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2
CBERS	China-Brazil Earth-Resources Satellite - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CCD	Charge-Coupled Device - Dispositivo de Carga Acoplada
CTP	Conventional Terrestrial Pole - Pólo Terrestre Convencional
DGPS	Differential GPS - – Posicionamento diferencial GPS
DLT	Direct Linear Transformation - Transformação Linear Direta
DoD	Department of Defense - Departamento de Defesa
GCC	Gnu C Compiler
GCC	Ground Control Chip - Chips de Controle de Terreno.
GNSS	Global Navigation Satellite System - Sistemas Globais de Navegação por Satélite
GPS	Global Positioning System - Sistema de Posicionamento Global
GSD	Ground Sample Distance – elemento de resolução do terreno
HRC	High Resolution Camera - Câmara de Alta Resolução
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service - Serviço Internacional de Rotação da Terra e Sistemas de Referência
IGS	International GNSS Service - Serviço de GNSS Internacional
IMU	Inertial Measurement Unit - Unidade de Medição Inercial
INS	Inertial Navigation System - Sistema de Navegação Inercial
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency - Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno

NAVSTAR-GPS	Navigation Satellite with Time and Ranging - Global Positioning System
NNSS	Navy Navigation Satellite System - Sistema de Satélite para Navegação de Aeronaves
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
POE	Parâmetros de Orientação Exterior
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRISM	Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RFM	Rational Function Model - Modelo de Funções Racionais
RPC	Rational Polynomial Coefficients – Coeficientes Polinomiais Racionais
SAAPI	Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens Digitais
SAR	Synthetic Aperture Radar – Radar de Abertura Sintética
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SYCLOP	Conic SYstem for LOcalization and Perception – Sistema cônico de localização e percepção
UTM	Universal Transverse Mercator – Universal Transversa de Mercator
WGS72	World Geodetic System 1972 - Sistema Geodésico Mundial de 1972
WGS84	World Geodetic System 1984 - Sistema Geodésico Mundial de 1984

SUMÁRIO

1. Introdução	20
1.1. Considerações iniciais	20
1.2. Objetivos	22
1.3. Estrutura do trabalho	23
2. Fundamentação teórica	24
2.1. Imagens orbitais	24
2.1.1. Fontes das distorções geométricas nas imagens orbitais	24
2.1.2. Modelos rigorosos	27
2.1.3. Modelos não rigorosos ou generalizados	29
2.1.4. Orientação de imagens orbitais	32
2.1.5. Localização automática de pontos de controle	33
2.1.6. Controle de qualidade	34
2.2. Sistemas Omnidirecionais	37
2.3. Orientação direta com integração GNSS/INS	42
2.3.1. Sistemas de coordenadas	42
2.3.2. Sistema de Posicionamento Global (GPS)	45
2.3.3. Sistema de Navegação Inercial (INS)	46
2.3.4. Integração GNSS/INS	47
2.4. Técnicas de processamento de imagens	49
2.4.1. Retificação	49
2.4.2. Reamostragem	49
2.5. Correspondência de Imagens	50
3. O Sistema Catadióptrico Omnidirecional	53
3.1. Definição do sistema omnidirecional	53
3.2. Determinação das características do espelho	54
3.3. Confecção do espelho	55
3.4. Confecção do suporte da câmara e seus componentes	55
3.5. Escolha do sistema de lentes	57
3.6. Sistema de georreferenciamento	58
3.6.1. Funcionamento do sistema de georreferenciamento	59
4. Definição e análise dos modelos não rigorosos	61
4.1. Modelos não rigorosos	61
4.1.1. Modelo de funções racionais	61
4.1.2. Modelo das distâncias polares com polinômio unidimensional	62
4.1.3. Modelo de distâncias polares com outras funções de mapeamento	65

4.1.4.	Modelo de coordenadas polares.....	67
4.2.	Análise dos modelos matemáticos com imagens geradas por simulação	69
4.2.1.	Modelagem do sistema e do ambiente	69
4.2.2.	Geração das imagens.....	70
4.2.3.	Avaliação da adequação dos modelos	71
4.2.4.	Reamostragem das imagens	75
4.3.	Análise do modelo matemático com imagens reais capturadas com o sistema construído ..	77
4.3.1.	Campo de calibração.....	77
4.3.2.	Pontos de controle e verificação.....	79
4.3.3.	Análise dos resíduos	80
4.3.4.	Avaliação dos pontos de verificação.....	84
4.3.5.	Reamostragem das imagens	85
5.	Metodologia para orientação e controle de qualidade de imagens orbitais utilizando imagens omnidirecionais georreferenciadas como controle de campo	88
5.1.	Preparação	89
5.2.	Trabalho de campo.....	89
5.3.	Calibração do sistema catadióptrico.....	90
5.4.	Georreferenciamento.....	90
5.5.	Correção geométrica e radiométrica da imagem omnidirecional.....	91
5.6.	Orientação (correção geométrica) da imagem orbital.....	91
5.7.	Análise de qualidade	91
6.	Processamento das imagens omnidirecionais	92
6.1.	Reamostragem das imagens omnidirecionais.....	92
6.2.	Correção dos ângulos de atitude do sensor omnidirecional	92
6.3.	Determinação das áreas de imagem pertencentes a estrutura da câmara e ao veículo	93
6.4.	Determinação da área útil da imagem reamostrada.....	96
6.5.	Ajuste da resolução espacial e radiométrica da imagem omnidirecional.....	97
6.5.1.	Ajuste da intensidade da imagem omnidirecional.....	98
7.	Metodologia para a correspondência entre as imagens omnidirecionais e a imagem orbital.....	109
7.1.	Processo de localização dos pontos de controle	109
7.2.	Determinação da janela de busca	110
7.3.	Método de correspondência	113
7.4.	Eliminação das correspondências com falsos positivos	113
8.	Experimento prático – Imagem ALOS/PRISM.....	116
8.1.	Área do experimento	116
8.2.	Imagem orbital	117
8.3.	Percurso para levantamento dos pontos de controle	119
8.4.	Processamento dos dados GNSS/INS	121
8.5.	Reamostragem das imagens omnidirecionais.....	122
8.6.	Utilização de imagens de campo (rodovia) na estimação dos parâmetros do modelo	123

8.7.	Modelo de coordenadas polares com correção de distância utilizando função seno ajustada	126
8.8.	Estimação dos parâmetros para a reamostragem das imagens omnidirecionais.....	128
8.9.	Correção dos ângulos de atitude.....	131
8.10.	Localização das imagens omnidirecionais georreferenciadas na imagem orbital	133
8.11.	Eliminação dos falsos-positivos.....	136
8.12.	Avaliação da qualidade do produto ALOS/PRISM.....	140
8.13.	Correção geométrica	142
9.	Software desenvolvido	150
9.1.	Estimação dos parâmetros para a reamostragem das imagens omnidirecionais.....	151
9.2.	Análise dos pontos de verificação referentes ao processo de calibração	154
9.3.	Reamostragem das imagens omnidirecionais.....	155
9.4.	Definição dos parâmetros para a conversão RGB para níveis de cinza.....	156
9.5.	Importação das coordenadas e ângulos de atitude das imagens omnidirecionais.....	158
9.6.	Visualização dos pontos de controle estimados na imagem orbital.....	160
9.7.	Localização dos pontos de controle na imagem orbital	160
9.8.	Análise interativa da correspondência.....	161
9.9.	Controle de qualidade	163
10.	Conclusões.....	164
10.1.	Considerações finais	164
10.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	165
	Referências	167

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As imagens orbitais possuem distorções sistemáticas produzidas no momento de sua aquisição. Essas distorções estão relacionadas à rotação da terra durante a aquisição da imagem, distorções panorâmicas, curvatura da terra, e variações na altitude, velocidade e atitude da plataforma (RICHARDS, 2013).

Com a crescente utilização dessas imagens para a coleta de informações espaciais, mapeamento fotogramétrico e aplicações de sensoriamento remoto, onde a exatidão do referenciamento é requerida, há a necessidade de aplicar correções geométricas nas imagens, ou corrigir os parâmetros orbitais. Essas correções são realizadas com a utilização de pontos de controle ou feições lineares como rodovias e divisas de propriedades.

Os pontos de controle devem ser levantados em campo com a utilização de receptores GNSS com imagens ou descrições desses pontos. Com as coordenadas dos pontos de controle e suas homólogas nas imagens orbitais é possível calcular a posição da plataforma e sua atitude, bem como os elementos não lineares que descrevem o deslocamento desta plataforma.

No processo de orientação de imagens ou correção geométrica de imagens já retificadas, a medição na imagem da posição correspondente ao ponto levantado em campo é feita pela observação da descrição do ponto e pela identificação da área equivalente na imagem. Este processo é sujeito a erros grosseiros e uma imagem aérea de alta resolução do ponto de controle poderia mitigar esse problema, como proposto por Malmström (1986), que usou recortes (*chips*) de imagens aéreas para a localização automática destes pontos em imagens orbitais. Outros trabalhos similares foram posteriormente desenvolvidos como o apresentado por Gianinetto and Scaioni (2008).

A alternativa de imagem de vista aérea com alta resolução que se pretende investigar neste projeto são as imagens omnidirecionais catadiópticas, que são utilizadas como pontos de controle. Esse projeto investiga também a utilização dessas imagens na automatização do processo de localização do ponto de controle na imagem orbital.

As imagens omnidirecionais são bastante utilizadas em visão computacional e robótica, principalmente como panoramas, visando diminuir a quantidade de câmaras utilizadas principalmente para navegação autônoma (SANTOS FILHO et al., 2005). Um sistema de visão omnidirecional é aquele que permite a aquisição de imagens com um campo de visão aumentado, podendo chegar à 360°. Geralmente esses sistemas possuem visão hemisférica, sendo que o imageamento não é contínuo na direção zenital.

Esses sistemas podem ser obtidos através da combinação das imagens provenientes de uma única câmara que gira em torno de um eixo, de imagens oriundas de diversas câmaras, de

câmaras com lentes fisheye ou através da combinação de uma câmara com um espelho (SANTOS FILHO et al., 2005; GRASSI JR e OKAMOTO JR, 2006).

Os sistemas formados por câmaras e espelhos são conhecidos por câmaras omnidirecionais catadióptricas, e com as imagens omnidirecionais catadióptricas é possível gerar imagens panorâmicas ou retificadas com vista aérea.

No presente trabalho foi construído um sistema catadióptrico utilizando um espelho cônico pela maior simplicidade no processo de usinagem, como também pela diminuição das distorções causadas pelos espelhos com curvatura radial (SPACEK, 2005).

A retificação dessas imagens necessita de um modelo para o sensor, que pode ser rigoroso ou empírico. Em um modelo rigoroso há significado físico em todos os parâmetros do modelo (CAUCHOIS et al., 1999). Nos modelos empíricos, os parâmetros não são relacionados a grandezas físicas, como o modelo de funções racionais - RFM (*Rational Function Model*), no qual são utilizadas razões entre polinômios para mapear o relacionamento entre os pontos do espaço imagem e espaço objeto (HU et al., 2004), bem como modelos que utilizam a transformação de coordenadas cartesianas em coordenadas polares, e funções para modelar as variações do raio entre o espaço imagem e o objeto (KANNALA e BRANDT, 2006; LUBER e REULKE, 2010).

O georreferenciamento direto das imagens omnidirecionais catadióptricas pode ser realizado por um receptor GNSS integrado com uma unidade de medida inercial (TOMMASELLI et al., 2007). Com a integração entre a IMU e o receptor GNSS, os dados de orientação exterior podem ser determinados até mesmo em áreas onde os sinais dos satélites são interrompidos por um curto espaço de tempo.

O processo de localização e medição automática de pontos de controle consiste na determinação de correspondência entre o ponto de controle no terreno e a imagem orbital ou aérea, e tem como resultado a coordenada (c, l) desse ponto na imagem.

Os pontos de controle no terreno podem ser alvos definidos no terreno, como proposto por Drewniok e Rohr (1995), feições, como proposto em Dal Poz e Tommaselli (1999) que utilizaram feições lineares como rodovias, ou imagens de alta resolução georreferenciadas como proposto por Malmström (1986) e Berveglieri e Tommaselli (2013).

Nesse trabalho, a imagem catadióptrica retificada georreferenciada é utilizada como uma janela de referência para localização de seu correspondente na imagem orbital. Entretanto, as grandes diferenças geométricas e radiométricas entre as imagens exigem o desenvolvimento de novos modelos e técnicas de ajuste.

Esta pesquisa segue os termos de referência de várias comissões da ISPRS e contribui para a área com a automatização da localização de pontos de controle em imagens orbitais bem como a utilização de modelos empíricos para a modelagem do sensor catadióptrico omnidirecional.

No contexto das imagens omnidirecionais, da correspondência entre imagens multi-sensores e da modelagem de sensores utilizando modelos empíricos, o presente trabalho propõe solução para os seguintes problemas:

1. Utilização das imagens omnidirecionais catadióptricas na automação do processo de correção geométrica de imagens orbitais;
2. Aplicação de modelos empíricos para a modelagem de um sensor catadióptrico com espelho cônico;
3. Utilização de correspondência por área para a localização de imagens de pontos de controle de alta resolução em imagens orbitais de menor resolução.

A utilização de imagens omnidirecionais georreferenciadas visa otimizar o processo de correção geométrica e orientação de imagens orbitais e aérea, pela diminuição dos custos e tempo gasto no processo de levantamento dos pontos de controle, e medição dos pontos correspondentes na imagem.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é investigar a utilização de imagens omnidirecionais georreferenciadas para automatizar o processo de localização de pontos de controle em imagens orbitais.

Para alcançar o objetivo proposto pelo presente trabalho foram desenvolvidas as seguintes atividades:

1. Implementar fisicamente o sistema de captura de imagens omnidirecionais catadióptricas georreferenciadas com espelho cônico;
2. Definir um modelo empírico para a retificação das imagens omnidirecionais catadióptricas através de testes com vários modelos da literatura, como o modelo de funções racionais e o modelo de distância polar;
3. Especificar o processo de estimação dos parâmetros para o modelo definido através do método dos mínimos quadrados;
4. Especificar os processos de reamostragem e melhoramento radiométrico das imagens omnidirecionais;
5. Estudar o problema de correspondência entre a imagem omnidirecional reamostrada (e georreferenciada) com uma janela da imagem orbital;
6. Testar experimentalmente a abordagem proposta com dados reais;

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em dez capítulos. No primeiro capítulo é apresentado um panorama do problema, com as justificativas e as propostas do projeto.

O Capítulo 2 mostra a fundamentação teórica para o entendimento do trabalho, com uma revisão sobre as imagens orbitais, imagens omnidirecionais, georreferenciamento direto e técnicas de processamentos de imagens.

No Capítulo 3 é apresentado o sistema omnidirecional catadióptrico georreferenciado, com a determinação das características do espelho, a confecção do espelho cônico e a confecção da estrutura para a montagem do sistema omnidirecional. Nesse capítulo também é apresentada a montagem e organização do sistema de georreferenciamento para o sistema omnidirecional.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos modelos não rigorosos, onde são apresentados os modelos matemáticos, e as análises dos modelos utilizando imagens simuladas e imagens reais capturadas com o sistema construído. No quinto capítulo é apresentada a metodologia para orientação e correção geométrica de imagens orbitais proposta nesse trabalho.

No Capítulo 6 é apresentado o processamento realizado sobre as imagens omnidirecionais, onde são detalhados os processos de reamostragem, correção dos ângulos de atitude, segmentação e remoção das áreas pertencentes às estruturas do sistema omnidirecional, e o ajuste dos níveis de cinza da imagem.

O sétimo capítulo apresenta a metodologia para correspondência entre as imagens omnidirecionais e as imagens orbitais, detalhando o processo de localização dos pontos de controle, determinação das janelas de busca e a forma de eliminação das correspondências com falsos-positivos. No Capítulo 8 é apresentado o experimento prático utilizando uma imagem ALOS/PRISM, com a discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 9 é apresentado o software desenvolvido para fornecer suporte à metodologia proposta, e no último capítulo são apresentadas as contribuições do projeto para a área de fotogrametria e sensoriamento remoto, como também propostas de projetos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo será apresentada a fundamentação teórica que permite o entendimento e desenvolvimento da proposta. Na primeira seção são apresentadas as imagens orbitais com suas características, o processo de formação e uma revisão da literatura sobre os modelos utilizados na orientação dessas imagens.

A Seção 2 aborda as imagens omnidirecionais, suas características e o sistema catadióptrico omnidirecional com espelho cônico com os modelos matemáticos utilizados na retificação da imagem obtida.

Na terceira seção são abordadas as tecnologias utilizadas para o georreferenciamento direto de imagens, onde os detalhes do funcionamento do GNSS e do INS serão apresentados, como também, as possíveis formas de integração dessas tecnologias visando uma melhor qualidade nos parâmetros de orientação externa do sistema e, na última seção, são apresentadas as técnicas de processamento de imagens relacionadas ao desenvolvimento do projeto.

2.1. IMAGENS ORBITAIS

Os sensores de quadro das câmaras convencionais registram toda a imagem simultaneamente, ou seja, as intensidades de todos os pixels dessa imagem são capturadas em um mesmo instante de tempo.

Os sensores orbitais utilizam sensores de varredura linear, nos quais a aquisição da imagem é realizada linha a linha conforme o movimento orbital da plataforma, e a aquisição da imagem não é instantânea, cada uma das linhas é capturada em um instante t .

Devido às características dos sensores de varredura linear, as imagens produzidas por sensores remotos orbitais possuem erros e distorções sistemáticas introduzidas no momento de sua aquisição. Nesta seção são apresentadas as principais fontes de erros e distorções, como também os modelos matemáticos para as correções geométricas dessas imagens.

2.1.1. Fontes das distorções geométricas nas imagens orbitais

O conhecimento das fontes de distorções geométricas é o primeiro passo para a definição de modelos para sua correção. As distorções são provenientes de diferentes fontes: plataforma (satélite), atmosfera, Terra e sensor (RICHARDS, 2013).

2.1.1.1. Distorções causadas pela plataforma

A principal fonte das distorções causadas pela plataforma está relacionada a pequenas alterações nos ângulos de atitude durante o imageamento. Esses ângulos são as rotações do satélite

ao redor de seu centro de massa em relação ao sistema de eixos da plataforma, conhecidos como ângulos de rolamento, arfagem e guinada. Esses ângulos de atitude são representados na Figura 2.1.

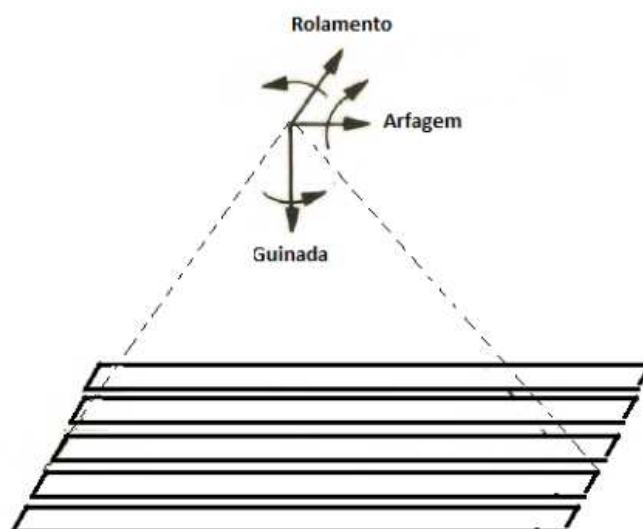


Figura 2.1 - Ângulos de Atitude da Plataforma.
Fonte: Adaptado de Richards (2013)

Richards (2013) afirma que essas variações na atitude da plataforma são mais comuns e maiores em aeronaves do que em satélites, devido à maior estabilidade das plataformas orbitais, porém há um aspecto negativo: a variação de pequenos ângulos de atitude é ampliada em decorrência da grande distância entre o solo e o sensor.

As variações de ângulo de atitude produzem efeitos diferentes sobre a imagem, provocando rotações, deslocamentos transversais e longitudinais em relação a direção de varredura do sensor. Estes efeitos podem ser visualizados na Figura 2.2.

A variação de altitude da plataforma (deslocamento ao longo do eixo Z) provoca uma mudança na escala das imagens, aumentando a largura da faixa. As variações ao longo dos eixos X e Y causam efeitos semelhantes aos da arfagem e rolagem, respectivamente, causando, em relação ao eixo X, sobreposições ou vazios entre as linhas de varredura, e, em relação a Y, um deslocamento transversal em relação à varredura.

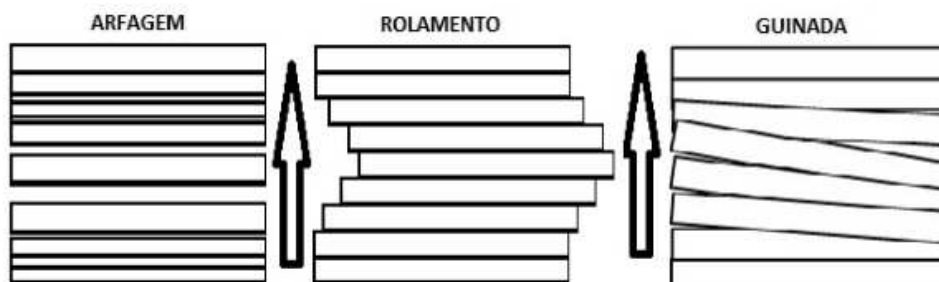


Figura 2.2 - Efeitos causados pela variação dos ângulos de atitude.
Fonte: Adaptado de Richards (2013)

2.1.1.2. Deformações introduzidas pela Terra e atmosfera

A refração atmosférica provoca um deslocamento na posição dos objetos. Quanto maior a altitude e o ângulo em relação ao nadir, maior a necessidade de correção. Um modelo para o cálculo da refração pode ser encontrado em Andrade (1998) e em Richards (2013).

Em relação à superfície terrestre há distorções causadas pela curvatura do modelo utilizado, o movimento de rotação e ao relevo da área a ser imageada.

A curvatura do modelo adotado para a superfície terrestre acentua o efeito de distorção panorâmica, ampliando o tamanho do elemento de resolução no terreno à medida que este se afasta do nadir e este efeito é agravado para visadas oblíquas.

O deslocamento relativo entre o satélite e a Terra, provocado pelo movimento de rotação, gera um deslocamento das linhas da imagem no sentido transversal à varredura, pois as imagens dos sensores de varredura não são formadas instantaneamente. Esse efeito é o responsável pelo aspecto de paralelogramo das imagens corrigidas. A Figura 2.3 exemplifica o problema causado pelo movimento da rotação da terra (RICHARDS, 2013).



Figura 2.3 - Efeito na imagem causado pelo movimento de rotação da Terra.
Adaptado de Richards (2013)

O deslocamento devido ao relevo é uma das principais fontes de distorção geométrica. Na visada nadir, com sensores de média ou baixa resolução, esse deslocamento pode ser desprezado, mas para visadas oblíquas ou imagens de alta resolução a topografia do terreno deve ser considerada e, para isso, é necessário a utilização de um MDT (Modelo Digital do Terreno) ou MDS (Modelo Digital de Superfície).

Considerando a existência dessa grande quantidade de erros e distorções, as imagens geradas necessitam de correções geométricas; para isso são utilizados modelos, que visam eliminar ou mitigar esses problemas. Os modelos matemáticos para correção podem ser classificados em rigorosos e empíricos.

2.1.2. Modelos rigorosos

Os modelos rigorosos visam descrever as propriedades físicas do sensor e partem do princípio de colinearidade. Para desenvolver tais modelos matemáticos, faz-se necessário o conhecimento de dados de calibração do sensor, informações da órbita e atitude, que nem sempre estão disponíveis.

2.1.2.1. Equações de colinearidade

As equações de colinearidade são a base da Fotogrametria, pois relacionam os parâmetros da orientação exterior, as coordenadas fotogramétricas de um ponto e as coordenadas tridimensionais do espaço objeto desse mesmo ponto (KRAUS, 2007).

A modelagem matemática para a condição de colinearidade são as Equações (2.1) e (2.2).

$$x = (-f) \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.1)$$

$$y = (-f) \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.2)$$

nas quais:

- x e y são as coordenadas fotogramétricas;
- f é a distância focal;
- X, Y, Z são as coordenadas do ponto no espaço objeto;
- X_0, Y_0, Z_0 são as coordenadas do centro de perspectiva no espaço objeto;
- r_{ij} são os elementos da matriz de rotação R , composta pelo produto das matrizes de rotações em relação a κ , φ e ω , resultando no conjunto de Equações 2.3.

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos(\kappa) * \cos(\varphi) \\ r_{12} &= \cos(\kappa) * \sin(\varphi) * \sin(\omega) + \sin(\kappa) * \cos(\omega) \\ r_{13} &= -\cos(\kappa) * \sin(\varphi) * \cos(\omega) + \sin(\kappa) * \sin(\omega) \\ r_{21} &= -\sin(\kappa) * \cos(\varphi) \\ r_{22} &= -\sin(\kappa) * \sin(\varphi) * \sin(\omega) + \cos(\kappa) * \cos(\omega) \\ r_{23} &= \sin(\kappa) * \sin(\varphi) * \cos(\omega) + \cos(\kappa) * \sin(\omega) \\ r_{31} &= \sin(\varphi) \\ r_{32} &= -\cos(\varphi) * \sin(\omega) \\ r_{33} &= \cos(\varphi) * \cos(\omega) \end{aligned} \quad (2.3)$$

As equações de colinearidade, mesmo sendo desenvolvidas para imagens de quadro, podem ser utilizadas em qualquer modelo geométrico de imageamento, desde que adaptadas.

O modelo de sensor de varredura linear possui duas abordagens diferentes de modelagem utilizando a equação de colinearidade: a primeira utiliza polinômios para modelar os parâmetros de orientação exterior durante o tempo e a segunda utiliza informações de órbita para definir os parâmetros de orientação exterior durante a varredura.

2.1.2.2. Equações de colinearidade para sensores de varredura linear

No modelo de colinearidade, modificado para o caso do sensor de varredura linear, são incorporados polinômios para modelar a geometria de deslocamento desses sensores. As Equações (2.4) e (2.5) representam o modelo de colinearidade adaptado para a geometria de varredura linear, nas quais o valor da coordenada x é igualado a zero, pois o movimento da plataforma é ao longo desta direção e a linha é considerada como sendo obtida instantaneamente (KIM e DOWMAN, 2006).

$$x=0=(-f) \cdot \frac{r_{11}(X-X_s)+r_{12}(Y-Y_s)+r_{13}(Z-Z_s)}{r_{31}(X-X_s)+r_{32}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s)} \quad (2.4)$$

$$y=(-f) \cdot \frac{r_{11}(X-X_s)+r_{12}(Y-Y_s)+r_{13}(Z-Z_s)}{r_{31}(X-X_s)+r_{32}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s)} \quad (2.5)$$

nas quais:

- x, y são as coordenadas fotogramétricas da imagem;
- X, Y, Z são as coordenadas de um ponto no terreno;
- f é a distância focal;
- X_s, Y_s, Z_s são as coordenadas do centro perspectivo do sistema sensor, em um determinado instante, no referencial de terreno;
- $r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{33}$ são os elementos da matriz de rotação em função dos ângulos ω, φ e κ , em um determinado instante de tempo.

No sensor de varredura linear, cada uma das linhas é obtida num instante de tempo t , possuindo seis parâmetros de orientação exterior ($X_s, Y_s, Z_s, \kappa_s, \omega_s, \varphi_s$) por linha. Esses parâmetros podem ser modelados por polinômios de segundo grau (KIM e DOWMAN, 2006).

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\ \varphi_s &= \varphi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\ \omega_s &= \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

nas quais:

- $X_0, Y_0, Z_0, \kappa_0, \omega_0, \varphi_0$ são os parâmetros de orientação exterior da primeira linha;
- $a_1, a_2, \dots, a_6, b_1, b_2, \dots, b_6$ são os coeficientes polinomiais do modelo matemático;
- $X_s, Y_s, Z_s, \kappa_s, \omega_s, \varphi_s$ são os parâmetros de orientação exterior do instante t ;
- t é um instante de tempo do imageamento da linha.

Como citado no item 2.1.1.1 alguns desses parâmetros possuem alta correlação, apresentando mesmo efeito na imagem, como uma pequena variação em ω_s que tem o mesmo efeito que uma pequena mudança em Y_s ; o mesmo ocorre com φ_s e X_s . Dessa forma é possível eliminar do conjunto de parâmetros ω_s ou Y_s , e φ_s ou X_s , e utilizar o modelo de 12 parâmetros a seguir.

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Nesse modelo, os ângulos de rotação utilizados não são físicos, ou seja, não estão relacionados à plataforma, ao sensor ou à Terra, sendo considerado apenas o sistema de referência do espaço imagem e do espaço objeto. Em Marcato Jr et al. (2011b) foi utilizado o modelo de colinearidade com dados de órbita para a orientação de imagens CBERS-2B. Esse modelo, onde os parâmetros não rigorosos do modelo anterior são eliminados, é representado pela Equação (2.8).

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_i \begin{bmatrix} R_{Sensor}^{Órbita} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_{Órbita}^{Terreno} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_i - X_s \\ Y_i - Y_s \\ Z_i - Z_s \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde:

- $R_{Sensor}^{Órbita}$ é a matriz de rotação do sistema de referência do sensor para o sistema de referência Orbital;
- $R_{Órbita}^{Terreno}$ é a matriz de rotação do sistema de referência orbital para o sistema de referência terrestre.

2.1.3. Modelos não rigorosos ou generalizados

Os modelos generalizados ou não rigorosos têm seus parâmetros de orientação modelados com termos polinomiais. Os modelos não rigorosos mais frequentemente usados são o Modelo de Função Racional (RFM - *Rational Function Model*) e Transformação Linear Direta (DLT - *Direct Linear Transformation*).

Esses modelos não rigorosos não necessitam das informações referentes às efemérides, as atitudes do satélite e à geometria do sensor. Em Marcato Jr. et al. (2011a) é realizada uma comparação entre esses modelos e o modelo rigoroso, onde foi verificado que o RFM alcançou resultados muito próximos aos resultados obtidos pelo modelo rigoroso.

2.1.3.1. Transformação Linear Direta (DLT)

A DLT é um modelo matemático que não exige os parâmetros de orientação interior e exterior do sensor, sendo utilizado quando a geometria do sensor não é conhecida, para a determinação dos parâmetros do modelo, utiliza-se um conjunto de pontos de controle geometricamente bem distribuídos na imagem e com coordenadas conhecidas no espaço objeto. Esse modelo considera que a imagem foi obtida de forma instantânea (quadro).

As funções da DLT relacionam as coordenadas 2D do espaço imagem e as coordenadas 3D do espaço objeto (ABDEL-AZIZ e KARARA, 1971) e são representadas pelas Equações (2.9) e (2.10).

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2.9)$$

$$y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2.10)$$

Uma característica importante da DLT para câmeras de quadro é a possibilidade de determinar os parâmetros de orientação exterior e interior do sensor, pois esses parâmetros são componentes dos parâmetros da DLT (BARDSLEY e LI, 2007).

2.1.3.2. RFM – Rational Function Model

O Modelo de Funções Racionais é um modelo empírico baseado em funções polinomiais para a modelagem de sensores e seus parâmetros são conhecidos como Coeficientes Polinomiais Racionais (*Rational Polynomial Coefficients* - [RPC]). O RFM faz o mapeamento entre os pontos do espaço objeto e no espaço imagem através de uma razão entre polinômios (HU et al., 2004).

Os modelos polinomiais e DLT são casos específicos do RFM. Em Tao e Hu (2001) o mapeamento das coordenadas dos pontos do espaço objeto para as coordenadas no sistema imagem utiliza as Equações (2.11) e (2.12).

$$c_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (2.11)$$

$$l_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (2.12)$$

onde:

- l_n e c_n são as coordenadas normalizadas da linha e coluna de um pixel na imagem;
- X_n , Y_n e Z_n são as coordenadas normalizadas de X , Y e Z do espaço objeto e;
- a_{ijk} , b_{ijk} , c_{ijk} e d_{ijk} são coeficientes polinomiais, chamados de coeficientes das funções racionais.
- m_1 , m_2 e m_3 são os graus do polinômio em relação a X , Y e Z respectivamente.

A normalização para cada um dos componentes (c , l) das coordenadas no espaço imagem e (X , Y , Z) das coordenadas do espaço objeto é realizada da seguinte forma:

1. Determinar o menor e o maior valor dentro do conjunto;
2. Calcular a amplitude dos valores do conjunto através da diferença entre o maior e menor valor, que indica a escala a ser aplicada nos valores do componente;
3. Subtrair o menor valor encontrado do valor de todos os componentes do conjunto;
4. Dividir o resultado do passo 3 pela amplitude calculada no passo 2;
5. Com esse procedimento os valores l , c , X , Y e Z de cada um dos pontos de controle estarão normalizados entre 0 e 1.

Os polinômios P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , quando m_1 , m_2 e m_3 forem igual a 3, possuem a forma da Equação (2.13).

$$\begin{aligned}
 p = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k = & a_0 + a_1 Z + a_2 Y + a_3 X + a_4 ZY + a_5 ZX \\
 & + a_6 YX + a_7 Z^2 + a_8 Y^2 + a_9 X^2 + a_{10} ZYX \\
 & + a_{11} Z^2 Y + a_{12} Z^2 X + a_{13} Y^2 Z + a_{14} Y^2 X \\
 & + a_{15} ZX^2 + a_{16} YX^2 + a_{17} Z^3 + a_{18} Y^3 + a_{19} X^3
 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Os RPCs podem ser determinados de duas formas: independente do terreno, utilizando o modelo físico do sensor ou dependente do terreno (sem o uso do modelo físico do sensor) (TAO e HU, 2001).

Na abordagem independente do terreno, os coeficientes do RFM são definidos através de um ajustamento entre uma grade definida na imagem e essa grade projetada no espaço objeto com a utilização do modelo físico do sensor no espaço objeto.

A abordagem dependente do terreno é utilizada quando o modelo do sensor não é conhecido, sendo necessário o levantamento de pontos de controle e de verificação da forma convencional. Essa abordagem é dependente do relevo do terreno, do número de pontos de controle e da sua distribuição na imagem. A abordagem dependente do terreno é bastante popular na retificação de imagens orbitais, quando o modelo físico rigoroso do sensor não é conhecido.

A determinação dos RPCs (coeficientes dos polinômios), é realizada com a utilização de n pontos no espaço objeto (projetados com a utilização do modelo físico do sensor ou levantados em campo) e suas respectivas fotocoordenadas.

A solução do sistema de equações formado com essas informações é dada pelo método dos mínimos quadrados na forma direta ou iterativa (HU et al., 2004 e TAO e HU, 2001).

As principais características do Modelo de Funções Racionais, apresentadas em Tao e Hu (2001) e Hu et al. (2004), são:

- Uma forma genérica de polinômios, sendo que o modelo de transformação projetiva e o modelo de transformação linear direta podem ser entendidos como um Modelo de Funções Racionais de primeira ordem;
- Suporta qualquer tipo de sistema de coordenadas do espaço objeto;
- O ajustamento é complexo e pode alcançar grande acurácia, mas pode falhar quando o denominador chegar a zero;
- O processo de detecção e remoção de erros grosseiros é complexo;
- A implementação desse modelo é mais simples em relação aos modelos rigorosos, e não necessita do conhecimento da geometria do sensor, nem mesmo sua orientação exterior.

Em Rodrigues et al. (2009) o RFM foi utilizado na ortorectificação de imagens do sensor HRC do satélite CBERS 2B. O processo de ortorectificação por RFM mostrou-se uma metodologia alternativa, eficiente e altamente utilizável quando não se dispõe de dados e informações necessárias para a utilização de modelos rigorosos.

Em aplicações de menor rigor de posicionamento, o RFM pode ser utilizado para diferentes tipos de sensores de média e alta resolução espacial, desde que se disponha de pontos de controle em quantidades suficientemente adequadas para a estimativa dos RPCs.

Marcato Jr. et al. (2011a) realizaram uma comparação entre o modelo rigoroso do sensor e os modelos empíricos (Polinomiais, Funções Racionais, Projeção Afim e DLT) em imagens orbitais do ALOS, e através da análise dos resultados, foi verificado que o RFM é o modelo empírico que mais se aproxima do rigoroso, conseguindo erros de mesma magnitude.

2.1.4. Orientação de imagens orbitais

O processo de orientação de imagens consiste na estimação dos Parâmetros de Orientação Exterior (POE) de uma imagem. A orientação pode ser realizada de forma direta, com a utilização de sensores embarcados, ou indireta, com a estimação dos parâmetros de um modelo matemático rigoroso através de um ajustamento utilizando as coordenadas de pontos de controle no espaço objeto e suas respectivas fotocoordenadas. Em imagens orbitais, os dados de órbita do satélite, presentes nos metadados, podem ser utilizados nesse processo.

Nos sensores de quadro há um conjunto de seis POE para cada imagem, sendo as três rotações entre os sistemas e as três coordenadas do centro perspectivo. Em sensores de varredura linear há um conjunto de seis POE para cada uma das linhas da imagem, implicando em um número elevado de parâmetros por imagem, sendo necessária uma grande quantidade de pontos de controle ou feições lineares.

Alternativas para a solução desse problema são a utilização de polinômios para descrever as efemérides e atitude do sensor no intervalo de coleta da imagem, ou a utilização dos dados de órbita e atitude do sensor, apresentados na seção 2.1.2.2.

O modelo mais utilizado no processo de orientação de imagens é o modelo de colinearidade com a utilização de pontos de controle para estabelecer o relacionamento entre o espaço imagem e objeto, porém alguns artigos utilizam feições lineares com o modelo de coplanaridade no processo de orientação, como apresentado nos trabalhos de Medeiros e Tommaselli (2006), e Dal Poz e Scalco (2006), ou também a combinação de feições lineares e pontos, como proposto por Marcato Jr (2011).

2.1.5. Localização automática de pontos de controle

A localização automática de pontos de controle vem sendo estudada desde o início da Fotogrametria Digital, e até os dias atuais continua sendo um assunto em pauta nas revistas científicas especializadas. Gülch (1995), apresenta os requisitos importantes a serem considerados para a medição automática de pontos de controle.

O processo de localização automática de pontos de controle consiste na determinação de correspondência entre o ponto de controle com coordenadas de terreno (janela de referência), e a imagem orbital ou aérea onde esse ponto deve ser localizado (janela de busca) e tem como resultado a coordenada (c, l) desse ponto na imagem.

Essa tarefa é de grande importância para que a orientação de imagens orbitais, fototriangulação e outras tarefas, que dependam dos dados dos pontos de controle, sejam realizadas de forma automática, sem a intervenção de um operador humano. A utilização de sistemas integrados GNSS/INS trouxeram grandes avanços nessa área com a possibilidade de orientação direta das imagens (CRAMER et al., 2000), mas, mesmo com estes dados, há necessidade de pontos de controle para corrigir erros sistemáticos e para realizar o controle de qualidade do processo.

Drewniok e Rohr (1995) propuseram pré-sinalizar os pontos de controle, com a utilização de um tipo específico de alvo circular e uma abordagem baseada nesse modelo de marcas para localizar esses pontos na imagem com precisão subpixel.

A Figura 2.4 apresenta o alvo proposto, a imagem aérea desse alvo, o perfil radiométrico para a imagem suavizada do alvo proposto, as intensidades e o modelo ajustado desse alvo. A utilização prática dessa proposta não é viável, devido à quantidade de pontos necessários e sua distribuição dentro de uma cena, principalmente se for considerada para uma imagem orbital.

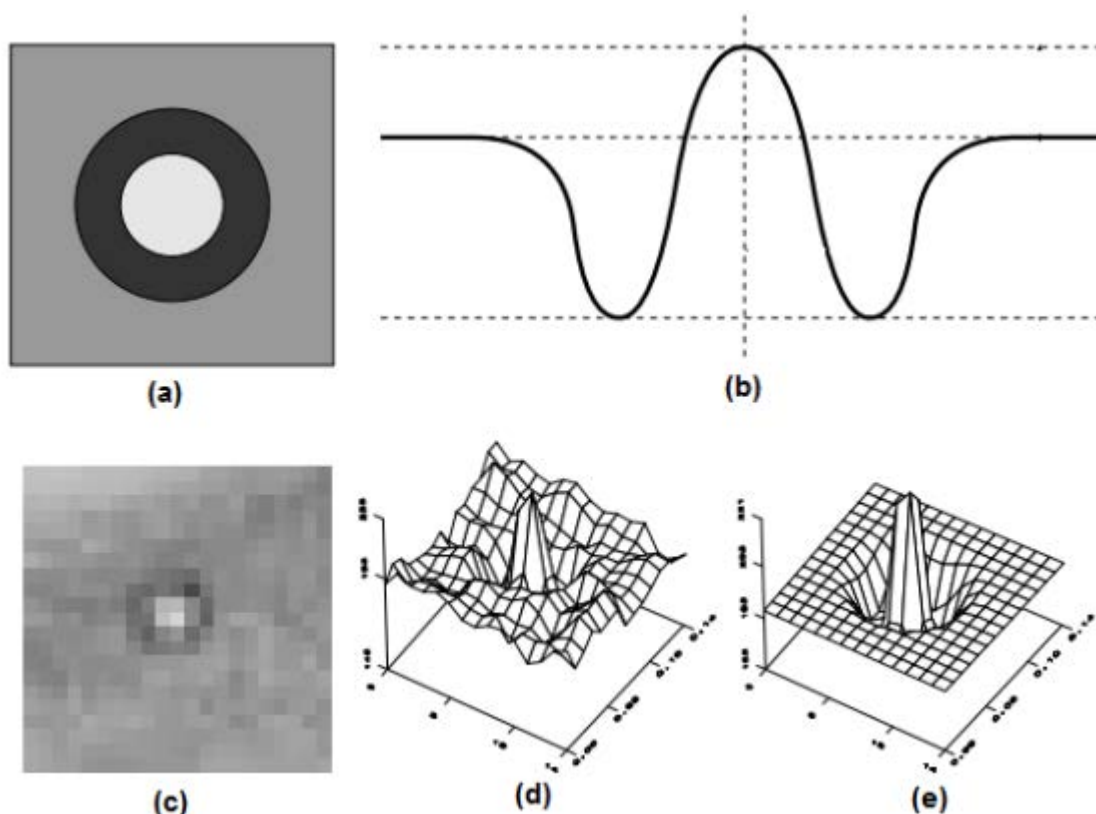


Figura 2.4 - (a) alvo pré-sinalizado proposto, (b) perfil radiométrico da imagem suavizada do alvo, (c) imagem aérea, (d) intensidades do alvo localizado e (e) modelo ajustado das intensidades

Fonte: Adaptado de Drewniok e Rohr (1995).

A utilização de imagens georreferenciadas como pontos de controle foi proposta por Malmström (1986), e denominada de *Ground Control Chip* (GCC), ou Chips de controle. Neste caso, utilizou fotografias aéreas de alta resolução digitalizadas, cujos recortes foram comparados à uma imagem orbital por correlação.

Em Dal Poz e Tommaselli (1999) foi proposta uma metodologia para automatizar a orientação exterior com a utilização de feições lineares, através da extração de rodovias em imagens aéreas.

Berveglieri e Tommaselli (2013) propõem a localização automática de pontos de controle em imagens aéreas com a utilização de imagens terrestres georreferenciadas e a correspondência por área com ajuste subpixel por mínimos quadrados, com o objetivo de realizar a triangulação em blocos por feixes perspectivos. Em Tommaselli et al. (2013) é abordada a utilização de plataformas móveis na geração de cenas de pontos de controle.

2.1.6. Controle de qualidade

A qualidade do produto cartográfico, de acordo com a ICA - *International Cartographic Association* (GUPTILL e MORRISON, 1997), tem como aspectos importantes:

- Qualidade posicional – associada à precisão e exatidão das coordenadas medidas na carta, tanto planimétrica quanto altimétrica.

- Linhagem – informações referentes a confecção do produto, como método utilizado na produção, data da confecção, tipo de coleta dos dados e material utilizados.
- Fidelidade dos atributos – fidelidade das características em relação a uma feição ou conjunto de feições sobre a superfície terrestre.
- Completeza – relacionada a quantidade de informações que estão ausentes ou que não devem estar presentes em uma carta.
- Consistência lógica – trata das regras lógicas de estrutura, das regras de atributos para dados espaciais e a compatibilidade de um dado em relação a outros em um conjunto de dados.
- Fidelidade à semântica – refere-se à qualidade com o qual os objetos geográficos são relacionados com o modelo utilizado.
- Temporalidade – está relacionada à data da coleta das informações e pode influenciar todos os outros aspectos.

A qualidade posicional é o parâmetro mais importante, principalmente quando se relaciona a ortofotos e imagens georreferenciadas orbitais, pois os outros parâmetros não se enquadram para esse tipo de produto.

No Brasil, todos os documentos cartográficos devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, definido por lei, no Decreto nº 89.817/84 onde são estabelecidas as Normas Técnicas da Cartografia Nacional (BRASIL, 1984).

A análise da qualidade posicional da imagem orbital consiste na análise de precisão e a análise de tendência, que permite avaliar a acurácia do produto.

2.1.6.1. Análise de precisão

A análise de precisão é realizada através da comparação entre o desvio padrão das discrepâncias com o EP (Erro Padrão) especificado pelo PEC (GALO e CAMARGO, 1994).

Essa análise visa avaliar as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos observados no produto e as medidas obtidas em campo, com procedimentos e equipamentos de maior exatidão que os utilizados na confecção da carta.

O processo de análise da precisão consiste em uma sequência de passos apresentada a seguir.

1º - Cálculo das discrepâncias em X , Y e Z para cada um dos pontos, onde ΔX_i , ΔY_i e ΔZ_i são as discrepâncias; X_i^c , Y_i^c e Z_i^c são as coordenadas calculadas pela imagem; e X_i^t , Y_i^t e Z_i^t são as coordenadas obtidas com o levantamento em campo.

$$\begin{aligned}
\Delta X_i &= X_i^c - X_i^t \\
\Delta Y_i &= Y_i^c - Y_i^t \\
\Delta Z_i &= Z_i^c - Z_i^t
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

2° - Calcular a média das discrepâncias dos pontos.

$$\begin{aligned}
\overline{\Delta X} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \\
\overline{\Delta Y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Y_i \\
\overline{\Delta Z} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

3° - Calcular o desvio padrão das discrepâncias.

$$\begin{aligned}
S_{\Delta X} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2} \\
S_{\Delta Y} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta Y_i - \overline{\Delta Y})^2} \\
S_{\Delta Z} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta Z_i - \overline{\Delta Z})^2}
\end{aligned}
\tag{2.16}$$

4° - Calcular o valor do qui-quadrado (χ^2) amostral, visando determinar o nível de dispersão dos erros aleatórios. Para isso é necessário especificar o desvio padrão esperado utilizando o EP definido pelo PEC, sendo que:

$$\sigma = \frac{EP}{\sqrt{2}}
\tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
\chi_X^2 &= (n-1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \\
\chi_Y^2 &= (n-1) \frac{S_{\Delta Y}^2}{\sigma_Y^2} \\
\chi_Z^2 &= (n-1) \frac{S_{\Delta Z}^2}{\sigma_Z^2}
\end{aligned}
\tag{2.18}$$

5° - Realizar o teste do qui-quadrado (χ^2) avaliando as hipóteses em (2.19).

$$\begin{aligned}
|\chi_X^2| &\leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \\
|\chi_Y^2| &\leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \\
|\chi_Z^2| &\leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2
\end{aligned}
\tag{2.19}$$

Se as hipóteses em (2.19) forem avaliadas como verdadeiras, o produto atende a precisão estabelecida pelas normas brasileiras de qualidade, caso contrário, o produto deve ser refeito com informações mais precisas.

2.1.6.2. Análise de tendência

De acordo com Galo e Camargo (1994), a análise de tendência permite avaliar a acurácia da carta e para isso é utilizado o teste “t” de *Student*, que permite verificar se os erros sistemáticos e aleatórios estão dentro do limite aceitável.

$$\begin{aligned}t_x &= \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} n^{1/2} \\t_y &= \frac{\overline{\Delta Y}}{S_{\Delta Y}} n^{1/2} \\t_z &= \frac{\overline{\Delta Z}}{S_{\Delta Z}} n^{1/2}\end{aligned}\tag{2.20}$$

Com o cálculo de *t* para todas as coordenadas, as hipóteses abaixo devem ser satisfeitas para que o produto atenda as condições de exatidão requeridas.

$$\begin{aligned}|t_x| &\leq t_{(n-1, \alpha/2)} \\|t_y| &\leq t_{(n-1, \alpha/2)} \\|t_z| &\leq t_{(n-1, \alpha/2)}\end{aligned}\tag{2.21}$$

Se uma das hipóteses em (2.21) não for satisfeita, há tendência em uma direção específica, indicando a existência de problemas, ou seja, a presença de erro sistemático. Conhecendo a fonte e a magnitude, o efeito pode ser minimizado subtraindo de cada coordenada do produto o erro estimado.

Em Souza e Loch (2007) é aplicada essa metodologia para avaliar e posteriormente melhorar a qualidade geométrica do modelo digital de elevação da *Shuttle Radar Topography Mission*.

2.2. SISTEMAS OMNIDIRECIONAIS

Um sistema de visão omnidirecional é aquele que permite a aquisição de imagens com um campo de visão horizontal de 360° possibilitando a expansão do campo de visão de uma câmara convencional. Os sensores omnidirecionais podem ser construídos com o uso de várias câmaras, mecanismos de rotação, lentes *fisheyes* ou com lentes e espelhos.

Devido às suas características, esses sistemas apresentam algumas desvantagens relacionadas ao custo de desenvolvimento, dificuldade na modelagem matemática, dificuldade de sincronismo e grande quantidade de processamento na retificação das imagens.

Os sistemas multicâmaras utilizam várias câmaras dispostas ao redor de um ponto formando um círculo ou esfera, gerando uma imagem panorâmica com alta resolução geométrica. Entretanto, tais sensores têm alto custo, devido à grande quantidade de dispositivos de imageamento utilizados (SAWHNEY e KUMAR, 1997 e SWAMINATHAN e NAYAR, 1999).

Os sensores rotativos utilizam motores para executar o movimento de rotação de uma câmara em torno de um eixo com uma velocidade angular constante, capturando um conjunto de imagens do ambiente. Esses sistemas possuem construção mais complexa e geram imagens com grande resolução. A imagem omnidirecional do ambiente é formada com a mosaicagem do conjunto de imagens capturadas em diferentes instantes (HAGGREN et al., 2004).

A câmara *fish-eye* permite adquirir uma imagem com um grande ângulo de visão em tempo real. As câmaras com lentes *fisheyes* aumentam a escala dos objetos que estão no centro da imagem e diminuem para os objetos que estão nos extremos da imagem. Isso significa que a imagem obtida possui maior resolução na região central e mais pobre nas áreas periféricas (YAGI, 1999).

Os sensores catadióptricos são formados por lentes e espelhos. Os principais espelhos utilizados na construção desse tipo de sensor são planos, cônicos, hiperbólicos, parabólicos e esféricos.

Uma das propriedades mais importantes dos sistemas catadióptricos é a correspondência entre os pontos da cena e os da imagem, que requer um processo de calibração detalhado, sendo a modelagem dependente do formato do espelho (BAKER e NAYAR, 1999).

Esse sistema pode possuir um único ponto de vista, situação em que todos os raios do espaço objeto convergem para um mesmo ponto, sendo também conhecido como sensor omnidirecional central, que facilita a modelagem, calibração e retificação. Alguns sistemas catadióptricos, entretanto, possuem múltiplos pontos de vista.

Baker e Nayar (1999) fizeram uma análise matemática detalhada dos formatos dos espelhos que atualmente são utilizados em câmaras catadióptricas e concluíram que apenas os espelhos hiperbólicos e parabólicos possuem a característica de um efetivo ponto de vista único.

Nalwa (1996) propôs uma câmara omnidirecional catadióptrica com espelhos planos, na qual os espelhos são montados em um formato de pirâmide e cada um dos lados dessa pirâmide é imageado por uma câmara precisamente posicionada para formar um efetivo ponto de vista único. Essa solução depende do posicionamento correto das câmaras e do ângulo exato de inclinação dos espelhos.

O espelho hiperbólico é o mais utilizado na construção de imagens omnidirecionais, pois a câmara a ser utilizada é perspectiva e há um efetivo ponto de vista único. Os problemas na utilização de espelhos hiperbólicos são o posicionamento da câmara em relação ao espelho e a complexidade na sua confecção, sendo necessária a utilização de equipamentos mais sofisticados e com maior precisão no processo de usinagem (BAKER e NAYAR, 1999).

O cone possui o ponto de vista efetivo único no topo do cone, que é praticamente impossível de ser posicionado em câmaras reais. Lin e Bajcsy (2006) propuseram retirar o topo do cone para a colocação da câmara ou colocar o topo do cone na frente do ponto focal da lente. Essas soluções exigem que a câmara seja posicionada precisamente muito próxima ao espelho, o que resulta em dificuldades na captura, como também a diminuição da iluminação.

A solução proposta por Spacek (2005) consiste em colocar a câmara em uma distância arbitrária confortável com área de captura útil, porém com múltiplos pontos de vista dispostos em círculos ao redor da ponta do cone. Esse relaxamento da distância da câmara representa um benefício concreto em relação com espelhos hiperbólicos ou a abordagem de Lin e Bajcsy (2006).

As grandes vantagens do espelho cônico, segundo Spacek (2005), são: o processo de usinagem do espelho é bem simples, pois não possui curvatura radial; e devido a não existência da curvatura radial, não há um aumento nas distorções radiais.

Os artigos de Cauchois et al. (1999) e Brassart et al. (2000) apresentam a modelagem do sistema SYCLOP, formado por uma câmara e um espelho cônico, para um sistema de visão para robôs. A Figura 2.5 apresenta a geometria do sistema proposto com os três sistemas de coordenadas diferentes.

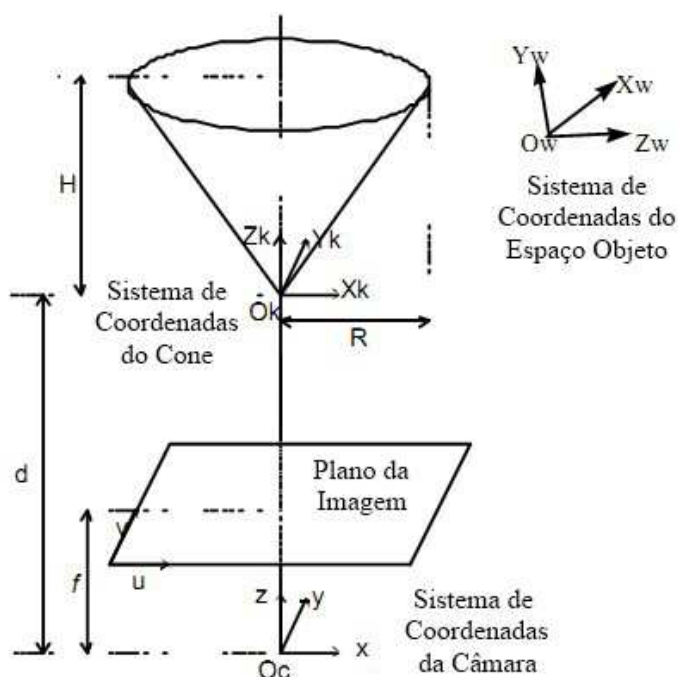


Figura 2.5 - Geometria do sistema proposto por Cauchois et al. (1999) com os três sistemas de coordenadas.
Fonte: Cauchois et al. (1999).

O modelo completo de transformação dos pontos do espaço objeto para o espaço imagem de uma câmara catadióptrica com espelho cônico definido por Brassart et al. (2000) é composto por três etapas.

1. A transformação do sistema de coordenadas do espaço objeto para o sistema de coordenadas do cone: essa é uma transformação de corpo rígido, onde há apenas três rotações e três translações, não havendo mudança de escala. Nas Equações (2.22),

(2.23) e (2.24), P_{Xw} , P_{Yw} e P_{Zw} são as coordenadas do ponto no espaço objeto, P_{Xk} , P_{Yk} e P_{Zk} são as coordenadas do ponto no sistema de coordenadas do cone, r' é a matriz de rotação entre os dois sistemas de coordenadas e t'_x , t'_y e t'_z são as translações a serem realizadas respectivamente em relação aos eixos X, Y e Z.

$$P_{Xk} = r'_{11} \cdot P_{Xw} + r'_{12} \cdot P_{Yw} + r'_{13} \cdot P_{Zw} + t'_x \quad (2.22)$$

$$P_{Yk} = r'_{21} \cdot P_{Xw} + r'_{22} \cdot P_{Yw} + r'_{23} \cdot P_{Zw} + t'_y \quad (2.23)$$

$$P_{Zk} = r'_{31} \cdot P_{Xw} + r'_{32} \cdot P_{Yw} + r'_{33} \cdot P_{Zw} + t'_z \quad (2.24)$$

2. A transformação do sistema de coordenadas do cone para o sistema de coordenadas da câmara, onde é realizada a reflexão do ponto no espelho cônico: para isso são necessários R e H , que são respectivamente, raio do cone refletor e altura desse cone, e as Equações (2.25), (2.26) e (2.27) determinam V_{Xk} , V_{Yk} e V_{Zk} , que são os pontos virtuais calculados, ou seja, a reflexão no cone dos pontos do espaço objeto que estão no sistema de coordenadas do cone.

$$V_{Xk} = P_{Xk} \cdot \frac{(R^2 - H^2)(P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2) + 2RHP_{Zk} \sqrt{P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2}}{(R^2 + H^2)(P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2)} \quad (2.25)$$

$$V_{Yk} = P_{Yk} \cdot \frac{(R^2 - H^2)(P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2) + 2RHP_{Zk} \sqrt{P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2}}{(R^2 + H^2)(P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2)} \quad (2.26)$$

$$V_{Zk} = \frac{2RH \sqrt{P_{Xk}^2 + P_{Yk}^2} + P_{Zk}(H^2 - R^2)}{(R^2 + H^2)} \quad (2.27)$$

3. A projeção perspectiva, com a correção da distorção causada pelo conjunto de lentes.

$$c = \alpha_c \cdot \frac{r_{11} \cdot V_{Xk} + r_{12} \cdot V_{Yk} + r_{13} \cdot V_{Zk} + t_x}{r_{31} \cdot V_{Xk} + r_{32} \cdot V_{Yk} + r_{33} \cdot V_{Zk} + t_z} + c_0 + k_1 \tilde{c} r^2 \quad (2.28)$$

$$l = \alpha_l \cdot \frac{r_{21} \cdot V_{Xk} + r_{22} \cdot V_{Yk} + r_{23} \cdot V_{Zk} + t_y}{r_{31} \cdot V_{Xk} + r_{32} \cdot V_{Yk} + r_{33} \cdot V_{Zk} + t_z} + l_0 + k_1 \tilde{l} r^2 \quad (2.29)$$

onde:

- (c, l) são as coordenadas no espaço imagem;

- $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ são os elementos da matriz de rotação entre o sistema de coordenadas do espaço imagem e do cone;

- k_1 é o coeficiente de distorção radial;

- r é o raio referente à posição de c e l na imagem calculado por $r = \sqrt{c^2 + l^2}$;
- (c_0, l_0) é o ponto central do cone na imagem;
- $(\tilde{c}, \tilde{l})$ é a diferença entre o ponto central da imagem do cone e a coordenada do ponto;
- α_c e α_l são respectivamente o fator de escala em coluna e linha respectivamente.

No trabalho de Yagi et al. (1994) é proposto outro modelo rigoroso para um sistema catadióptrico com espelho cônico, denominado COPIS (*Conic Projection Image Sensor*), utilizado para navegação autônoma guiada por visão.

Burbridge et al. (2008) desenvolveram modelos rigorosos de projeções para imagens omnidirecionais, onde não é necessário o alinhamento perfeito entre o eixo de formação do cone e o eixo óptico da câmara.

Além destes modelos rigorosos, a modelagem do sistema catadióptrico com espelho cônico pode ser realizada utilizando modelos generalizados ou não rigorosos, como o Modelo de Funções Racionais (RFM) e a Transformação Linear Direta (DLT).

Uma abordagem não rigorosa bastante comum para o mapeamento entre as coordenadas do espaço imagem e as coordenadas planimétricas no espaço objeto em imagens omnidirecionais catadióptricas é a utilização de uma função para modelar a distância radial na imagem em função da distância radial no espaço objeto. Essas distâncias possuem simetria radial, sendo que a distância polar entre o espaço imagem e o objeto é apenas uma variação de escala que pode ser modelada utilizando um polinômio unidimensional (SPACEK, 2005).

Em Luber e Reulke (2010) é proposta a utilização de um polinômio para modelar as variações do raio entre o espaço imagem e o objeto. Esse modelo foi utilizado na modelagem de câmaras com lentes *fish-eye* e câmaras catadióptricas com projeção central, abordagem também utilizada por Kanala e Brandt (2006) e Sturm et al. (2010).

Nesses modelos, primeiramente é realizada a transformação das coordenadas cartesianas (X, Y) de pontos do espaço objeto em coordenadas polares (θ, R) , com a utilização das Equações em (2.30), onde θ é o ângulo horizontal formado com o eixo X e R é a distância polar medida entre a origem do sistema e o ponto (X, Y) no espaço objeto.

$$\theta = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right); \quad R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.30)$$

Uma função de mapeamento das distâncias no espaço objeto R para o espaço imagem r é utilizada para a transformação da distância polar R no espaço objeto na distância polar r no espaço imagem, normalmente são utilizadas funções polinomiais, com θ sendo o ângulo polar no espaço objeto e θ o ângulo correspondente no espaço imagem.

$$r = F(R) ; \theta = \theta \quad (2.31)$$

Com a distância polar r no espaço imagem e o ângulo horizontal θ é realizada a conversão para as coordenadas cartesianas (x, y) no espaço imagem, com a utilização das Equações em (2.32) (KANNALA e BRANDT, 2006).

$$x = r \cdot \cos(\theta); \quad y = r \cdot \sin(\theta) \quad (2.32)$$

No presente trabalho foram utilizados modelos não rigorosos, que foram adaptados para o sistema catadióptrico proposto, e são apresentados com maiores detalhes na seção 4.1 – Modelos não rigorosos.

2.3. ORIENTAÇÃO DIRETA COM INTEGRAÇÃO GNSS/INS

A orientação direta das imagens é realizada com a utilização de sensores embarcados capazes de coletar informações de posicionamento e atitude do instante de aquisição da imagem, que serão utilizados na estimação dos POE dessas imagens. Os sensores normalmente utilizados com esse fim são os receptores GNSS e as unidades de medidas inerciais, como proposto em Cramer et al. (2000), Mostafa e Schwarz (2001) e Ruy et al. (2009).

Um receptor GNSS coleta as observações de pseudodistâncias do código e da fase da onda portadora e realiza um pós-processamento com a utilização das efemérides precisas e das correções para os relógios dos satélites produzidos pelo *International GPS Geodynamics Service* (IGS) para obter informações de posicionamento preciso do local onde está o sensor. A IMU permite medir as acelerações lineares e angulares da plataforma que suporta o sensor de imagem. Com seus sensores é possível verificar mudanças na variação da aceleração e alterações na orientação angular dos eixos.

O sinal do GNSS pode ser interrompido devido a obstáculos, como formações naturais e construções, sendo que nesses pontos não é possível coletar informações de localização. Para resolução desse problema pode-se utilizar uma unidade de medição inercial integrada ao GNSS, que complementa as posições quando os sinais do GNSS estão prejudicados.

As coordenadas associadas aos pontos do terreno e suas correspondentes na imagem estão em sistemas de coordenadas diferentes, como também os sistemas de coordenadas utilizadas pelos satélites diferem do sistema de coordenada utilizado pela IMU.

2.3.1. Sistemas de coordenadas

Nesse trabalho são utilizados diversos sistemas de coordenadas, desde o sistema de coordenadas da imagem aos sistemas globais e locais.

Quando se trabalha com IMU e GNSS tem-se dois sistemas diferentes: um local e outro global, onde o global geralmente é geocêntrico e o local, que possui um ponto inicial que está ligado ao global (RUY et al., 2009, MOSTAFA e SCHWARZ, 2001).

2.3.1.1. Sistemas de Referência Geocêntricos Cartesianos

Os Sistemas de Referência Geocêntricos Cartesianos são sistemas globais que utilizam coordenadas cartesianas, onde se enquadram o WGS-84 (World Geodetic System of 1984), sistema de referência utilizado pelo GPS e o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico das Américas) adotado pelo Sistema Geodésico Brasileiro (MONICO, 2008). Esses sistemas possuem as seguintes características:

- Origem: Geocêntrica (Centro de massa da terra);
- Eixo Z: voltado direto à definição convencional do Polo Norte, ou mais preciso, voltado ao Pólo Terrestre Convencional (CTP), como definido pelo Serviço Internacional de Rotação da Terra (IERS);
- Eixo X: Passa pelo ponto zero de longitude (aproximadamente no meridiano de Greenwich) como definido pelo IERS;
- Eixo Y: forma, com os eixos x e z, um sistema de coordenadas dextrogiro.

A Figura 2.6 apresenta as características dos sistemas de coordenadas cartesianas globais e sua representação.

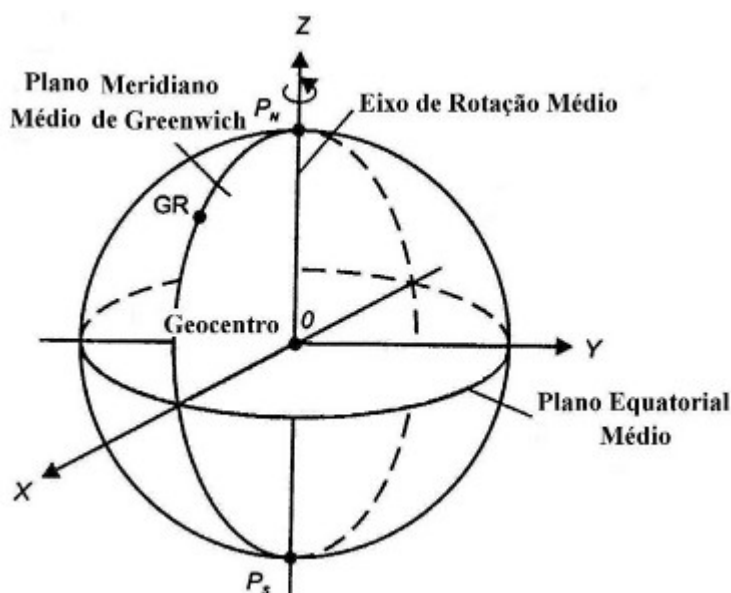


Figura 2.6 - Representação de um Sistema Geocêntrico
Fonte: Monico (2008)

Esses sistemas de coordenadas mundiais são materializados pelas coordenadas de estações derivadas de observações de satélite independentes e soluções acompanhadas por diferentes organizações usando seus próprios softwares e métodos, como:

- WGS72 - definido através de observações Doppler e de efemérides de Sistema de Satélite para Navegação de Aeronaves (NNSS); posteriormente foram realizadas observações de fase, pseudo-distâncias e as efemérides precisas do NAVSTAR-GPS;
- WGS84 - definido com base nas observações de pseudo-distâncias, fase e efemérides precisas de NAVSTAR-GPS. As efemérides transmitidas foram mudadas para o sistema WGS84 em 23 de Janeiro de 1987.

2.3.1.2. Sistemas de coordenadas locais

Segundo Jekeli (2006), os sistemas de coordenadas locais são sistemas cartesianos com sua origem no ponto P de observação. Quando P está na superfície da terra, o sistema de coordenadas local é chamado topocêntrico.

É possível definir um referencial terrestre local em qualquer ponto com relação a qualquer sistema global mencionado anteriormente (WGS84). O referencial geodésico local é definido com a origem em qualquer ponto $P(\lambda, \varphi, h)$ de um dado elipsoide; o eixo u é a normal que passa por P até o elipsoide; o eixo e é normal a u e com direção ao plano meridiano geodésico e o eixo n é perpendicular a e e a u formando um sistema dextrogiro.

2.3.1.3. Sistema de coordenadas do veículo

A IMU está fixa ao veículo e movimentando-se junto com o mesmo; seus eixos são apresentados na figura 2.7. Este sistema de coordenadas é utilizado em veículos aéreos, mas também pode ser associado a veículos terrestres ou orbitais.

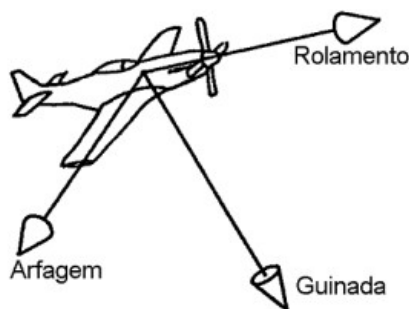


Figura 2.7 - Sistema de Coordenadas do Veículo.
Fonte: Adaptado de Groves (2008)

Conforme Groves (2008), o sistema é definido da seguinte forma.

- Origem: centro de gravidade do veículo;
- Eixo X (rolamento): sentido longitudinal do veículo;
- Eixo Y (arfagem): sentido transversal do veículo;
- Eixo Z (guinada): completa o sistema dextrogiro, apontando para baixo.

2.3.2. Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) foi inicialmente concebido pelo Departamento de Defesa (*Department of Defense* - DoD) norte-americano para o apoio à navegação. Possui uma constelação de, no mínimo, 24 satélites no segmento espacial do sistema, atualmente são 31 satélites em funcionamento na altitude aproximada de 22.200 Km e com planos orbitais inclinados 55° em relação ao Equador, com período orbital de 12 horas (MONICO, 2008).

A comunidade científica encontrou outras aplicações, como o posicionamento geodésico ou levantamento de alta precisão, utilizado na orientação direta e indireta das imagens orbitais e aéreas, como nas aplicações desenvolvidas por Tommaselli et al. (2007), Silva et al. (2001) e Barbosa et al. (2005).

O GPS utiliza um sistema global de coordenadas cartesianas, o sistema de referência WGS84 (*World Geodetic System* 1984). A determinação da posição de um receptor nesse sistema de referência é realizada através de medições nos sinais eletromagnéticos enviados pelos satélites visíveis na posição do receptor.

Em Monico (2008), Groves (2008) e Grewal et al. (2007) são descritos os princípios de operação de receptores com maior detalhamento.

2.3.2.1. Formas de posicionamento

Com a utilização dos sinais GPS é possível utilizar várias técnicas para a determinação dos dados planimétricos e altimétricos, onde cada uma das formas possuem características e precisão diferentes.

A técnica de posicionamento por ponto, apresentada em Monico (2008), é a obtenção da posição de uma estação a partir de observações de pseudodistâncias e fase do código C/A, fixando-se a órbita e demais parâmetros dos satélites, contidos nas mensagens de navegação (*broadcast ephemeris*).

O posicionamento instantâneo de uma estação apresenta precisão planimétrica e altimétrica da ordem de 9 e 15 m, respectivamente, com probabilidade de 95%, não atendendo os requisitos de precisão do posicionamento geodésico para pontos de controle. Esta técnica é denominada de posicionamento por ponto simples.

Os principais erros desta técnica estão relacionados com a precisão da observável e a acurácia dos parâmetros transmitidos, além de erros referentes à refração troposférica e ionosférica, e multicaminho do sinal (Monico, 2008).

As efemérides precisas e as correções para os relógios dos satélites produzidos pelo *International GPS Geodynamics Service* (IGS), que possuem precisão de poucos centímetros, podem ser utilizadas quando não há a necessidade de posicionamento em tempo real. Essa técnica de pós-processamento é chamada de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) e pode ser utilizada no processamento de observações de pseudodistâncias do código, da fase da onda portadora ou ambas

(MONICO, 2008). No PPP a acurácia no posicionamento absoluto está em torno de poucos centímetros.

Outra forma de posicionamento é o posicionamento relativo, onde são utilizados dois ou mais receptores GPS, pode-se utilizar as estações de referência da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) como estação base. O posicionamento relativo pode ser estático, ou cinemático. No posicionamento cinemático, um dos receptores ocupa uma estação de coordenadas conhecidas (base) e o outro rastreia as posições de interesse e para a obtenção das coordenadas precisas é necessário um pós-processamento (MONICO, 2008).

A DGPS (*Differential GPS*) é uma forma de posicionamento que se baseia na utilização de um receptor estacionário (base) em uma estação com coordenadas conhecidas. Nesta estação, o processamento dos dados é realizado mediante o método de posicionamento por ponto, no qual se permite calcular correções posicionais (ΔX , ΔY , ΔZ) para esta base. Com essas correções pode-se realizar a correção das observações coletadas.

A RTK (*Real Time Kinematic*) também baseia-se em correções diferenciais em relação a estações de referências e o posicionamento é fundamentado na transmissão das medições puras da fase da portadora ou das correções diferenciais da fase da portadora, ambas mensuradas na estação de referência (LANGLEY, 1998).

2.3.2.2. Aplicações do GPS

Em sistemas de mapeamento terrestre, como apresentado em Barbosa et al. (2005) e Silva et al. (2001), são utilizadas as observações de receptores GPS para que coordenadas geodésicas sejam relacionadas a feições ou objetos (processo de georreferenciamento direto).

Os aerolevantamentos com câmaras fotogramétricas têm utilizado informações de receptores GPS como apoio para o processamento das imagens coletadas, como também para orientação direta dessas imagens como em Tommaselli et al. (2007).

2.3.3. Sistema de Navegação Inercial (INS)

O Sistema de Navegação Inercial utiliza-se de uma unidade de medição inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*) que é formada por um conjunto de acelerômetros, para medir as acelerações em cada uma das direções e um conjunto de giroscópios, para medição dos movimentos de rotação (GROVES, 2008), o esquema de funcionamento é apresentado na Figura 2.8.

Na IMU, além dos sensores inerciais, existem elementos de filtragem, que procuram eliminar ou reduzir os ruídos que acompanham os sinais dos sensores.

Os sinais dos sensores podem passar uma etapa de instrumentação de observações, ou enviados diretamente uma unidade de processamento externa que efetuará todos os cálculos de navegação. O sistema de navegação inercial não depende de sinais externos, como os receptores GPS, para a realização de medidas.

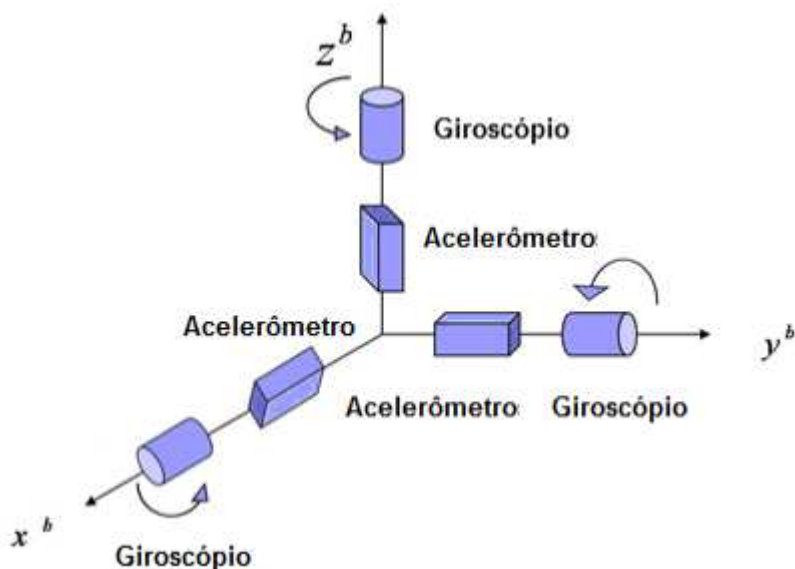


Figura 2.8 – Componentes de uma IMU, com acelerômetros e giroscópios.
Fonte: Adaptado de Groves (2008).

O correto funcionamento do sistema inercial depende da execução de um processo de inicialização, que consiste na atribuição de coordenadas e velocidades iniciais, e na determinação da orientação da plataforma em relação a um referencial de navegação.

Com a plataforma de navegação inercial parada, as velocidades podem ser consideradas nulas e as coordenadas iniciais são definidas utilizando um ponto local com coordenadas conhecidas ou um receptor GPS para determinar as coordenadas iniciais (GREWAL et al., 2007).

A orientação da plataforma pode ser determinada pelo próprio sistema de navegação inercial, que se alinha através de direções definidas fisicamente pela Terra, como a direção da gravidade local e a direção do eixo de rotação da Terra.

O alinhamento inicial fornece uma orientação rápida da plataforma em relação a um referencial de navegação usando as forças específicas e velocidades angulares obtidas diretamente das observações dos sensores.

Após o alinhamento inicial, um alinhamento refinado deve ser realizado para compensar os desvios dos acelerômetros e giroscópios, erros sistemáticos e os erros de orientação (GROVES, 2008).

2.3.4. Integração GNSS/INS

Os receptores GNSS precisam obter dados de no mínimo 4 satélites para conseguir determinar sua posição, na utilização em veículos automotores com trajeto realizado em áreas onde a vegetação ou edifícios podem encobrir a visão dos satélites, a determinação de seu posicionamento pode ser prejudicada. Esse problema pode ser resolvido com a utilização de algum sistema complementar para suprir as necessidades de posicionamento. O sistema de navegação inercial

captura informações de aceleração e atitude, que permitem o cálculo do posicionamento nessas áreas.

A integração GNSS/INS é a união de dois sistemas de posicionamento com características distintas e complementares, essa integração tem como objetivo minimizar suas deficiências e maximizar o desempenho final no levantamento.

Essa integração pode ser classificada de acordo com o modo de controle dos sinais dos instrumentos, podendo-se trabalhar com laço aberto, onde não há a realimentação de controle, ou com laço fechado, onde há a realimentação de controle (GROVES, 2008).

A figura 2.9 apresenta o diagrama de blocos da integração dos sistemas com laço aberto e laço fechado. No sistema com laço fechado a realimentação de controle minimiza os erros diretamente na instrumentação INS.

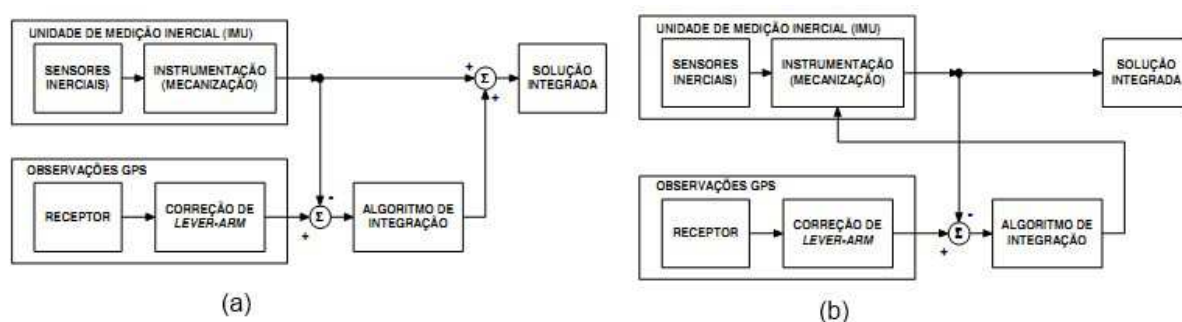


Figura 2.9 - (a) Integração com laço aberto (b) Integração com laço fechado.

Fonte: Adaptado de Groves (2008)

Na implementação ou na utilização dos sistemas GNSS/INS, dependendo da forma de construção do equipamento, é possível determinar o nível de acoplamento instrumental entre os sistemas de navegação. Os principais modos de acoplamento são (GROVES, 2008):

- Modo desacoplado: os instrumentos estão fisicamente separados e suas observações previamente processadas são integradas por um computador externo;
- Modo fracamente acoplado: os dois sistemas estão contidos em um único instrumento, mas a integração é realizada com as observações previamente processadas, e a posição do GPS é utilizada para realimentar e corrigir os dados da IMU;
- Modo fortemente acoplado: nesse modo os sistemas compartilham as observações como pseudodistâncias, fase de portadora, acelerações inerciais e velocidades angulares.

A antena do receptor GPS geralmente não está na mesma posição da IMU, por isso medem posições e deslocamentos diferentes. Essa distância entre os sensores é denominada *level-arm* (braço de alavanca) e necessita de correção (RUY, 2008). Em geral utiliza-se o centro do conjunto de sensores inerciais como referência para todos os instrumentos.

2.4. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Essa seção aborda as técnicas utilizadas no processamento das imagens omnidirecionais e orbitais utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Serão abordados tópicos sobre a retificação e reamostragem das imagens com seus métodos de interpolação e os métodos de correspondência entre imagens.

2.4.1. Retificação

A retificação é o processo de geração de uma fotografia vertical e o produto resultante é a foto retificada, que teoricamente é uma fotografia verdadeiramente vertical, livres de deslocamentos devido à inclinação (KRAUS, 2007). As imagens retificadas não estão livres das distorções causadas pelos deslocamentos devido ao relevo, que são minimizadas através da ortorretificação. A imagem retificada é obtida transferindo valores de brilho de uma imagem digital para uma malha regular.

Segundo (Andrade, 1998), retificar uma imagem consiste em projetá-la para um plano horizontal, minimizando ou eliminando completamente os ângulos de atitude da câmara em relação a um dado referencial. O objetivo primordial da retificação para a Fotogrametria aérea/orbital é gerar uma nova imagem vertical sem as distorções introduzidas pela atitude do sensor durante a tomada da imagem, como a correção das distorções causadas pelo conjunto de lentes.

2.4.2. Reamostragem

A reamostragem é um processo de atribuição de novos valores de intensidade com base em um conjunto de valores originais causado por alteração geométrica da imagem, que pode ser resultante de translação, rotação, mudança de escala, ou um conjunto dessas transformações. Quando ocorre uma reamostragem, as coordenadas da imagem resultante do processo (linha e coluna) podem não coincidir com as coordenadas da imagem original, como apresentado na Figura 2.10.

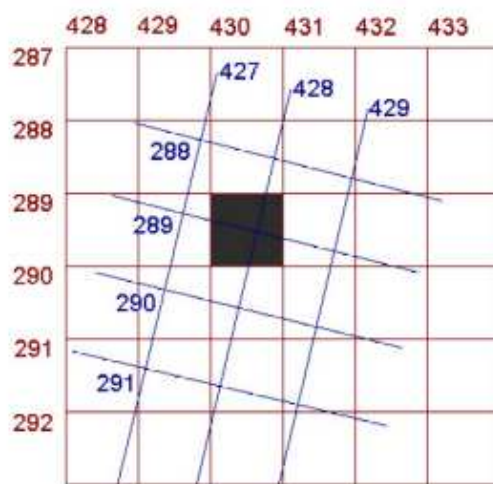


Figura 2.10 - Problema gerado pela reamostragem.
Fonte: Gonzalez e Woods (2007)

Nesta operação o valor de intensidade dos pixels da imagem reamostrada será o resultado de um cálculo sobre vários pixels da imagem original (vizinhança). Os principais métodos de interpolação utilizados na reamostragem para a produção de uma nova imagem são: vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*), interpolação bilinear e interpolação bicúbica.

A interpolação por vizinho mais próximo atribui ao valor de nível de cinza do pixel da imagem corrigida, o mesmo valor do nível de cinza do pixel que se encontra mais próximo da posição a ser ocupada. Nesse método de interpolação não há alteração no valor de nível de cinza (GONZALEZ e WOODS, 2007).

Segundo Gonzalez e Woods (2007), a interpolação bilinear faz com que o nível de cinza a ser atribuído ao pixel da imagem corrigida seja determinado a partir do valor dos 4 pixels vizinhos, porém há alteração no valor do nível de cinza, considerando a sua vizinhança. Essa técnica considera uma distância média ponderada dos níveis de cinza dos quatro pixels mais próximos, e consiste na realização de duas interpolações lineares. Este processo produz uma aparência de homogeneização na imagem reamostrada pelo fato de alterar o valor de brilho da imagem original.

A interpolação bicúbica é uma técnica mais aperfeiçoada, na qual o pixel reamostrado tem por base uma vizinhança de 16 pixels. Este método evita a aparência de descontinuidade que pode ocorrer no método do vizinho mais próximo, e resulta em uma suavização maior que a interpolação linear na imagem resultante (GONZALEZ e WOODS, 2007).

2.5. CORRESPONDÊNCIA DE IMAGENS

Em Fotogrametria digital e sensoriamento remoto, faz-se necessária a localização de um ponto de uma imagem, que é homólogo a determinado ponto de outra imagem. Esse processo pode ser realizado de forma manual, dependendo da perícia do operador, ou de forma automática através de técnicas de correlação de imagens.

A localização automática pode ser realizada utilizando dois tipos de métodos, os métodos baseados em área e os métodos baseados em feições ou características.

2.5.1.1. Métodos baseados em área

Os métodos de correspondência baseados em área consistem em comparar a distribuição de níveis de cinza de uma matriz amostra, conhecida como janela de referência, com matrizes candidatas, conhecidas como janela de pesquisa, pertencentes a um espaço de busca, utilizando para isso uma função de correlação (SCHENK, 1999).

Em Berveglieri e Tommaselli (2013) é realizada uma comparação entre as diversas funções de correlação para os métodos baseados em área, na aplicação entre imagens de diferentes escalas.

A função de correlação é aplicada entre as intensidades dos pixels na janela de referência e na janela de pesquisa, e a similaridade é medida pelo resultado dessa função, que pode

ser correlação cruzada normalizada, soma das diferenças quadráticas, soma das diferenças absolutas, e outras abordagens encontradas em referências (GALO, 2003).

A soma das diferenças absolutas é uma função de correspondência que computa a diferença entre os pontos da janela de referência e a janela de pesquisa, e posteriormente realiza a soma do módulo de todos os resultados dessas diferenças através da Equação (2.33).

O valor mínimo desta função em toda a janela (espaço) de busca determina o ponto de melhor correspondência entre as imagens.

$$C(x, y) = \sum_i \sum_j |I_1(x+i, y+j) - I_2(i, j)| \quad (2.33)$$

onde $C(x, y)$ é o valor resultante da função de correlação, i e j são os índices para a varredura nas janelas, I_1 é a intensidade do pixel janela de busca e I_2 é a intensidade do pixel na janela de referência.

A soma dos quadrados das diferenças é outra função clássica de correspondência, e computa a diferença de todos os pontos da janela definida e em seguida soma o quadrado de todos os resultados dessas diferenças.

Da mesma forma que a soma das diferenças absolutas, o valor mínimo desta função determina o ponto de maior correlação dentro do espaço de busca. A Equação (2.34) representa a soma dos quadrados das diferenças.

$$C(x, y) = \sum_i \sum_j (I_1(x+i, y+j) - I_2(i, j))^2 \quad (2.34)$$

onde $C(x, y)$ é o valor resultante da função de correlação, i e j são os índices para a varredura nas janelas, I_1 é a intensidade do pixel janela de busca e I_2 é a intensidade do pixel na janela de referência.

2.5.1.2. Correlação Cruzada Normalizada (CCN)

A correlação cruzada normalizada é um algoritmo insensível às variações de tons de cinza, pois utiliza a subtração da média da intensidade das janelas e dessa forma consegue não ser tão influenciado pela variação na luminosidade do ambiente (GONZALEZ e WOODS, 2007).

O valor resultante da aplicação da Equação (2.35), também conhecido como coeficiente de correlação, é normalizado entre -1 e 1, de forma que uma imagem perfeitamente correlacionada resultará em um valor 1, se o resultado for -1 ocorre a correlação inversa e se for 0 não há correlação.

$$C(x, y) = \frac{\sum_i \sum_j ((I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x, y)) \cdot (I_2(i, j) - \bar{I}_2))}{\sqrt{\sum_i \sum_j (I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1(x, y))^2 \cdot \sum_i \sum_j (I_2(i, j) - \bar{I}_2)^2}} \quad (2.35)$$

onde $C(x, y)$ é o valor resultante da função de correlação cruzada normalizada, i e j são os índices para a varredura nas janelas, I_1 é a intensidade do pixel janela de busca, I_2 é a intensidade do pixel na janela de referência, $\bar{I}_1(x, y)$ e $\bar{I}_2$ são as médias das intensidades dos pixels na janela de busca e de referência respectivamente.

Nos métodos baseados em área ocorrem problemas como, a múltipla correspondência para uma mesma janela de referência em áreas mais homogêneas, sobre arestas ou quando há padrões repetitivos, e a falta de correspondência quando há distorções geométricas como escalas e rotações na janela de referência em relação à janela de busca.

2.5.1.3. Métodos baseados em características

Os métodos baseados em características utilizam, para a correspondência entre duas imagens, feições como linhas e cantos. Esses métodos envolvem ao menos três passos principais: inicia pela detecção dos pontos de interesse nas imagens (arestas, vértices, curvas ou outras entidades); em seguida são determinados os descritores dessas feições e suas relações com outras feições e com base na similaridade entre esses descritores são estabelecidas as correspondências.

Esses métodos limitam a quantidade de candidatos para a correspondência entre as imagens, porém a definição das características é de grande importância para a eficiência do método, sendo ineficientes em regiões com pouca variação nos níveis de cinza.

Galo (2003) propôs um algoritmo de rotulação por relaxação para estabelecer correspondência com métricas baseadas em relações angulares e injeção epipolar na orientação relativa em visão estereoscópica.

Na literatura aparecem vários métodos para a identificação de feições como também para a detecção de correspondências. Em Rodehorst e Koschan (2006) são realizadas comparações entre esses métodos.

Lowe (2004) propôs o método de correspondência SIFT para aplicações de Visão Computacional. Esse método possui invariância em relação à escala e rotação, e suporte às pequenas variações na iluminação. O método SIFT é composto por cinco etapas e o grau de similaridade é dado pela distância Euclidiana entre seus descritores.

Em Silveira et al. (2011) o método de correspondência por feições SIFT é utilizado em imagens de sensoriamento remoto para a construção de mapas densos de pontos homólogos.

Gauglitz et al. (2011) faz uma avaliação dos detectores de pontos de interesse e descritores de feições da literatura, enfatizando sua utilização no rastreamento visual.

3. O SISTEMA CATADIÓPTRICO OMNIDIRECIONAL

3.1. DEFINIÇÃO DO SISTEMA OMNIDIRECIONAL

Com base nos estudos sobre os possíveis sistemas de imageamento omnidirecional, o que possui melhor custo/benefício e permite a utilização em um veículo em movimento é o sistema omnidirecional catadióptrico. Os fatores que levaram a essa escolha são apresentados a seguir.

- A utilização de um sistema com várias câmaras envolve um grande custo para aquisição das câmaras, no mínimo 4 câmaras para obter imageamento panorâmico de 360°, em relação ao sistema catadióptrico que utiliza uma só câmara, dificuldade de sincronização dos disparos das câmaras, como também um maior esforço de processamento para a mosaicagem das imagens geradas por diferentes câmaras;
- O sistema de câmara rotativa não permite a utilização em movimento, pois as imagens não são obtidas em um mesmo instante;
- As câmaras do tipo *fish-eye* necessitam de uma grande distância até o veículo para que o imageamento seja satisfatório, pois esse modelo de câmara faz com que os objetos que estejam próximos ao centro da imagem sejam ampliados, ou seja, o veículo ocuparia a maior parte da imagem

O espelho cônico foi selecionado para o desenvolvimento do projeto devido às vantagens sobre os espelhos com curvatura radial e de aspectos referentes a sua construção apresentados abaixo.

- Processo de usinagem mais simples;
- O projeto do cone não envolve grandes cálculos ou modelagem, apenas a definição do ângulo do topo do cone e do diâmetro do mesmo;
- Espelhos com curvatura radial produzem distorções radiais proporcionais à curvatura radial do espelho. O cone não possui curvatura radial.
- Espelhos com curvatura radial produzem efeito análogo ao de lentes *fisheyes*, onde os objetos refletidos no centro do espelho possuem grande resolução, geralmente onde estão o veículo e a câmara, que não são pontos de interesse do imageamento. As áreas com maiores distâncias do sensor são comprimidas verticalmente, dessa forma reduzindo a resolução espacial na área de interesse.
- O cone apresenta a seção transversal como duas retas, dessa forma a diferença de resolução ocorre devido à distância entre o sistema e o ponto imageado e não pela curvatura do espelho, sendo portanto minimizada.

3.2. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO ESPELHO

Com a definição do formato de espelho a ser produzido, foi necessário realizar alguns testes para determinar o ângulo do topo e o diâmetro do espelho, com o objetivo de obter o imageamento das principais áreas de interesse para esse projeto, que são as bordas e cruzamentos das rodovias.

Para a definição desses parâmetros foi construído um protótipo com espelhos planos, formando o perfil de uma secção transversal de um espelho cônico e a câmara digital Fuji Finepix S3 Pro. A Figura 3.1 apresenta o protótipo criado, que permite alteração do ângulo da junção dos espelhos, como também a alteração na distância entre a câmara e o espelho.



Figura 3.1 - Protótipo para determinar a configuração do espelho.

Com esse protótipo foi utilizada uma lente com distância focal de 28 mm, sendo o espelho colocado a uma distância aproximada de 5 cm do ponto nodal anterior do conjunto de lentes. A distância muito grande em relação ao espelho causaria o aumento da altura do sistema, gerando problemas de acomodação sobre o veículo, como também um aumento na vibração entre a câmara e o espelho.

Utilizando esse protótipo foram coletadas imagens em laboratório e em campo com configurações reais de utilização (altura do veículo a ser utilizado) para verificar se as imagens registravam as áreas de interesse, ou seja, as bordas da rodovia, a vegetação, cruzamentos, entradas e saídas da rodovia.

Com as imagens capturadas e as medidas realizadas no solo foi determinado que o ângulo do topo do espelho deveria ser de aproximadamente 136° e o raio do cone a ser usado deveria ser de 10cm, minimizando os custos de aquisição e usinagem do material.

3.3. CONFEÇÃO DO ESPELHO

O espelho foi confeccionado utilizando uma peça cilíndrica de alumínio aeronáutico, com raio 10,5 cm e altura de 5 cm, que permite melhor usinagem e melhor acabamento que o alumínio comum.

A peça foi usinada utilizando um torno manual de precisão e posteriormente lixada e polida para que a superfície ficasse com o mínimo de rugosidade. Também foi retirado alumínio da área posterior do cone para a diminuição do peso.

O cone usinado passou por um processo químico para torná-lo reflexivo como um espelho, o processo utilizado foi a cromagem, onde é aplicada uma camada de cromo sobre o alumínio, através de eletrodeposição (processo eletrolítico de revestimento de superfícies com metais).

Após a cromagem, a peça foi lustrada para melhorar a reflexão das imagens a serem adquiridas pela câmara. A Figura 3.2 mostra uma imagem preliminar coletada com o espelho.



Figura 3.2 - Imagem feita com o espelho cônico.

3.4. CONFEÇÃO DO SUPORTE DA CÂMARA E SEUS COMPONENTES

As medidas do espelho, a distância da câmara e as dimensões do sistema SPAN-CPT da Novatel foram a base para o projeto do sistema de imageamento catadióptrico georreferenciado, apresentado na Figura 3.3, com as devidas dimensões de seus componentes.

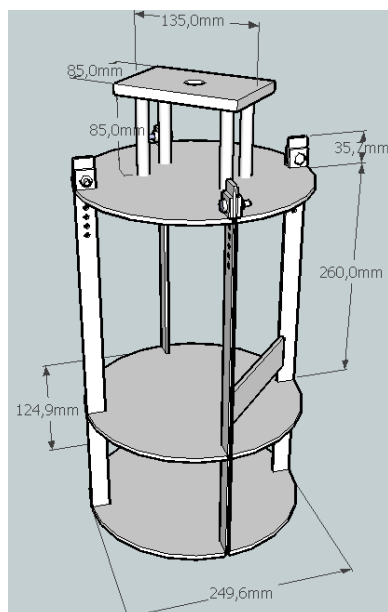


Figura 3.3 - Projeto do suporte do espelho com as medidas.

Na Figura 3.4 é apresentado o suporte com os componentes do sistema.

- Antena do receptor GNSS com as dimensões da antena do sistema SPAN-CPT;
- Espelho cônico confeccionado;
- Câmera digital com as dimensões da Fuji Finepix S3 Pro que será utilizada no projeto;
- Unidade GNSS/INS Integrada, com as dimensões da SPAN-CPT.

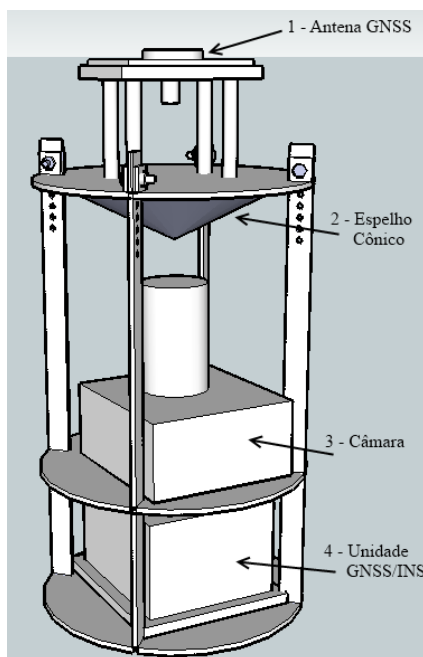


Figura 3.4 - Suporte com os equipamentos.

O suporte foi confeccionado em ferro, onde as bases circulares possuem espessura de 4 mm, as hastes laterais possuem espessura 20 mm por 7 mm. O suporte foi feito para suportar

diferentes tipos de câmaras e lentes, pois foi confeccionado com regulagem na altura interna e a possibilidade de alterar a posição da câmara em todas as direções

3.5. ESCOLHA DO SISTEMA DE LENTES

Com a montagem do sistema no suporte foram feitas várias coletas em ambientes externos e internos e foi verificado que a lente de 35 mm não resultaria no imageamento da área necessária para a aplicação, sendo que a maior distância imageada com essa configuração do sistema, foi em torno de 10 metros, um alcance abaixo do necessário.

Visando aumentar a área de imageamento foram testadas duas lentes: de 15 mm com um adaptador grande angular, tornando a lente com distância focal de 6 mm e a lente fisheye Bower de 8 mm.

No primeiro teste em campo foi utilizada uma lente de 15 mm com adaptador, tempo de exposição de 1/180 segundos e o fstop de 2.8. Na figura 3.5 é apresentada uma imagem em um ambiente com boa iluminação.



Figura 3.5 - Imagem catadióptrica em ambiente externo com lente de 6mm (adaptador).

Nesse primeiro trabalho em campo, as imagens capturadas possuíam distorções, causadas por irregularidades no espelho, visando diminuir essas irregularidades, o espelho passou por um segundo processo de polimento e cromagem. As imagens apresentavam também aberração cromática e deficiência de iluminação causadas pelo conjunto formado pela lente e adaptador.

A redução nesses efeitos é possível notar nas imagens adquiridas com a lente Bower de 8mm em conjunto com espelho melhorado (vide Figura 3.6). Devido a essa redução dos efeitos, com melhoria na qualidade de imagem adquirida e a grande área de imageamento alcançada com essa lente, a fisheye Bower de 8mm foi utilizada nos experimentos realizados em campo.

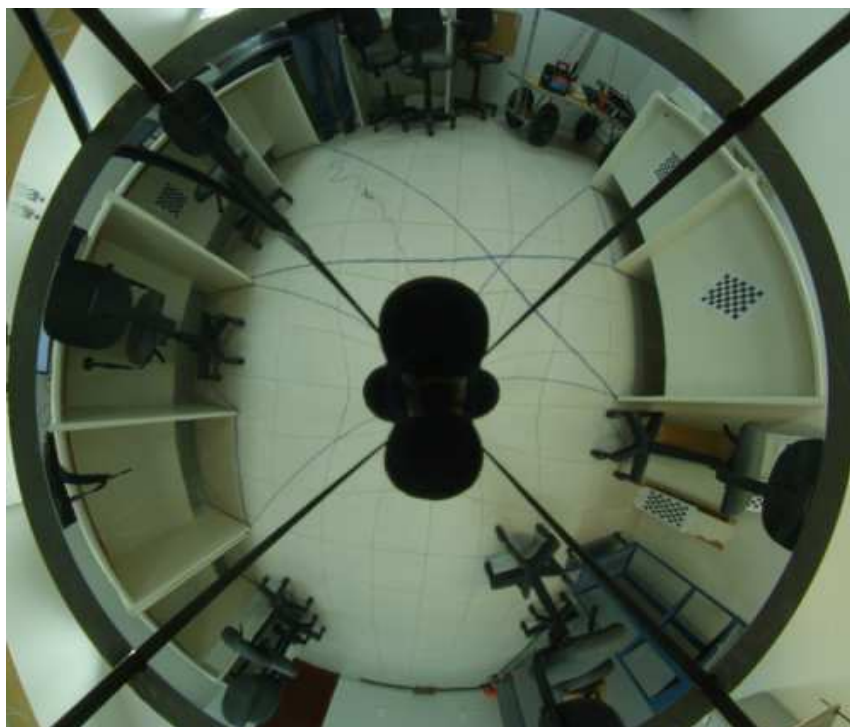


Figura 3.6 - Imagem catadióptrica com a lente Bower de 8mm.

3.6. SISTEMA DE GEORREFERENCIAMENTO

A orientação exterior direta da imagem é realizada através dos dados do receptor GPS e da IMU, onde o GPS gera a informação de posicionamento da câmara e a IMU as informações referentes à atitude do sensor.

O sistema de georreferenciamento das imagens omnidirecionais deve marcar o instante de captura das imagens com os dados GPS/INS para posterior processamento. O sistema é composto pelos seguintes componentes:

- Sistema SPAN-CPT contendo o receptor GPS e a IMU;
- Antena GPS;
- Câmara digital Fuji Finepix S3 Pro;
- Computador para armazenamento e controle das fotos e informações de posicionamento;
- Monitor com tela sensível ao toque;
- Sistema de controle de alimentação para os componentes;
- Duas baterias para a alimentação dos componentes.

A câmara faz parte do sistema de georreferenciamento, pois o flash envia um pulso para o sistema de georreferenciamento que armazena esse evento no arquivo de dados. Essa marcação de tempo tem uma incerteza de 1 ms (REIS, 2009).

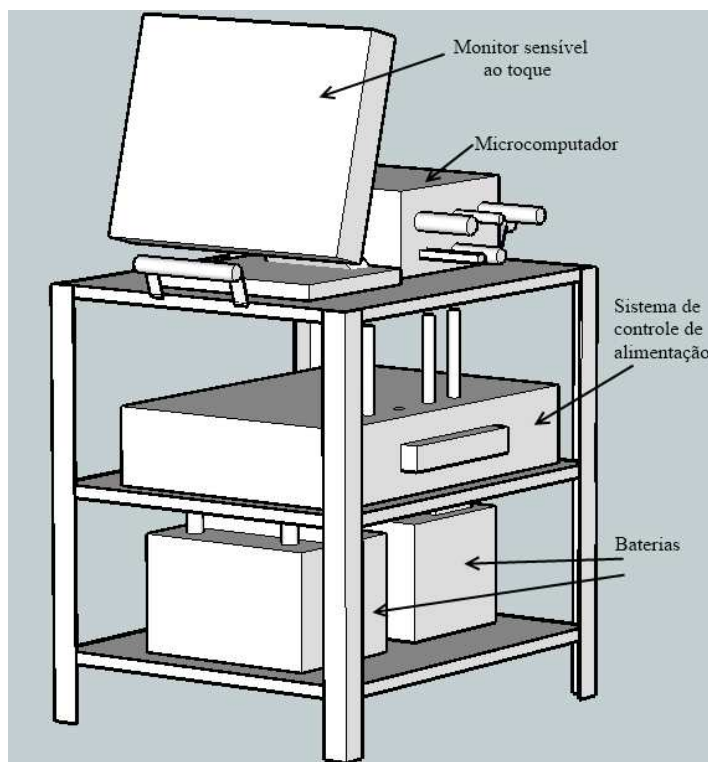


Figura 3.7 - Rack com os componentes do sistema de georreferenciamento.

O sistema SPAN-CPT, a antena GPS e a câmara digital são fixadas no suporte da câmara o espelho cônico como apresentado na figura 3.4. Os outros componentes ficam acondicionados em um rack para facilitar a colocação e retirada do veículo. O projeto do rack com seus componentes é mostrado na figura 3.7.

3.6.1. Funcionamento do sistema de georreferenciamento

O sistema possui um conjunto de componentes interligados e as baterias são a fonte de alimentação para o sistema devido a sua utilização em movimento.

Os equipamentos necessitam de voltagens diferenciadas e, para isso, foi desenvolvido por Thiago Tiedtcke dos Reis (REIS, 2009) um sistema de controle de alimentação que faz a distribuição da alimentação de acordo com cada um dos equipamentos. Esse sistema fica estruturado em uma maleta para facilitar o transporte, permite utilizar equipamentos de corrente alternada com o veículo em movimento e recargar a bateria quando conectado à rede elétrica.

O sistema omnidirecional construído permite capturar as imagens de forma automática (temporizada) ou manual. Os componentes do sistema trabalham interligados, trocando sinais de sincronização da seguinte forma:

1. Na forma temporizada, o software adaptado do Sistema SAAP, desenvolvido para controlar o intervalo de disparo para captura das imagens, envia ao hardware um sinal indicando o instante da coleta da imagem, e o microcomputador embarcado envia um sinal para a câmara digital indicando o momento do disparo e captura da imagem. Na forma de operação manual, o operador é responsável por determinar o

momento do disparo e captura da imagem pressionando o disparador manual, permitindo imagear os locais identificáveis nas imagens orbitais, como cruzamentos, entradas e saídas de rodovias;

2. A câmara digital no momento da captura da imagem emite um sinal, diretamente do flash para o sistema inercial. No sistema inercial SPAN-CPT há uma IMU, composta por acelerômetros e giroscópios de fibra óptica; uma placa GPS de dupla frequência; e um computador, que grava todos os dados, inclusive o instante de disparo da câmara e processa estes dados em tempo real para fornecer uma solução de navegação;
3. O sistema SPAN-CPT envia os dados de posicionamento para o microcomputador, bem como informações brutas do GPS e da IMU, que são armazenados para pós-processamento.

Os dados de navegação e os dados brutos, armazenados pelo sistema SPAN-CPT no computador, devem ser processados para se conseguir uma solução de maior precisão nos eventos registrados no momento da aquisição de cada uma das imagens.

4. DEFINIÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS NÃO RIGOROSOS

O mapeamento entre os pontos do espaço imagem e espaço objeto pode ser realizado por modelos matemáticos rigorosos, nos quais os parâmetros do sensor devem ser conhecidos, ou por modelos não rigorosos (empíricos).

Nesse trabalho foram investigadas várias formas de modelagem, mas optou-se por utilizar modelos não rigorosos, nos quais não é necessário conhecer a geometria do sensor.

Um projeto paralelo de modelagem foi desenvolvido por Marcato Jr (2014), visando especificar um modelo rigoroso para o sensor construído no projeto, no qual são consideradas informações físicas como ângulo do topo do espelho, distância entre o espelho e a câmara e diâmetro do espelho, sendo tratada a falta de alinhamento entre a câmara e o espelho.

4.1. MODELOS NÃO RIGOROSOS

Na modelagem não rigorosa do sensor foram utilizados inicialmente três modelos diferentes: o modelo de funções racionais, o modelo de distâncias polares e o modelo de coordenadas polares.

Para os modelos acima citados, a estimação dos parâmetros foi realizada com um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, utilizando de coordenadas planimétricas de pontos de controle no espaço objeto (campo) e suas correspondentes no espaço imagem.

4.1.1. Modelo de funções racionais

O modelo de funções racionais permite o mapeamento de coordenadas do espaço objeto para o espaço imagem, utilizando as Equações (2.11) e (2.12), como apresentado no item 2.1.3.2 da fundamentação teórica.

Com essas equações, os pontos tridimensionais do espaço objeto são mapeados para o espaço imagem, porém as altitudes dos pontos podem variar. Para considerar apenas as coordenadas planimétricas, foi realizada uma alteração na RFM visando a transformação entre as coordenadas planimétricas no espaço objeto para o espaço imagem, supondo-se um terreno plano.

Esta simplificação se deve ao fato de não haver informações sobre o relevo do terreno nos locais onde foram capturadas as imagens, e não são capturadas duas imagens da mesma área, com o que seria possível a triangulação e definição de informações tridimensionais. Isto, entretanto, agregaria grande custo operacional ao processo, sem grande ganho de precisão, considerando a resolução das imagens orbitais a serem analisadas.

A falta de consideração da variação do relevo e a simplificação do modelo podem gerar problemas durante a reamostragem da imagem omnidirecional, pois os parâmetros do modelo ajustado consideram que o terreno é plano. Em locais com relevo acidentado a imagem reamostrada não representará de forma adequada a imagem de vista aérea da região imageada.

A captura de várias imagens de um mesmo local para o mapeamento do relevo é uma proposta de trabalho futuro, detalhado na seção 10.2 (Sugestões para trabalhos futuros), mas isto requer o uso de modelagem rigorosa.

As equações do modelo de funções racionais foram adaptadas com base na hipótese de terreno plano resultando em um modelo de funções racionais que transformam as coordenadas de plano para plano com as Equações (4.1) e (4.2).

$$c_n = \frac{p_1(X_n, Y_n)}{p_2(X_n, Y_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} a_{ijk} X_n^i Y_n^j}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} b_{ijk} X_n^i Y_n^j} \quad (4.1)$$

$$l_n = \frac{p_3(X_n, Y_n)}{p_4(X_n, Y_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} c_{ijk} X_n^i Y_n^j}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} d_{ijk} X_n^i Y_n^j} \quad (4.2)$$

A implementação do modelo de funções racionais foi realizada no MATLAB, que possibilita o trabalho com matrizes e vetores de uma forma simples e prática.

4.1.2. Modelo das distâncias polares com polinômio unidimensional

Uma abordagem bastante comum para o mapeamento entre as coordenadas do espaço imagem e as coordenadas planimétricas no espaço objeto em imagens omnidirecionais catadiópticas é a utilização de um polinômio para modelar a distância radial na imagem em função da distância radial no espaço objeto. Essas distâncias possuem simetria radial, se o eixo óptico da câmara estiver alinhado com o eixo de formação do cone, onde a distância polar entre o espaço imagem e o objeto é apenas uma variação de escala que pode ser modelada utilizando um polinômio unidimensional (SPACEK, 2005).

Considerando o eixo X do espaço objeto coplanar ao eixo c' , e o ponto $P(\theta, R)$ no espaço objeto, o ponto $p(\theta, r)$ no espaço imagem, a origem do sistema de coordenadas no espaço objeto e a origem do sistema de coordenadas no espaço imagem também coplanares, a relação entre o ponto P e seu correspondente p na imagem é dada pelas Equações (4.3) e (4.4).

$$\theta = \Theta \quad (4.3)$$

$$r = F(R) \quad (4.4)$$

Onde a função $F(R)$, Equação (4.4), é um polinômio de grau n que permite modelar a relação entre o raio R no espaço objeto e r no espaço imagem, representado pela Equação (4.5)

$$F(R) = a_0 + a_1 \cdot R + a_2 \cdot R^2 + \dots + a_n \cdot R^n \quad (4.5)$$

O relacionamento e o alinhamento entre os sistemas do espaço imagem e objeto é apresentado na Figura 4.1.

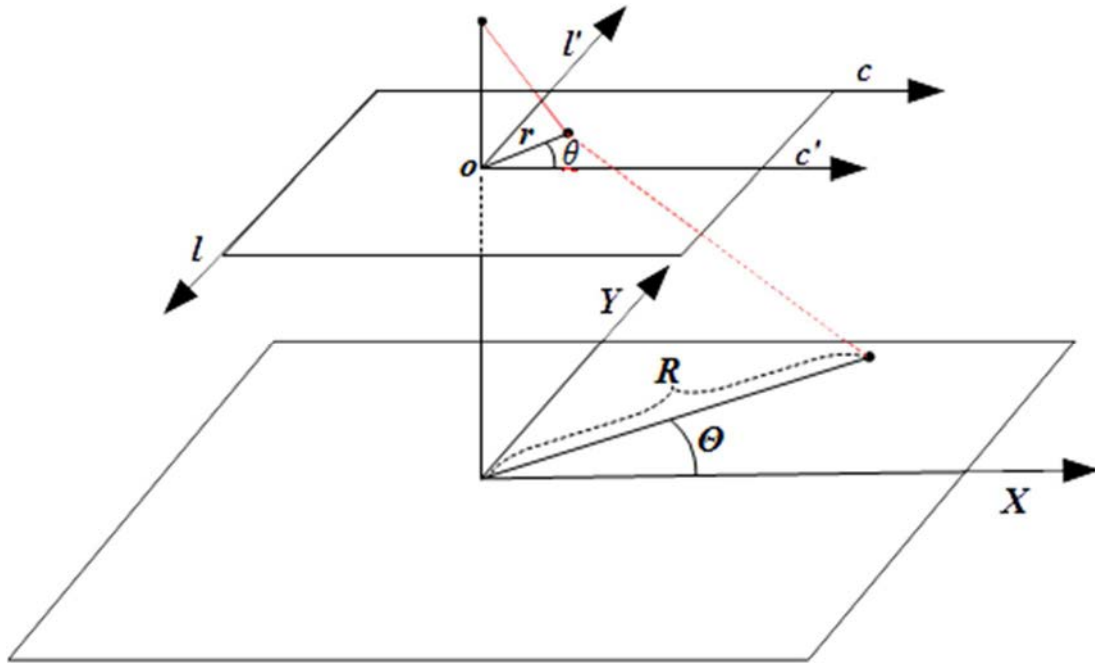


Figura 4.1 - Sistemas envolvidos no modelo de coordenadas polares.

Considerando um conjunto de pontos $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ no espaço objeto e suas respectivas projeções $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ no espaço imagem, onde $P_i(X_i, Y_i)$ é um ponto i no espaço objeto e $p_i(c_i, l_i)$ sua projeção no espaço imagem, o processo de estimação dos parâmetros do modelo é realizado conforme as etapas a seguir.

1. Transformação das coordenadas cartesianas (X_i, Y_i) do espaço objeto em coordenadas polares (θ_i, R_i) ;

$$\theta_i = \text{atan}\left(\frac{Y_i}{X_i}\right) \quad (4.6)$$

$$R_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (4.7)$$

2. Transformação das coordenadas cartesianas (c_i, l_i) do espaço imagem em coordenadas polares (θ, r_i) , onde primeiramente deve-se fazer a translação para a origem $o(c_o, l_o)$ e reflexão no eixo l' ;

$$(c_i, l_i) \Rightarrow (c_i', l_i') \Rightarrow (\theta_i, r_i)$$

$$\begin{pmatrix} c'_i \\ l'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_i \\ l_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -c_o \\ -l_o \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$\theta_i = \text{atan} \left(\frac{l'_i}{c'_i} \right) \quad (4.9)$$

$$r_i = \sqrt{c'^2_i + l'^2_i} \quad (4.10)$$

3. Com os pares R_i , r_i , que são, respectivamente, o raio da coordenada polar no espaço objeto e no espaço imagem do ponto P_i são estimados os parâmetros a_i do polinômio $F(R)$ da Equação (4.5) pelo método dos mínimos quadrados;

A reamostragem é realizada partindo de uma grade regular, onde o nível de cinza para cada um dos pixels da imagem reamostrada é determinado a partir dos níveis de cinza da imagem omnidirecional original utilizando o processo de interpolação bilinear.

O processo de determinação dos valores de brilho (ou cores) de cada pixel da imagem reamostrada apresentado na Figura 4.2, consiste nas seguintes etapas:

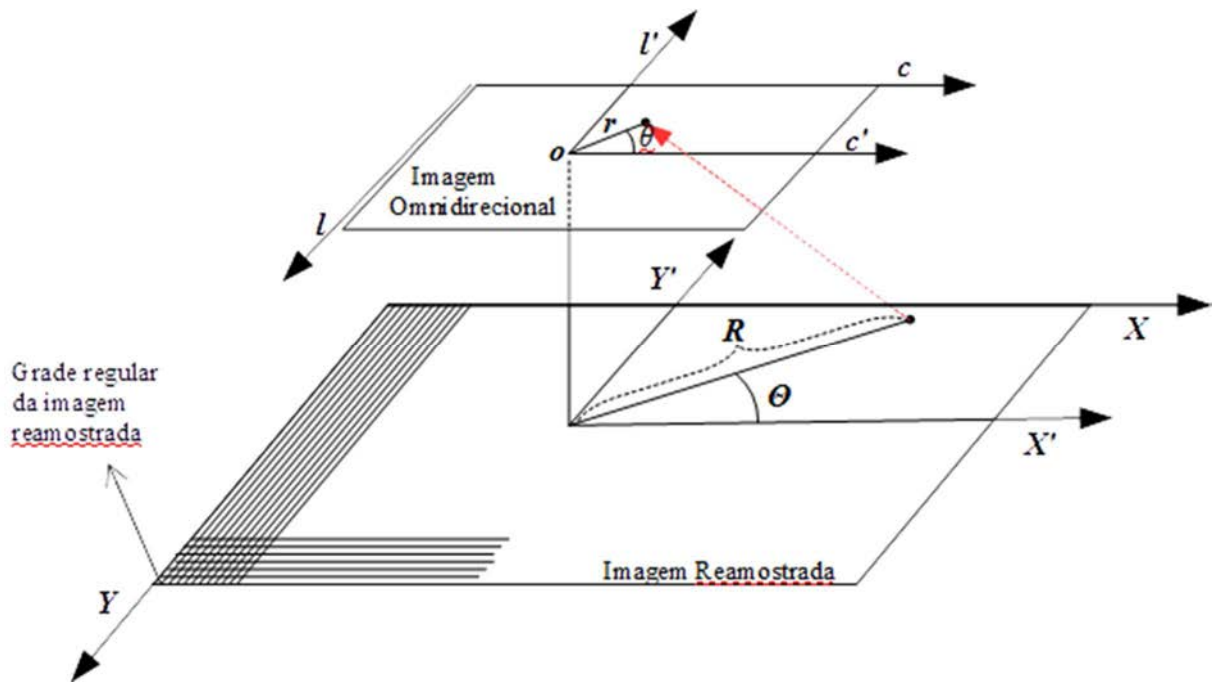


Figura 4.2 - Reamostragem da imagem omnidirecional.

1. Transformação das coordenadas (X, Y) da grade da imagem resultante do processo de reamostragem em (X', Y') através da translação para a origem no ponto $P_c (X_c, Y_c)$ centro da grade da imagem reamostrada e a reflexão no eixo X' ;

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -X_c \\ -Y_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

2. Transformação das coordenadas cartesianas (X', Y') pertencentes à imagem reamostrada em coordenadas polares (θ, R) ;

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{Y'}{X'}\right) \quad (4.12)$$

$$R = \sqrt{X'^2 + Y'^2} \quad (4.13)$$

3. Estimativa das coordenada (θ, r) , considerando os parâmetros do polinômio $F(R)$ previamente estimados, utilizando as Equações (4.3) e (4.4);
4. Transformação das coordenadas polares (θ, r) em coordenadas cartesianas (c', l') utilizando as Equações (4.14) e (4.15);

$$c' = r \cdot \cos(\theta) \quad (4.14)$$

$$l' = r \cdot \text{sen}(\theta) \quad (4.15)$$

5. Transformação das coordenadas cartesianas (c', l') em (c, l) através da reflexão em relação ao eixo l' e a translação para o canto superior esquerdo do sistema de coordenadas da imagem.

$$\begin{pmatrix} c \\ l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c' \\ -l' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_o \\ l_o \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

na qual c_o e l_o são, respectivamente, coluna e linha, no sistema de coordenadas da imagem, onde há a projeção na imagem do ápice (centro) do cone, ou seja, a coluna e linha referente à origem do sistema c', l' na imagem.

6. Interpolação do valor de brilho (ou cores) utilizando os vizinhos de c, l e atribuição deste valor à célula X, Y da imagem reamostrada.

Essa modelagem é simples, mas é dependente do alinhamento entre o eixo óptico da câmara e o eixo do cone, bem como do alinhamento dos eixos da imagem com os do sistema terrestre local. A falta desse alinhamento faz com que uma distância polar r no espaço imagem possua diferentes distâncias polares R no espaço objeto, dependendo do ângulo horizontal utilizado.

4.1.3. Modelo de distâncias polares com outras funções de mapeamento

No modelo de distâncias polares apresentado na seção 4.1.2 foram feitas algumas adaptações visando melhorar a curva que modela a correspondência entre as distâncias no espaço imagem e espaço objeto, sendo utilizadas duas outras funções no mapeamento entre as distâncias.

Essas funções foram definidas com a utilização da ferramenta interativa de ajustamento de curvas *Curve Fitting Tool* (cftool) do MATLAB, onde é possível visualizar a distribuição dos dados e com base nessa distribuição selecionar o modelo matemático que melhor se ajusta aos dados.

A ferramenta *Curve Fitting Tools* possui um conjunto de funções pré-definido, com funções racionais, exponenciais, polinomiais, além de outros modelos.

A curva que relaciona as distâncias polares no espaço objeto com suas respectivas distâncias no espaço imagem são semelhantes nas imagens omnidirecionais catadióptricas, nas quais a distância no espaço objeto aumenta de forma linear e no espaço imagem a curva de crescimento é logarítmica.

Na primeira abordagem foi utilizada a função exponencial da Equação (4.17), para a modelagem da relação entre as distâncias no espaço imagem e espaço objeto, sendo os parâmetros estimados com o método dos mínimos quadrados para modelos não lineares.

Na Equação (4.17), a e b são os parâmetros do modelo a serem ajustados, R (distância polar no espaço objeto) são valores conhecidos e r (distâncias polares no espaço imagem) são as observações.

$$r = a \cdot \sqrt[3]{R} + b \cdot R \quad (4.17)$$

Outra solução abordada foi a utilização de uma razão entre polinômios unidimensionais para modelar essa relação entre as distâncias. Essa razão é mostrada na Equação (4.18).

$$r = \frac{(a_1 \cdot R + a_2)}{(R^2 + b_1 \cdot R + b_2)} \quad (4.18)$$

onde:

- a_1, a_2, b_1, b_2 são os parâmetros do modelo, que serão definidos através de ajustamento pelo MMQ;
- R é a distância polar no espaço objeto;
- r é a distância polar no espaço imagem.

Esses polinômios foram utilizados por modelarem de forma mais efetiva a distribuição da relação entre as distâncias no espaço objeto e imagem, entre as soluções estudadas e disponíveis na ferramenta de ajuste de curvas do MATLAB.

Na análise do ajustamento das funções foram utilizadas as distâncias polares dos pontos de controle no espaço imagem e espaço objeto. A Figura 4.3 mostra a interface da ferramenta *Curve Fitting Tool*, utilizada para analisar os modelos que melhor se ajustam aos dados, permitindo alternar entre os modelos matemáticos com a visualização do ajuste da curva e seus resíduos. A estimação dos parâmetros nos experimentos foi realizada em ajustamentos realizados dentro da aplicação desenvolvida com as observações levantadas.

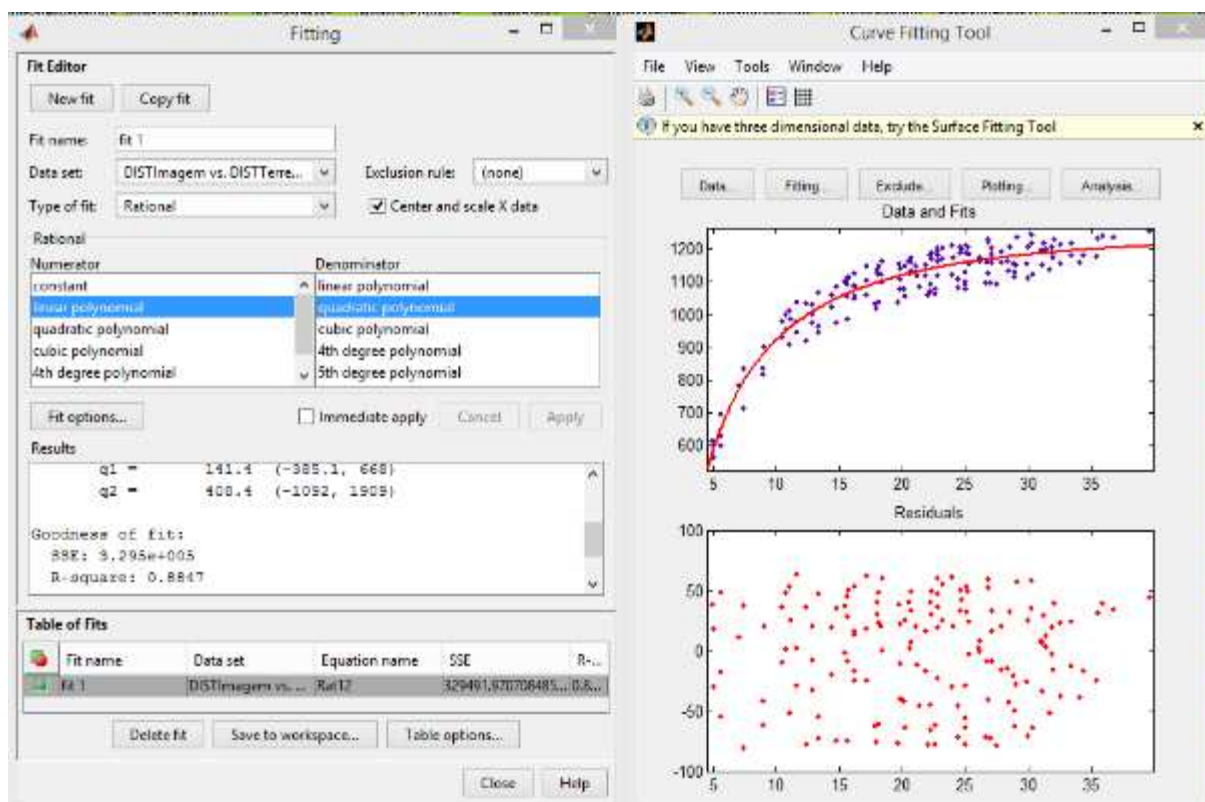


Figura 4.3 - Interface da ferramenta *Curve Fitting Tool* (cftool) do MATLAB: na janela *Fitting* (esquerda) são definidos os parâmetros para o ajustamento do modelo e na janela da direita são apresentados os dados e o modelo ajustado e os resíduos resultantes do ajustamento.

Na interface da Figura 4.3, a janela *Fitting* (esquerda) permite selecionar o tipo de modelo utilizado, nesse caso é utilizado o modelo de razão entre polinômios (*Rational*), as equações utilizadas e as opções para o ajustamento. Nessa janela ainda é possível verificar os resultados numéricos (*Results*) do processo de ajustamento da curva aos dados.

A janela *Curve Fitting Tools* da Figura 4.3 permite visualizar em *Data and Fits* o modelo ajustado com a distribuição dos dados, e em *Residuals* os resíduos resultantes do processo de ajustamento,

4.1.4. Modelo de coordenadas polares

A abordagem de ajustamento de coordenadas polares é uma melhoria no modelo de distâncias polares, com o objetivo de minimizar as distorções assimétricas causadas pela falta de alinhamento entre o eixo óptico da câmara e o eixo do cone, bem como entre os eixos da imagem e do sistema terrestre local.

No modelo de coordenadas polares é utilizado um polinômio para modelar as diferenças entre o ângulo horizontal na imagem em relação ao ângulo correspondente ao mesmo ponto no espaço objeto, permitindo resolver o problema de alinhamento (rotação) entre os eixos dos sistemas de coordenadas do espaço imagem e objeto, como também na minimização dos resíduos causados pela falta de alinhamento entre o eixo óptico e o eixo do cone.

Esse modelo utiliza as equações em (2.30) para transformar as coordenadas cartesianas no espaço objeto em coordenadas polares (θ, R) e o polinômio da Equação (4.5) para estimar a distância polar no espaço objeto.

A correção das diferenças entre os ângulos horizontais (θ) do espaço imagem e espaço objeto (Θ) pode ser realizada por uma constante, porém quando considera-se a falta de alinhamento entre os eixos óptico da câmara e do cone, torna-se necessário um polinômio como o expresso em (4.19).

$$\theta = F(\Theta) = \sum_{i=0}^n b_i \cdot \Theta^i = b_0 + b_1 \cdot \Theta + b_2 \cdot \Theta^2 + \dots + b_n \cdot \Theta^n \quad (4.19)$$

na qual θ é o ângulo horizontal a partir do eixo x da imagem previamente transladada para o centro do cone, n é o grau do polinômio para cálculo do ângulo horizontal, e b_i são os coeficientes do polinômio, que deverão ser previamente estimados.

A distância polar r dada pela Equação (4.5) e o ângulo θ da Equação (4.19) definem as coordenadas polares no espaço imagem, transformadas em coordenadas cartesianas retangulares c', l' pelas Equações (4.14) e (4.15).

Para transformar c', l' em linha (l) e coluna (c) é necessário transladar para a origem da imagem, no canto superior esquerdo e refletir o eixo y , utilizando a Equação (4.16).

Os valores de $a_0, a_1, \dots, a_n$ e $b_0, b_1, \dots, b_n$ são estimados através de ajustamento de observações utilizando o método dos mínimos quadrados. O processo detalhado é apresentado nos passos a seguir.

1 – Realizar medidas dos pontos de controle (c, l) no espaço imagem e (X, Y) no espaço objeto, conforme detalhado no processo de definição dos parâmetros da projeção (considerar Z constante);

2 – Para transformar as medidas (c, l) em (c', l'), fazer a translação para o local da imagem onde é projetado o centro do cone, para que os dois sistemas estejam com a origem na mesma posição (este valor é constante e definido a priori por meio da identificação visual da posição do topo do cone na imagem) e realizar a reflexão do eixo y da imagem, visando alinhar os eixos dos sistemas de coordenadas do espaço objeto e imagem;

3 – Transformar as coordenadas (c', l') em coordenadas polares (θ, r) no espaço imagem e as coordenadas (X, Y) em coordenadas polares (Θ, R) no espaço objeto;

4 – Considerando n distâncias polares R no espaço objeto e as respectivas distâncias polares r no espaço imagem, realiza-se um ajustamento com um polinômio de sexto grau pelo método dos mínimos quadrados para a estimação dos parâmetros utilizados na projeção das distâncias do espaço objeto para o espaço imagem.

5 – Com os n ângulos θ no espaço imagem, os correspondentes ângulos horizontais θ no espaço objeto, utilizando a função polinomial (terceiro grau) da Equação (4.19), estima-se os parâmetros pelo MMQ, o que permite a transformação entre os ângulos do espaço objeto e espaço imagem.

4.2. ANÁLISE DOS MODELOS MATEMÁTICOS COM IMAGENS GERADAS POR SIMULAÇÃO

Visando entender as características da imagem gerada por uma câmara omnidirecional catadióptrica e testar os modelos propostos para a retificação da imagem, foram realizadas simulações utilizando o software POV-Ray. Nesse processo foram utilizados os seguintes modelos:

- RFM com a utilização de coordenadas bidimensionais com polinômios de 3° e 4° ordem;
- Modelo de distâncias polares com polinômios de 6° a 8° graus;
- O modelo de coordenadas polares foi implementado, utilizando um polinômio de 3° grau para as diferenças angulares e um polinômio de 6° grau para as distâncias.

O experimento consistiu na geração de feições do espaço objeto e da imagem com um sistema omnidirecional similar ao proposto, a estimação dos parâmetros dos modelos, a avaliação da precisão e reamostragem com os modelos propostos.

4.2.1. Modelagem do sistema e do ambiente

Para esta simulação foi definida uma câmara perspectiva com o centro perspectivo voltado para o zênite e sobre essa câmara foi colocado um cone espelhado a uma distância de 50 mm, com o eixo óptico alinhado com o eixo de formação do cone. A base do cone tem o diâmetro de 200 mm com altura de 40 mm e a câmara com distância focal de 52 mm.

Na simulação do espaço objeto, sobre um plano foi traçado um conjunto de linhas no sentido horizontal e outro conjunto no sentido vertical. As linhas têm largura de 1 m e comprimento de 100 m. A Figura 4.4 apresenta o espaço objeto simulado.

O sistema catadióptrico, formado pela câmara e espelho, foi colocado no centro dos conjuntos de linhas a uma altura de 175 cm, sendo representado pelo ponto no centro da imagem aérea, mostrada na Figura 4.4.

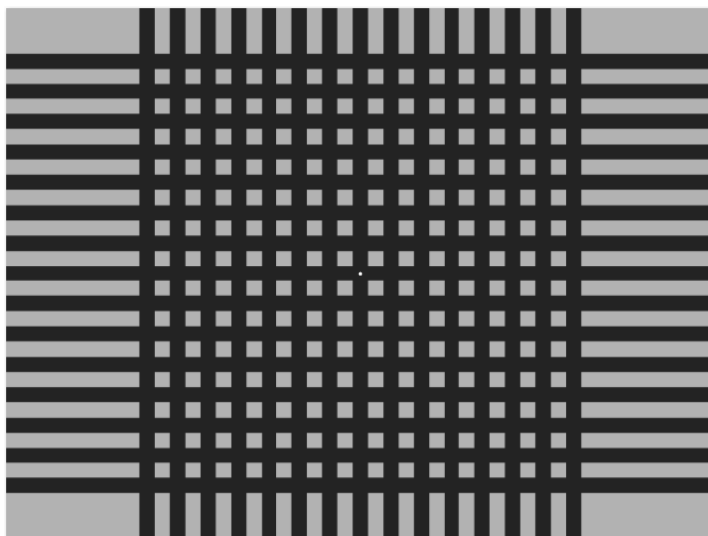


Figura 4.4 - Vista aérea do ambiente usado na simulação com o POV-Ray.

4.2.2. Geração das imagens

A imagem formada pelo sistema simulado proposto possui como principal característica a variação da resolução espacial: nas áreas próximas à câmara a resolução é maior e nas áreas mais distantes a resolução é menor. A Figura 4.5 apresenta a imagem resultante da simulação com a câmara omnidirecional catadióptrica utilizando os parâmetros reais do sistema.

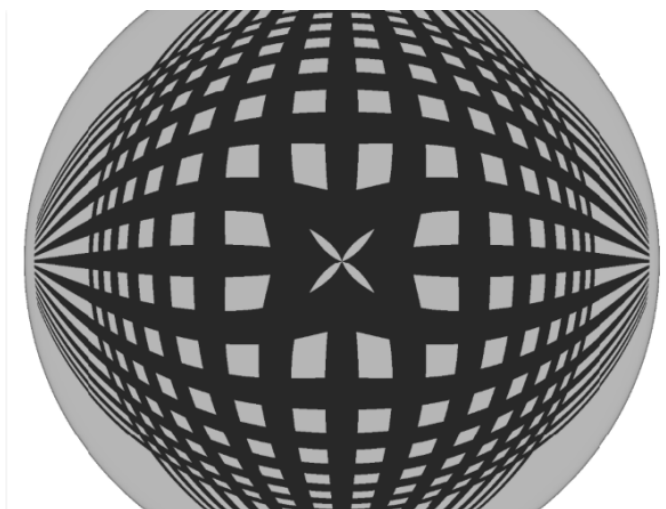


Figura 4.5 - Imagem gerada pela simulação com a câmara catadióptrica.

Com a imagem simulada é possível verificar que o espelho cônico aumenta o campo de visão, possibilitando ver as linhas do início ao final, mesmo com a câmara a uma pequena distância do terreno. Por outro lado, percebe-se as deformações nas extremidades da imagem.

Nesta etapa do trabalho também foi investigada a possibilidade de utilização de um espelho esférico. A imagem gerada com esse espelho é apresentada na Figura 4.6, onde se pode verificar que o espelho esférico diminui muito a resolução espacial nas áreas mais externas da imagem. Dessa forma, este tipo de espelho não seria apropriado para esse projeto, que necessita de uma boa resolução nas áreas intermediárias do sistema de captura.



Figura 4.6 - Imagem gerada pela simulação com espelho esférico.

As imagens simuladas são de grande importância, pois evitam gastos de tempo e recursos com o trabalho de campo e a medição dos pontos no espaço objeto, mas não podem substituir imagens reais de campo. Em um trabalho preliminar essas imagens servem para verificar a viabilidade da proposta.

4.2.3. Avaliação da adequação dos modelos

Para a estimação dos parâmetros dos modelos com dados simulados foi utilizada uma malha de 248 pontos de controle com coordenadas planas no espaço objeto e suas respectivas coordenadas no espaço imagem, que foram medidas manualmente.

A avaliação dos resultados dos ajustes dos modelos aos dados simulados foi realizada com um conjunto de 10 pontos de verificação (*check*) no espaço objeto, a partir da comparação de suas coordenadas projetadas pelo modelo com as medidas no espaço imagem. O Quadro 4.1 apresenta as coordenadas dos pontos de verificação.

Quadro 4.1 - Pontos de verificação com as coordenadas no espaço objeto (cm) e imagem (pixels).

Pontos de Verificação			
X	Y	Linha	Coluna
-6500	6500	226	426
-500	5500	190	762
6500	6500	226	1173
-7500	2500	442	328
-7500	500	567	315
8500	500	570	1312
3500	-1500	719	1079
5500	-2500	781	1195
-6500	-4500	882	391
500	-8500	1112	830

O cálculo dos erros nas coordenadas foi realizado através da diferença entre a estimativa em pixel das coordenadas do ponto projetado do espaço objeto para o espaço imagem e medida deste ponto realizada na imagem.

As estimativas calculadas para o conjunto de pontos foi o EMQ (Erro Médio Quadrático) e o REMQ (Raiz do Erro Médio Quadrático), que são calculados utilizando as Equações (4.20) e (4.21) respectivamente.

$$EMQ = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n-1} \quad (4.20)$$

$$REMQ = \sqrt{EMQ} \quad (4.21)$$

nas quais:

- x_i é o conjunto de valores medidos na imagem;
- $\hat{x}_i$ é o valor estimado com o modelo, e;
- n é a quantidade de elementos no conjunto.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados das análises das discrepâncias nos pontos de verificação para o Modelo de Funções Racionais de 3° e 4° graus respectivamente.

Tabela 4.1 - Resultado da avaliação dos pontos de verificação para o modelo RFM de 3° grau.

RFM – 3o. Grau (medidas em pixels)						
Linha Medida	Linha Estimada	Erro Linha	Coluna Medida	Coluna Estimada	Erro Coluna	Erro Resultante
226	225,4	0,6	426	425,7	-0,3	0,7
190	199,9	-9,9	762	763,5	1,5	10,0
226	225,4	0,6	1173	1174,4	1,4	1,5
442	443	-1	328	330,4	2,4	2,6
567	567,8	-0,8	315	318,4	3,4	3,5
570	569,8	0,2	1312	1311,4	-0,6	0,6
719	719,7	-0,7	1079	1078,9	-0,1	0,7
781	776,7	4,3	1195	1188	-7	8,2
882	882,4	-0,4	391	392,7	1,7	1,7
1112	1111,2	0,8	830	830,1	0,1	0,8
EMQ		13,35			8,21	21,56
REMQ		3,65			2,87	4,64

Tabela 4.2 - Resultado da avaliação dos pontos de verificação para o modelo RFM de 4º grau.

RFM - 4º. Grau (medidas em pixels)						
Linha Medida	Linha Estimada	Erro Linha	Coluna Medida	Coluna Estimada	Erro Coluna	Erro Resultante
226	226	0,0	426	426	0,0	0,0
190	199	-9,0	762	763,8	-1,8	9,2
226	226	0,0	1173	1173,9	-0,9	0,9
442	443,8	-1,8	328	329,6	-1,6	2,4
567	568	-1,0	315	317,2	-2,2	2,4
570	570	0,0	1312	1312,2	-0,2	0,2
719	719,2	-0,2	1079	1078,7	0,3	0,4
781	775,8	5,2	1195	1188,1	6,9	8,6
882	881,5	0,5	391	392,7	-1,7	1,8
1112	1112,5	-0,5	830	830,1	-0,1	0,5
EMQ		12,54			6,90	19,43
REMQ		3,54			2,63	4,41

As discrepâncias tiveram um comportamento semelhante nos pontos e mostram que o modelo RFM não consegue modelar corretamente alguns pontos na imagem, porém o REMQ em torno de 3 pixels é satisfatório para a aplicação proposta pelo trabalho.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados da análise das discrepâncias nos pontos de verificação para os modelos com distância polar.

Tabela 4.3 - Resultados para o modelo de polinômio para distâncias polares de 6º grau.

Polinômio distância polar – 6º. Grau (medidas em pixels)						
Linha Medida	Linha Estimada	Erro Linha	Coluna Medida	Coluna Estimada	Erro Coluna	Erro Resultante
226	226,4	-0,4	426	426,8	-0,8	0,9
190	189,6	0,4	762	762,6	-0,6	0,7
226	226,4	-0,4	1173	1173,2	-0,2	0,4
442	442,7	-0,7	328	328,1	-0,1	0,7
567	567,6	-0,6	315	314,5	0,5	0,8
570	569,9	0,1	1312	1311,8	0,2	0,2
719	720,6	-1,6	1079	1079,8	-0,8	1,8
781	780	1,0	1195	1196,8	-1,8	2,1
882	883,2	-1,2	391	391	0,0	1,2
1112	1112,2	-0,2	830	830,1	-0,1	0,2
EMQ		0,71			0,58	1,29
REMQ		0,84			0,76	1,14

Tabela 4.4 - Resultados para o modelo de polinômio para distâncias polares de 8° grau.

Polinômio distância polar – 8°. Grau (medidas em pixels)						
Linha Medida	Linha Estimada	Erro Linha	Coluna Medida	Coluna Estimada	Erro Coluna	Erro Resultante
226	226,8	-0,8	426	426,4	-0,4	0,9
190	188,9	1,1	762	762,7	-0,7	1,3
226	226,8	-0,8	1173	1173,6	-0,6	1,0
442	442,7	-0,7	328	328	0,0	0,7
567	567,6	-0,6	315	314,6	0,4	0,7
570	569,9	0,1	1312	1312,2	-0,2	0,2
719	719,9	-0,9	1079	1081,3	-2,3	2,5
781	780,4	0,6	1195	1196	-1,0	1,2
882	883,1	-1,1	391	391	0,0	1,1
1112	1111,8	0,2	830	830,1	-0,1	0,2
EMQ		0,64			0,83	1,48
REMQ		0,80			0,91	1,21

O comportamento com os polinômios de 6° e 8° ordem são bem semelhantes, com uma diferença muito pequena entre eles, com o polinômio de 6° grau modelando de forma mais satisfatória os dados. O modelo de coordenadas polares alcançou os melhores resultados, conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados para o modelo de coordenadas polares.

Coordenadas Polares (medidas em pixels)						
Linha Medida	Linha Estimada	Erro Linha	Coluna Medida	Coluna Estimada	Erro Coluna	Erro Resultante
226	226,8	-0,8	426	426,8	-0,8	1,1
190	188,9	1,1	762	762,6	-0,6	1,3
226	226,8	-0,8	1173	1173,2	-0,2	0,8
442	442,5	-0,5	328	328,2	-0,2	0,5
567	567,3	-0,3	315	314,5	0,5	0,6
570	569,9	0,1	1312	1311,8	0,2	0,2
719	719,9	-0,9	1079	1079,8	-0,8	1,2
781	780,4	0,6	1195	1196,8	-1,8	1,9
882	883,2	-1,2	391	391,1	-0,1	1,2
1112	1111,8	0,2	830	830,1	-0,1	0,2
EMQ		0,61			0,59	1,20
REMQ		0,78			0,77	1,09

A Tabela 4.6 apresenta um resumo comparando os resultados alcançados com a análise dos pontos de verificação com todos os modelos utilizados.

Tabela 4.6 - Comparação entre os modelos propostos.

Modelo	REMQ (pixels)
RFM – 3° grau	4,64
RFM – 4° grau	4,41
Distância Polar – Polinômio 6° grau	1,14
Distância Polar – Polinômio 8° grau	1,21
Coordenadas Polares	1,09

O modelo RFM com polinômios de 3° grau obteve um REMQ de 4,64 pixels, porém com a utilização de polinômio de 4° grau o REMQ diminuiu para 4,41 pixels. Essa diminuição indica que o polinômio de 4° grau modela de forma mais satisfatória a relação entre os pontos do espaço objeto e imagem.

Os modelos de polinômios de distâncias polares de 6° e 8° graus e de coordenadas polares obtiveram respectivamente 1,14, 1,21 e 1,09 pixels de REMQ, portanto, próximos a 1 pixel.

Com a Tabela 4.6 é possível verificar que o modelo de coordenadas polares modela de forma mais satisfatória o problema, com resultados 4 vezes melhores que os alcançados com a utilização do RFM.

4.2.4. Reamostragem das imagens

Após a determinação dos coeficientes dos modelos foram implementados os algoritmos para a reamostragem da imagem. A Figura 4.7 apresenta as imagens reamostradas através do modelo RFM com polinômios de 3° e 4° graus, onde o aumento na complexidade dos polinômios utilizados não melhorou significativamente a imagem resultante.

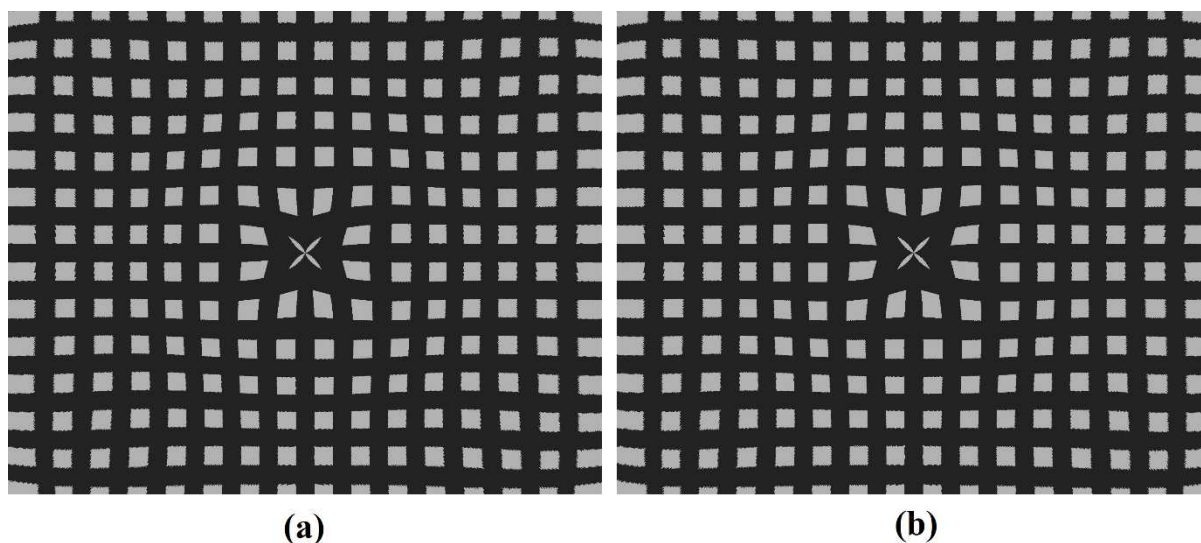


Figura 4.7 - Imagens reamostradas com modelo RFM. (a) RFM 3° grau e (b) RFM 4° grau.

Com o modelo de distâncias polares foram efetuadas reamostragens utilizando polinômios de 6° e 8° grau, as imagens resultantes são apresentadas na Figura 4.8, na qual (a) é a imagem resultante com distâncias polares com polinômio de 6° grau e (b) com polinômio de 8° grau.

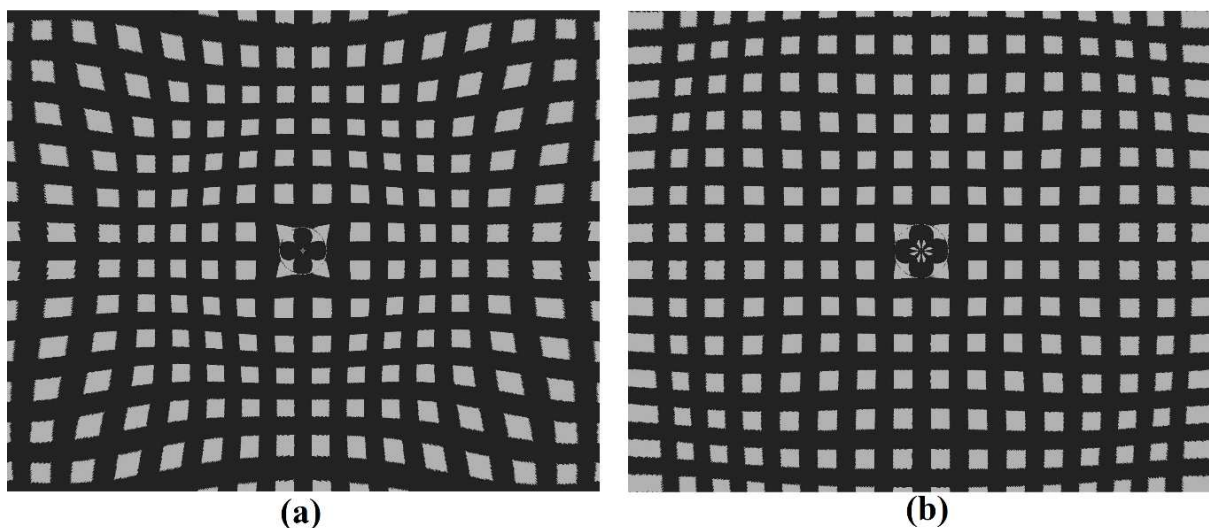


Figura 4.8 - Imagens reamostradas com polinômios de (a) 6° e (b) 8° grau.

Analisando visualmente as imagens foi verificado que o aumento do grau do polinômio melhora a imagem resultante, tornando-a mais próxima ao ambiente da simulação.

A Figura 4.9 apresenta a imagem reamostrada utilizando o modelo de coordenadas polares, onde o grau do polinômio para a modelagem das distâncias é de 6° grau e para o ângulo horizontal de 3° grau.

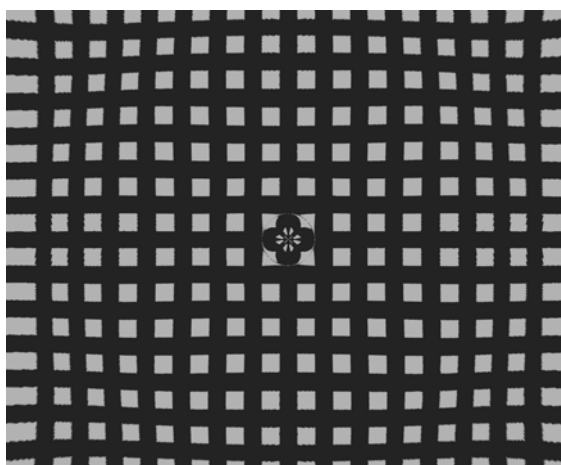


Figura 4.9 - Imagem reamostrada utilizando modelo de coordenadas polares.

A imagem reamostrada utilizando o modelo de coordenadas polares é a mais próxima ao ambiente de simulação, apresentando maior diferença para o modelo de distância polares com polinômio de 8° grau nas áreas mais próximas às bordas da imagem.

Em todas as imagens reamostradas, a área central não é reamostrada corretamente, pois a câmara e o espelho estão muito próximos e a quantidade de pontos nesse local é pequena para que seja modelada corretamente.

4.3. ANÁLISE DO MODELO MATEMÁTICO COM IMAGENS REAIS CAPTURADAS COM O SISTEMA CONSTRUÍDO

Nesse conjunto de experimentos foram utilizados os mesmos modelos da análise com imagens geradas por simulação com o acréscimo do modelo de distâncias polares com função exponencial e do modelo de distâncias polares utilizando uma razão entre um polinômio de primeiro grau e um polinômio de segundo grau.

4.3.1. Campo de calibração

O processo de estimação dos parâmetros do modelo necessita de um conjunto de coordenadas medidas no espaço objeto e suas respectivas coordenadas no espaço imagem. O conjunto de medidas pode ser obtido através da aquisição de imagens de uma área com marcações (campo de calibração pré-sinalizado), a posterior medição das coordenadas desses pontos na imagem e no campo de calibração utilizado.

Dessa forma uma única medição no espaço objeto é necessária para várias calibrações, porém devem ser registradas algumas imagens do campo de calibração sem alterações na configuração do sistema de captura, ou seja, o sistema deve possuir a mesmas configurações do trabalho de campo realizado.

O campo de calibração deve ser uma área plana com marcações no solo, visíveis durante a aquisição da imagem e que permitem a realização de medidas na imagem. Essas marcações devem cobrir o máximo de área visível da imagem e permitir a definição de uma grade quase regular de pontos.

O campo de calibração utilizado nesse projeto foi um estacionamento, onde há marcações das vagas, formando uma grade regular. O campo de calibração é apresentado na imagem da Figura 4.10.

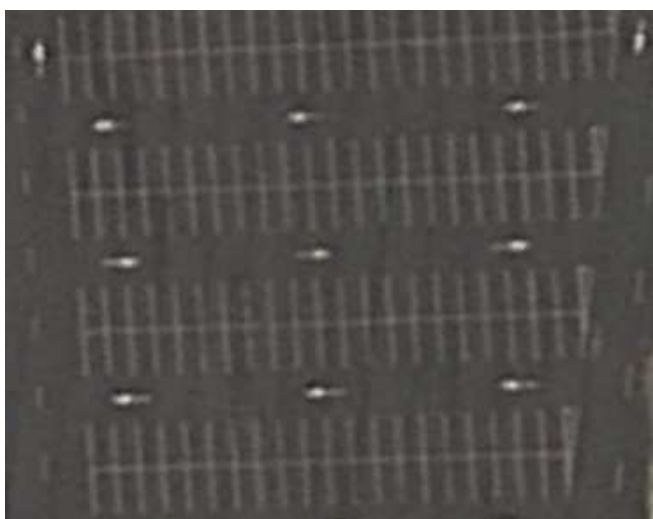


Figura 4.10 - Área utilizada como campo de calibração.
Fonte: Google Earth

Nessa área foi definido um sistema de coordenadas planas com a origem no ponto nadir, sendo o eixo Y definido pelo sentido de movimento da plataforma (veículo), o eixo Z tem sentido zenital e o eixo X formando um sistema ortogonal dextrogiro. A Figura 4.11 apresenta o sistema de coordenadas definido no espaço objeto, o eixo Z não é apresentado na figura, pois serão utilizadas apenas planas (X, Y).

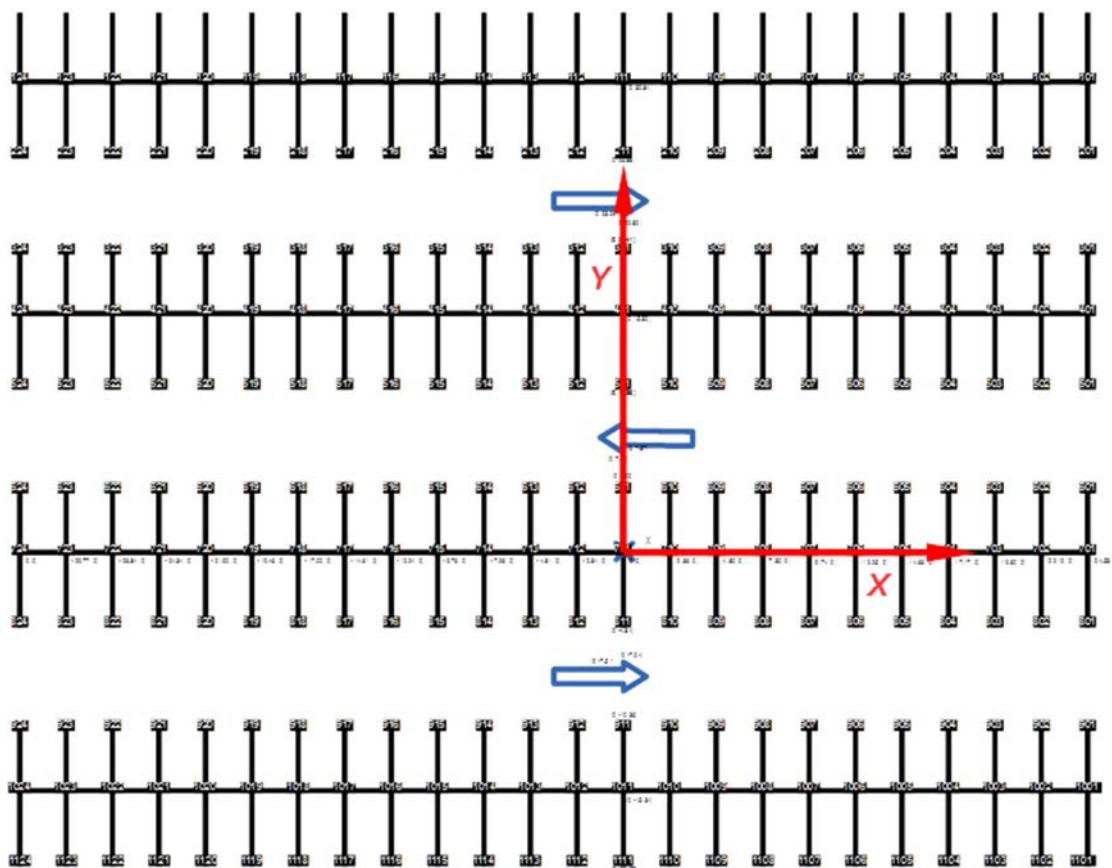


Figura 4.11 - Sistema de coordenada local definido para o espaço objeto (estacionamento).

Esse campo de calibração deve permitir medidas em distância radial de 30 m para que a imagem reamostrada possa cobrir uma área quadrada de 40 X 40 m, onde seja possível obter informações visuais de trevos das rodovias e outras áreas de interesse, que serão utilizadas na correspondência com a imagem orbital.

As imagens para a calibração podem ser feitas utilizando o veículo equipado com o sistema omnidirecional, sendo necessário apenas o posicionamento do veículo na origem do sistema local definido e o acionamento do dispositivo para tomada da imagem. Essa abordagem evita erros relativos à altura da câmara, pois não realizada nenhuma alteração na disposição do sistema, porém, parte do veículo cobrirá algumas marcações pertencentes à grade de pontos e o posicionamento do veículo sobre a origem do sistema não é garantido.

Outra forma para a tomada das imagens é a colocação do sistema sobre um tripé com base niveladora, com altura igual àquela utilizada na coleta das imagens (sobre o veículo). O eixo formado pelo eixo óptico da câmara e o eixo de formação do cone deverá cruzar o solo na origem do

sistema local definido e os eixos das colunas e linhas da imagem estarão alinhados com os eixos X e Y do sistema local.

4.3.1.1. Levantamento da grade de pontos do campo de calibração

Considerando as tarefas do trabalho em campo, o levantamento da grade de pontos do campo de calibração é a que exige maior esforço na sua execução, pois consiste em determinar as coordenadas de cada um dos pontos na grade.

Visando tornar essa etapa mais simples foi utilizado uma área que possua marcações regulares como estacionamentos e quadras poliesportivas. A partir de um conjunto de medidas de distâncias sobre os eixos X e Y no espaço objeto foi determinada todas as coordenadas. Apesar de facilitar a determinação das coordenadas dos pontos da grade, esse método pode inserir erros devidos à não perpendicularidade das linhas, como também marcações desalinhadas e variações de altitude.

A forma mais precisa para o levantamento desses pontos é a utilização de equipamentos de precisão como estações totais combinadas com um receptor GNSS, que permite a definição das coordenadas com precisão milimétrica, dependendo das características e tempo de rastreo.

4.3.2. Pontos de controle e verificação

Após a aquisição de imagens do campo de calibração com os sistemas de coordenadas alinhados, foi realizada a medição de forma manual dos pontos de controle e verificação na imagem e o seu relacionamento com as coordenadas dos mesmos no espaço objeto.

Para a avaliação dos modelos foram utilizados 210 pontos de controle e 21 pontos de verificação e a Figura 4.12 apresenta a distribuição desses pontos no espaço imagem e objeto, onde no espaço objeto os pontos de controle formam uma grade quase regular.

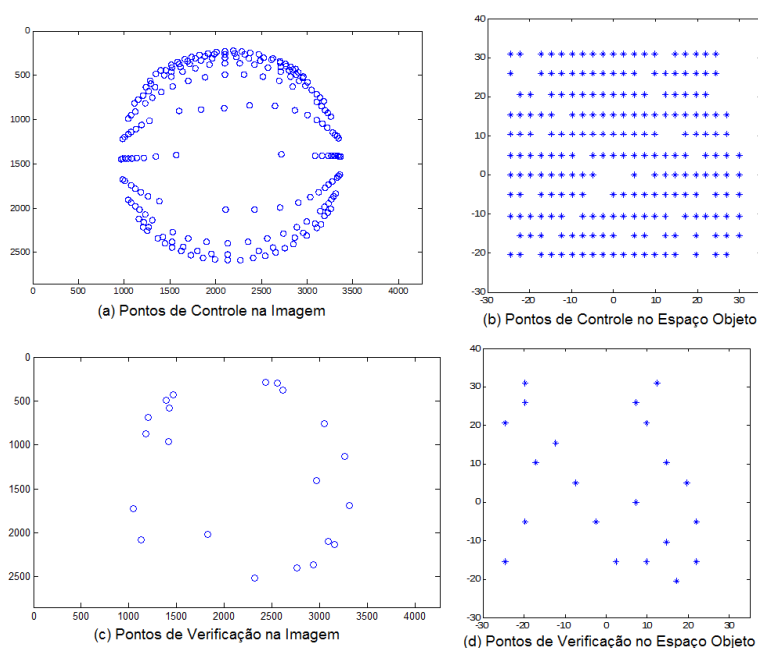


Figura 4.12 - Distribuição dos pontos de controle e verificação.

Os pontos de verificação no espaço objeto estão distribuídos por todo o campo de calibração, exceto na área central da imagem. Entretanto, isto não deverá afetar os resultados, pois essa área central é coberta pela estrutura da câmara omnidirecional e do veículo.

4.3.3. Análise dos resíduos

Com as coordenadas dos pontos de controle no espaço objeto e suas respectivas fotocoordenadas foram realizados ajustamentos para a estimação dos parâmetros para os modelos. Os resíduos do processo de estimação dos parâmetros do modelo matemático foram analisados para verificar o ajustamento do modelo em relação aos pontos de controle.

A Tabela 4.7 apresenta as estatísticas dos resíduos do processo de estimação dos parâmetros do modelo, onde o erro médio é a média das resultantes dos resíduos e REMQ é a raiz do erro médio quadrático dos resíduos.

Tabela 4.7 – Estatísticas dos resíduos do processo de estimação dos parâmetros dos modelos.

Modelo	REMQ (pixels)
Distâncias polares com polinomial de 6° grau	39,38
Distâncias polares com polinomial de 8° grau	39,37
Distâncias polares com função exponencial	39,52
Distâncias polares com razão entre polinômios	34,55
RFM com Polinômios de 3° Grau	17,95
RFM com Polinômios de 4° Grau	13,46
Coordenadas Polares	9,25

Nessa tabela, os resultados do RFM foram melhores que aqueles obtidos pelos modelos baseados nas distâncias polares, ao contrário do obtido nos experimentos com dados simulados. No modelo de distâncias polares, a mudança da função que relaciona as medidas no espaço imagem e espaço objeto não causa grande modificação nos resultados do processo de calibração, sendo que a utilização da função com razão entre polinômios alcança os melhores resultados.

Quando utilizado um modelo de coordenadas polares, no qual o ângulo horizontal e a distância são ajustados por polinômios, o efeito causado pela falta de alinhamento entre os eixos do sistema catadióptrico é minimizado.

Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, que apresentam, respectivamente, os resultados dos processos de estimação dos parâmetros para os modelos RFM de 3° grau, RFM de 4° grau e Coordenadas Polares, a unidade do valor desses resíduos é pixels da imagem e os pontos (eixo x) estão organizados pelos identificadores na ordem numérica crescente e os gráficos representam:

- (a) os resíduos em linha do processo de estimação dos parâmetros para todos os pontos de controle;
- (b) os resíduos em coluna do processo;
- (c) a resultante dos resíduos para cada um dos pontos de controle;

- (d) os pontos de controle estimados pelo modelo ajustado e esses mesmos pontos medidos na imagem.

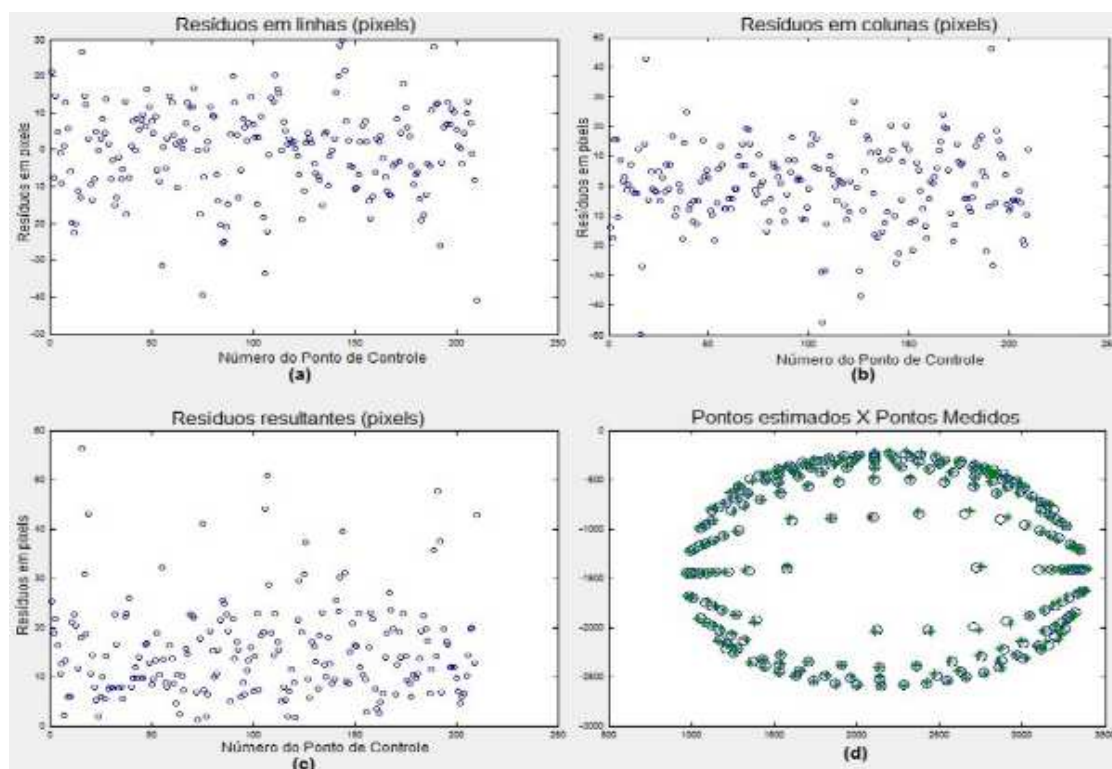


Figura 4.13 - Resultados da Estimação dos Parâmetros utilizando o RFM com Polinômios de 3° Grau.

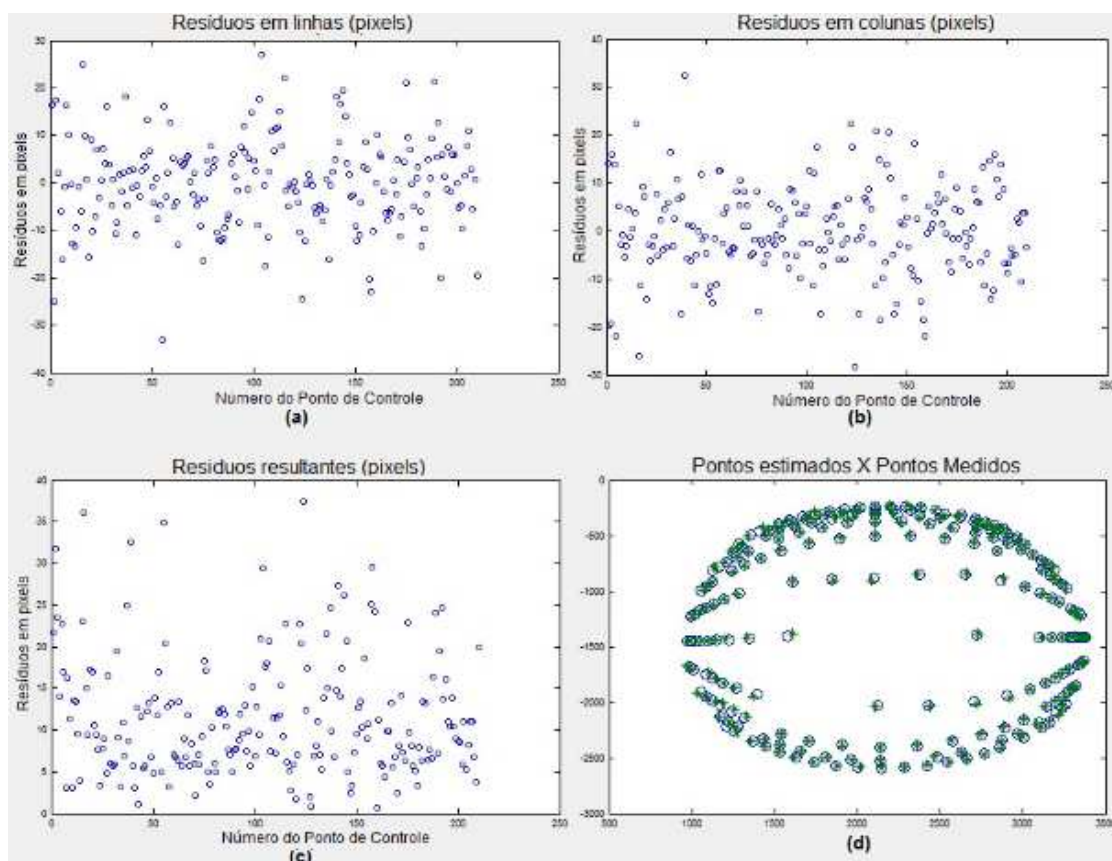


Figura 4.14 - Resultados da Estimação dos Parâmetros utilizando o RFM com Polinômios de 4° Grau

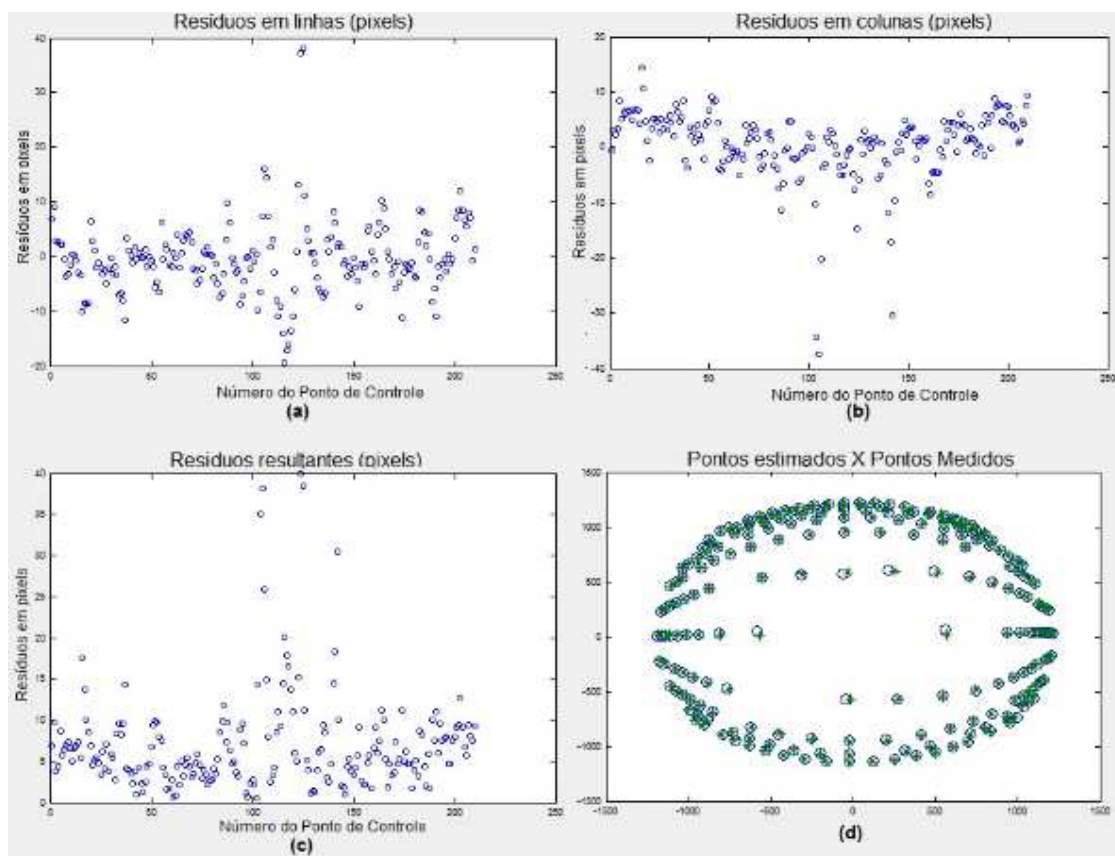


Figura 4.15 - Resultados da Estimação dos Parâmetros utilizando o modelo de Coordenadas Polares.

No modelo de ajustamento por distâncias polares, a mudança na equação do modelo que relaciona as medidas no espaço imagem e espaço objeto não causa grande modificação nos resultados do processo de calibração, sendo que a utilização da razão entre polinômios da Equação (4.18) alcança os melhores resultados entre os modelos de distâncias polares.

Os modelos que utilizam distâncias polares necessitam de um ponto central para o cálculo da distância polar na imagem, o ponto central para todos os modelos é linha 1454 e coluna 2162.

Nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, são apresentados, respectivamente, os resultados dos processos de estimação para os modelos de distâncias polares com a utilização de polinômio unidimensional de 6º grau, utilização da razão entre polinômios da Equação (4.18) e utilização da função exponencial da Equação (4.17). Nessas figuras os gráficos representam:

- (a) o relacionamento entre as distâncias na imagem em pixel (eixo y) e a distância no espaço objeto (eixo x) em metros, onde os pontos em azul são as distâncias na imagem em função da distância no terreno e a curva (verde) o ajustamento do modelo;
- (b) os resíduos resultantes em pixel para o modelo;
- (c) os pontos de controle medidos na imagem e o ponto estimado pelo modelo, dessa forma mostrando as discrepâncias.

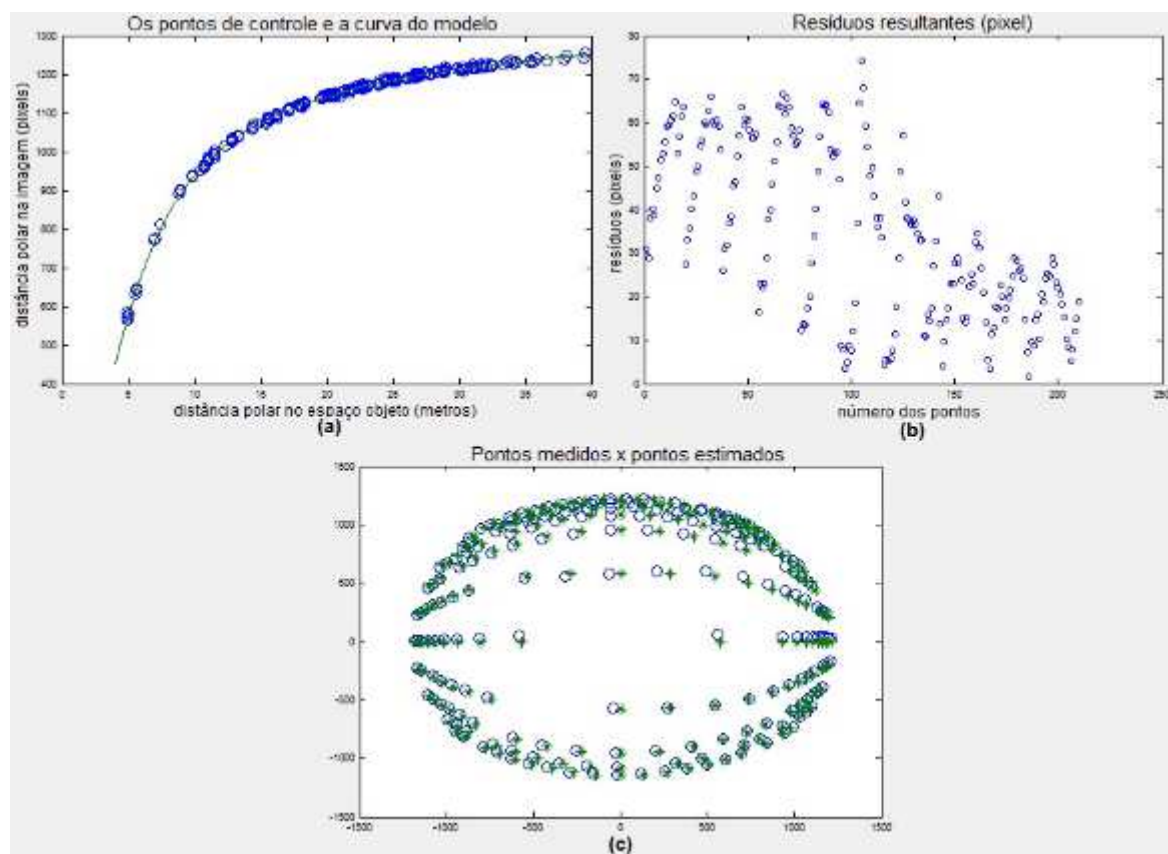


Figura 4.16 - Resultados da Estimação dos parâmetros utilizando o modelo de Distância Polar com Polinômio Unidimensional de 6º Grau

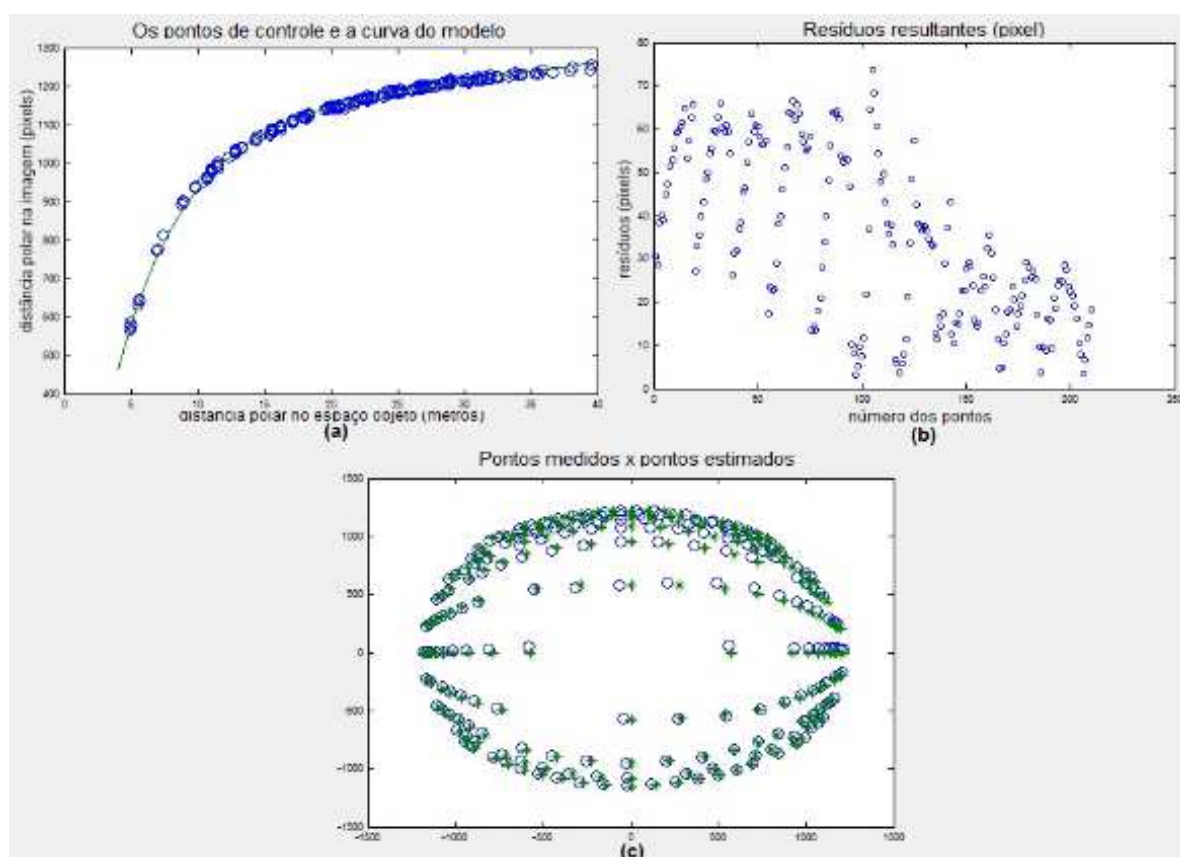


Figura 4.17 - Resultados utilizando o modelo de Distâncias Polares com função Exponencial da Equação (4.17).

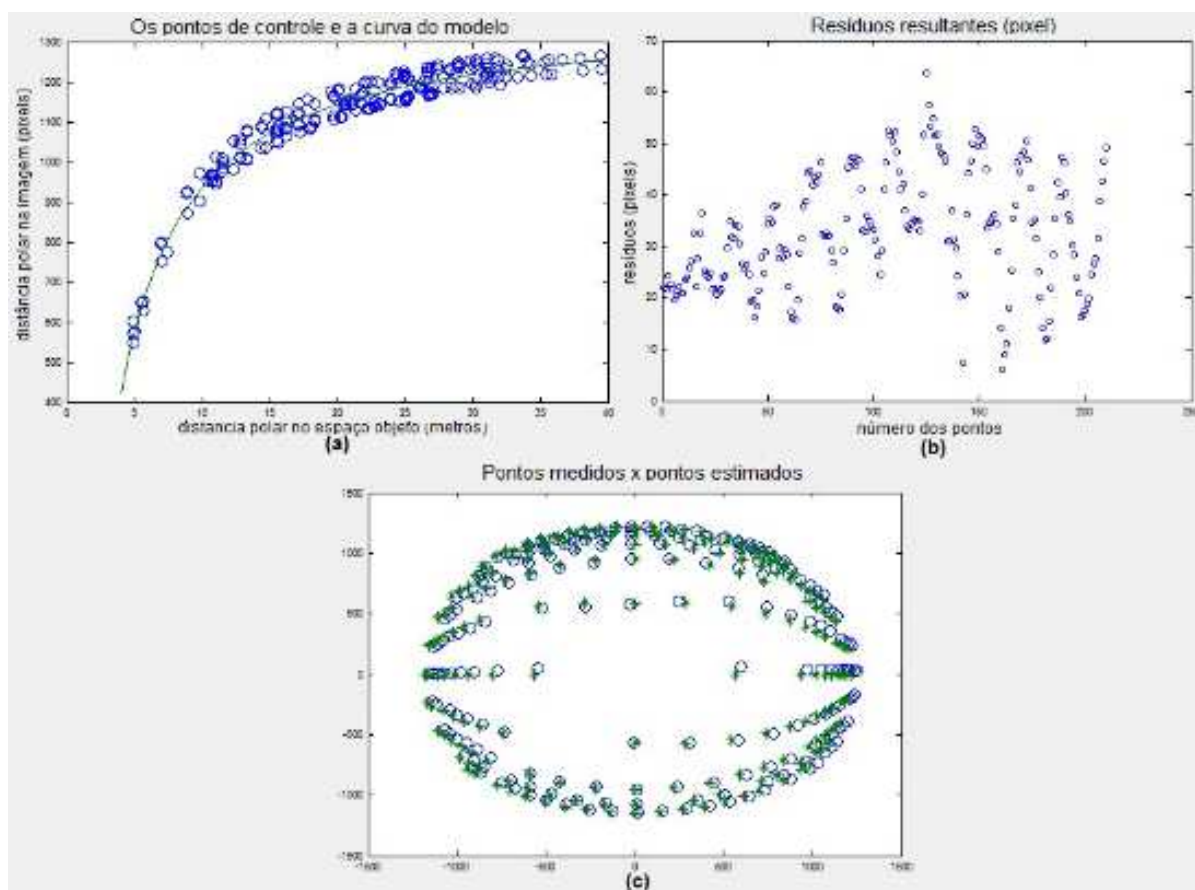


Figura 4.18 - Resultados utilizando o modelo de Distâncias Polares com Razão entre Polinômios apresentada na Equação (4.18).

No experimento em campo, os modelos RFM de 3° e 4° grau obtiveram os melhores resultados no ajustamento, sendo que o REMQ nos resíduos obtidos pelos modelos de distâncias polares é duas vezes maior que o do modelo RFM com polinômios de 3° grau e aproximadamente 4 vezes maior que o do modelo RFM com polinômios de 4° grau. Esse resultado foi oposto ao encontrado com dados simulados, quando os resultados com modelos de distâncias polares foram aproximadamente 3 vezes melhores que os resultados com RFM.

Essa diferença ocorre devido a fatores como: a falta de alinhamento entre o eixo óptico da câmara e o eixo de formação do cone e o erro no nivelamento da câmara durante a aquisição das imagens. O RFM, por outro lado, consegue modelar esses fatores, pois o modelo inclui a projeção perspectiva.

O modelo de coordenadas polares alcançou o melhor resultado nos dois experimentos, pois os efeitos causados pelos fatores apresentados são minimizados pelo ajuste no ângulo horizontal.

4.3.4. Avaliação dos pontos de verificação

A avaliação dos pontos de verificação permite analisar as discrepâncias entre os pontos da imagem estimados pelos modelos com os parâmetros ajustados e os pontos medidos na imagem. O REMQ foi calculado para os 21 pontos de verificação.

Para o conjunto de pontos de verificação selecionado, as estatísticas das discrepâncias encontradas (vide Tabela 4.8) foram bem próximas às estatísticas dos resíduos encontrados durante o processo de estimação dos parâmetros dos modelos da Tabela 4.7.

Tabela 4.8 - Resultado da análise das discrepâncias dos pontos de verificação

Modelo	REMQ (pixels)
Distâncias polares com polinômio de 6° Grau	36,0009
Distâncias polares com polinômio de 8° Grau	35,9733
Distâncias polares com razão entre polinômios	35,7677
Distâncias polares com função exponencial	36,3108
RFM com polinômios de 3° grau	17,2704
RFM com polinômios de 4° grau	8,5669
Coordenadas polares	9,606

As discrepâncias encontradas entre os pontos medidos na imagem e os pontos estimados pelos modelos que utilizam somente o ajustamento das distâncias polares possuem praticamente o mesmo REMQ, com uma variação em torno de 0,5 pixel, porém esses resultados ficaram muito acima dos alcançados com os outros modelos.

O modelo RFM com polinômios de 4° grau e o modelo de coordenadas polares tiveram resultados similares, com diferença aproximada de 1 pixel. Analisando os resultados da calibração e da avaliação dos pontos de verificação, o RFM de 4° grau é a melhor entre as soluções abordadas nesse estudo para a retificação das imagens omnidirecionais, para as imagens usadas.

Outra vantagem da utilização do RFM é não haver a necessidade de se localizar o ponto central da imagem omnidirecional, ou seja, o topo do cone dentro da imagem, o erro na medição dessa coordenada resulta em um ajustamento errado nas distâncias polares.

4.3.5. Reamostragem das imagens

As imagens omnidirecionais foram reamostradas com os modelos de distâncias polares e geraram imagens muito similares, de forma compatível com os resultados do processo de calibração e de avaliação dos pontos de verificação. O mesmo ocorre com os modelos RFM com polinômios de terceiro e quarto graus.

Considerando essas semelhanças, serão apresentadas as imagens referentes ao modelo de distâncias polares com polinômio de 6° grau e o modelo de funções racionais com polinômios de 4° grau. A Figura 4.19 apresenta a imagem do campo de calibração capturada com o sistema omnidirecional catadióptrico construído.



Figura 4.19 - Imagem omnidirecional catadióptrica capturada com o sistema construído.

Como verificado visualmente os resultados das imagens são muito diferentes: ao usar o modelo de funções racionais, pois a imagem resultante compreende apenas a área modelada (vide Figura 4.20); já o modelo de distâncias polares permite realizar a reamostragem em toda a imagem, até mesmo áreas não cobertas por pontos (vide Figura 4.21), embora esta extrapolação possa apresentar resultados espúrios.

Com os resultados da reamostragem com imagem do campo de calibração verificou-se que estas imagens possuem maiores deformações quando se afastam do centro do sistema. Ao considerar uma área de 50 x 50 metros, essas distorções não influenciarão no resultado final, pois a imagem será subamostrada de 5 cm para 250 cm.

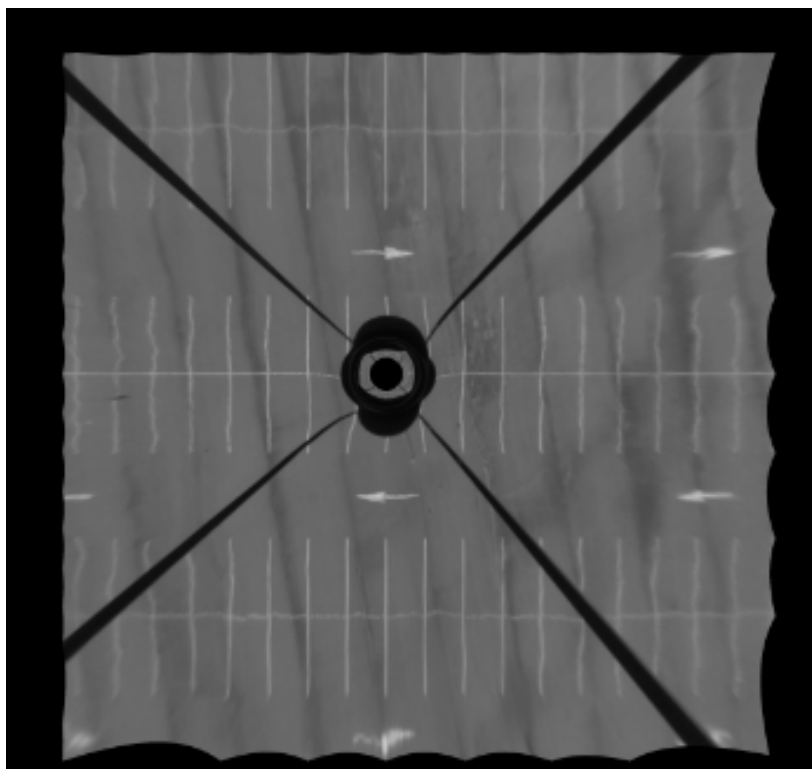


Figura 4.20 - Imagem reamostrada utilizando o modelo RFM de 4° grau.

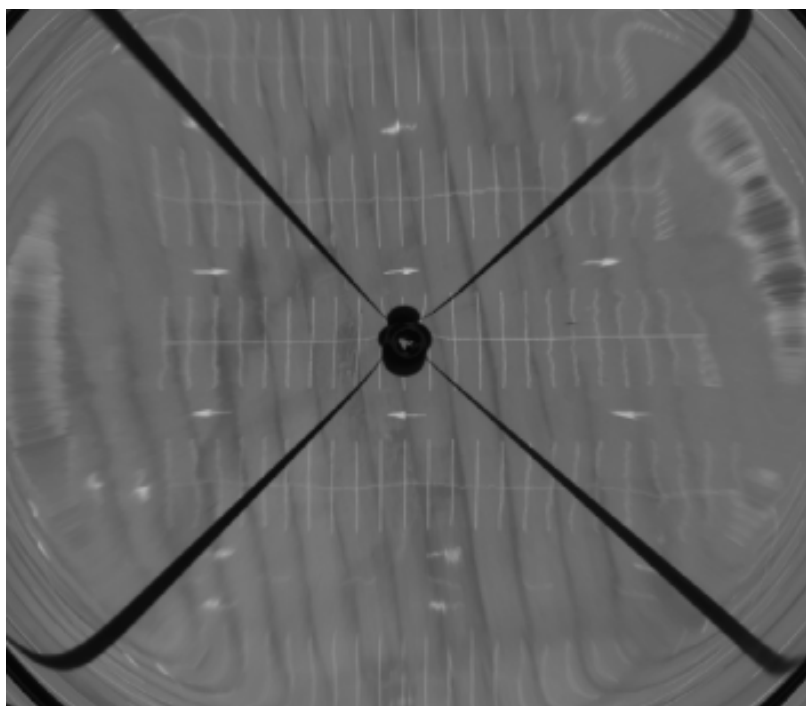


Figura 4.21 - Imagem reamostrada utilizando o modelo de distâncias polares.

Com o modelo matemático definido, o Capítulo 5 apresenta o processo para a utilização das imagens omnidirecionais georreferenciadas como controle de campo na orientação e controle de qualidade de imagens orbitais.

5. METODOLOGIA PARA ORIENTAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DE IMAGENS ORBITAIS UTILIZANDO IMAGENS OMNIDIRECIONAIS GEORREFERENCIADAS COMO CONTROLE DE CAMPO

Nesse capítulo são apresentadas as fases para a utilização das imagens omnidirecionais georreferenciadas na orientação e controle de qualidade de imagens orbitais, e no capítulo 8 será apresentado um experimento prático no qual as imagens omnidirecionais são utilizadas como controle de campo para a correção geométrica de uma imagem ALOS/PRISM.

A Figura 5.1 apresenta um diagrama de blocos com as etapas da metodologia para orientação de imagens orbitais utilizando imagens omnidirecionais georreferenciadas com 7 blocos de atividades distintas. Nas próximas seções as etapas serão detalhadas, definindo informações de entrada e saída, como também os materiais, softwares e métodos utilizados nessas etapas.

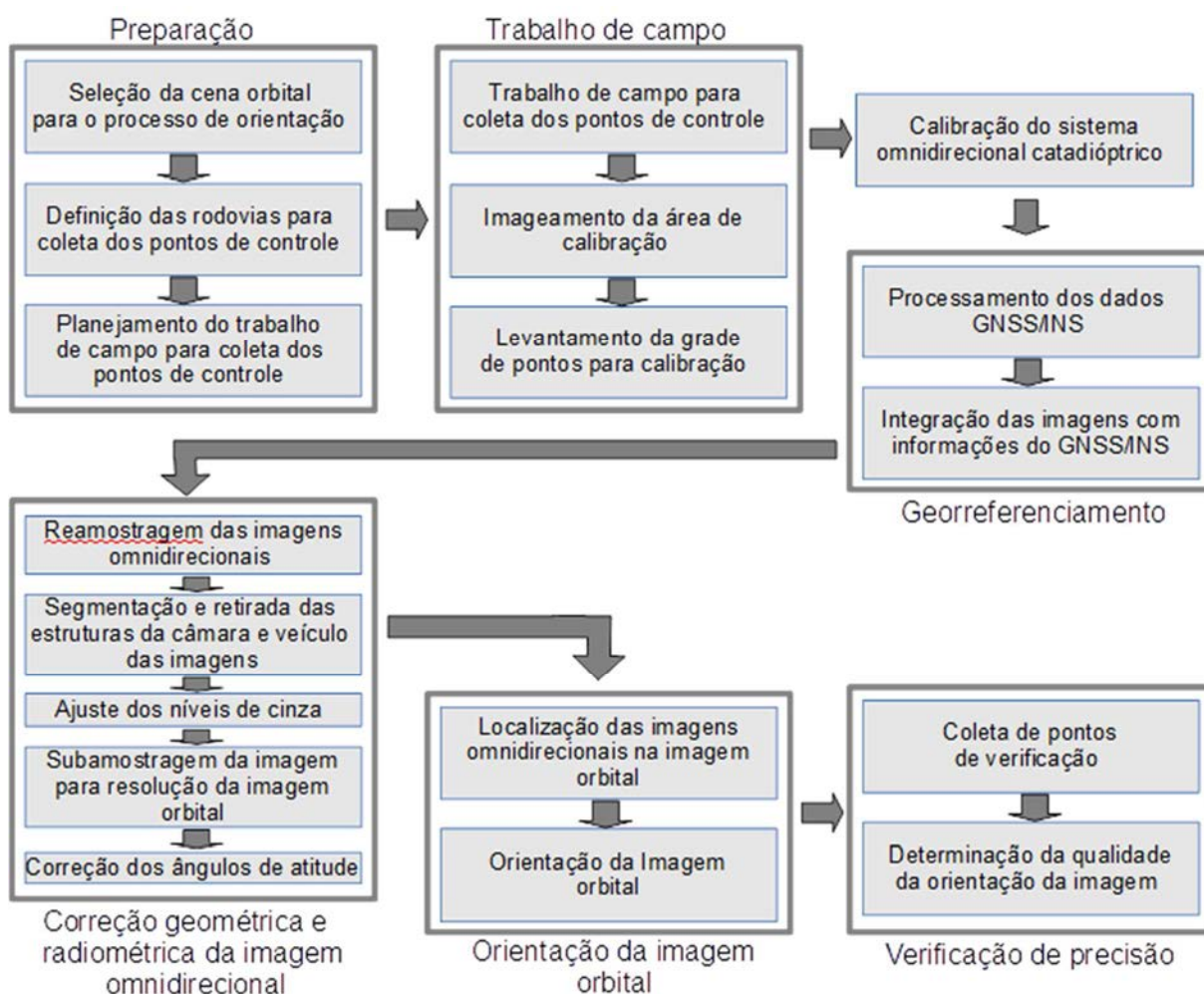


Figura 5.1 - Diagrama de blocos da metodologia para orientação de imagens orbitais utilizando imagens omnidirecionais georreferenciadas como controle de campo.

5.1. PREPARAÇÃO

O bloco referente à preparação para o trabalho de campo visa determinar os aspectos sobre o levantamento de pontos de controle e verificação para a orientação e controle de qualidade na imagem, consistindo das seguintes atividades:

1. Definição da área do trabalho, com a seleção da imagem orbital, que deve estar georreferenciada (e corrigida geometricamente com dados orbitais), para que seja possível determinar a posição aproximada do ponto levantado em campo (com sua respectiva imagem omnidirecional) e definir uma área de busca em torno deste ponto projetado. A mesma técnica pode ser usada para localizar pontos em uma imagem bruta (sem correções) para o refinamento de sua orientação, sendo necessário que esta imagem tenha correção radiométrica e informações de órbita e atitude para permitir a localização aproximada do ponto levantado em campo.
2. Utilizando como referência a imagem orbital selecionada, determinar as rodovias, estradas vicinais e ruas que formarão o percurso onde serão levantados os pontos de controle/verificação. O percurso deve ser bem distribuído dentro da cena escolhida e dividido em vários segmentos visando simplificar o trabalho e evitar possíveis perdas por falhas no sistema.
3. No planejamento do trabalho de campo, deve-se definir: o horário para início da atividade, o período de tempo a ser utilizado nessa coleta de informações e a ordem dos segmentos do percurso. Uma checagem e ajustes dos componentes deve ser realizada visando o correto funcionamento de todo o equipamento e por fim a montagem do equipamento no veículo para a realização do trabalho de campo.

No final dessas atividades o trabalho de campo pode ser realizado, como também as informações definidas devem ser armazenadas para a posterior escrita de relatório sobre todo o processo.

5.2. TRABALHO DE CAMPO

Na metodologia proposta, o trabalho de campo está dividido em três tarefas, duas relacionadas à coleta de informações para a calibração do sistema e uma para a coleta dos pontos de controle/verificação para a correção geométrica ou orientação da imagem orbital.

O levantamento de pontos de controle/verificação na metodologia proposta consiste na realização do percurso definido na etapa de preparação, sendo que o veículo equipado com o sistema de imageamento omnidirecional georreferenciado realiza a aquisição de imagens omnidirecionais com informações de localização e atitude capturadas pelo sistema integrado GNSS/INS. A determinação dos pontos de controle/verificação pode ser realizada de duas formas:

- Temporizada, por meio do software do SAAP, adaptado para a utilização neste projeto, pode-se definir o intervalo entre a coleta das imagens. Desta forma o operador necessita determinar somente os instantes inicial e final do levantamento dos pontos, porém não se tem o domínio do momento da aquisição da imagem, não permitindo ao operador selecionar os pontos identificáveis na imagem orbital, como cruzamentos de rodovias e trevos de acesso.
- Manual, onde o operador é responsável por determinar o momento da aquisição de cada uma das imagens, sendo que o software do SAAP fica responsável pelo armazenamento dos dados GNSS/INS e do tempo exato de tomada de cada imagem (evento). O operador seleciona os locais de cada uma das imagens, necessitando de atenção e visão do percurso que está sendo realizado.

No experimento em campo realizado nesse trabalho, a determinação dos pontos de controle foi realizada de forma manual, onde foram selecionados os pontos onde haviam entradas, saídas e cruzamentos nas rodovias, pois são pontos distinguíveis na imagem de satélite.

O imageamento da área de calibração consiste na tomada de várias imagens de um campo de calibração, considerando a mesmas características da tomada das imagens dos pontos de controle/verificação.

Considerando as tarefas do trabalho em campo, o levantamento da grade de pontos do campo de calibração é a que exige maior esforço na sua execução, pois consiste em determinar as coordenadas de cada um dos pontos da grade no espaço objeto, porém esse trabalho é realizado somente uma vez com equipamentos de precisão, e esses dados podem ser utilizados em vários processos de estimação dos parâmetros do modelo.

5.3. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA CATADIÓPTRICO

O processo de calibração do sistema omnidirecional catadióptrico consiste em relacionar os pontos entre o espaço objeto e o espaço imagem através de um modelo matemático, que pode ser rigoroso ou genérico.

Com o modelo definido, as observações dos pontos de controle no espaço objeto e suas respectivas coordenadas no espaço imagem pode-se estimar os parâmetros do modelo escolhido utilizando o método dos mínimos quadrados para o ajustamento do modelo à grade de pontos.

5.4. GEORREFERENCIAMENTO

A etapa de georreferenciamento das imagens omnidirecionais catadióptricas é formada pelas atividades de processamento dos dados GNSS/INS visando a definição da posição precisa (**E**, **N**, **h**) e atitude (**Roll**, **Pitch**, **Azimuth**) de cada um dos eventos (aquisição de imagens), como também as estimativas de precisão de cada um desses elementos, e a associação das coordenadas e atitude às imagens adquiridas.

5.5. CORREÇÃO GEOMÉTRICA E RADIOMÉTRICA DA IMAGEM OMNIDIRECIONAL

Nessa etapa da metodologia são utilizadas técnicas de processamento de imagem para a execução das seguintes tarefas: reamostragem da imagem omnidirecional através do modelo matemático e parâmetros estimados na calibração, segmentação e retirada das áreas das imagens pertencentes à estrutura da câmara e do veículo, ajuste dos níveis de cinza da imagem, subamostragem da imagem para a resolução da imagem orbital e correção dos ângulos de atitude quando necessário. Essas atividades visam aproximar as características da imagem omnidirecional às características da imagem orbital utilizada.

5.6. ORIENTAÇÃO (CORREÇÃO GEOMÉTRICA) DA IMAGEM ORBITAL

A etapa de orientação da imagem orbital envolve duas atividades distintas: a primeira está relacionada à localização das imagens omnidirecionais reamostradas na imagem orbital (que equivale à localização e medição manual de pontos de controle), e a segunda é o processo de correção geométrica ou orientação da imagem utilizando um modelo matemático rigoroso ou empírico.

5.7. ANÁLISE DE QUALIDADE

O procedimento de análise de qualidade visa avaliar a qualidade do georreferenciamento da imagem, no qual uma análise estatística é realizada nas discrepâncias entre as coordenadas determinadas com medições na imagem georreferenciada e as coordenadas levantadas em campo.

A análise de qualidade necessita inicialmente de um levantamento em campo de vários pontos bem distribuídos na imagem. Com esses pontos coletados pode-se localizar os pontos correspondentes na imagem.

A análise estatística visa determinar a acurácia e precisão da imagem georreferenciada por meio da comparação das discrepâncias entre as coordenadas medidas nas imagens e os valores correspondentes determinados em campo.

6. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

As imagens omnidirecionais possuem características geométricas e radiométricas muito diferentes da imagem orbital e para a realização da correspondência entre essas imagens é necessário um processamento prévio.

A correção geométrica é realizada através da reamostragem e da correção da atitude do sensor, a segmentação e retirada das áreas das imagens pertencentes à estrutura da câmara e do veículo.

6.1. REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

A reamostragem das imagens omnidirecionais utiliza um modelo para o mapeamento entre os pontos no espaço objeto e espaço imagem. Nesse projeto o modelo inicialmente utilizado foi o de funções racionais com polinômios bidimensionais de quarta ordem. Devido à alteração da configuração do sistema omnidirecional entre o trabalho de campo e a aquisição das imagens no campo de calibração, o modelo de coordenadas polares com correção de distâncias apresentou melhores resultados.

Para a definição dos tons de cinza da imagem reamostrada foi utilizado o mapeamento inverso, no qual são utilizadas as equações do mapeamento inverso para determinar as coordenadas no espaço da imagem original, onde estão os tons de cinza.

Nesse processo é realizada uma reamostragem da imagem omnidirecional em uma imagem plana com vista nadiral, sendo necessária a interpolação para a definição dos níveis de cinza. A interpolação bilinear é a melhor opção em relação ao tempo de processamento e manutenção da continuidade geométrica da imagem.

6.2. CORREÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATITUDE DO SENSOR OMNIDIRECIONAL

No processo de aquisição das imagens omnidirecionais georreferenciadas, os eixos do sistema de coordenadas da plataforma (veículo) não estão alinhados com o sistema de coordenadas da imagem orbital, sendo necessário um alinhamento entre esses sistemas, ou seja, a correção da imagem utilizando os ângulos de atitude da plataforma no momento da aquisição da imagem.

Para esse processo são necessários os ângulos de atitude, que estão associados à imagem, e de um modelo matemático para a correção das rotações em relação a cada um dos eixos, tornando o sistema da imagem omnidirecional retificada alinhado com o sistema da imagem orbital, visando permitir o processo de correspondência por área entre essas imagens.

6.3. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE IMAGEM PERTENCENTES A ESTRUTURA DA CÂMARA E AO VEÍCULO

A estrutura metálica confeccionada para montagem do sistema omnidirecional, como também o veículo, aparecem em todas as imagens adquiridas em campo, como apresentado na Figura 6.1. Esses elementos não fazem parte do ambiente e não aparecem na imagem orbital.

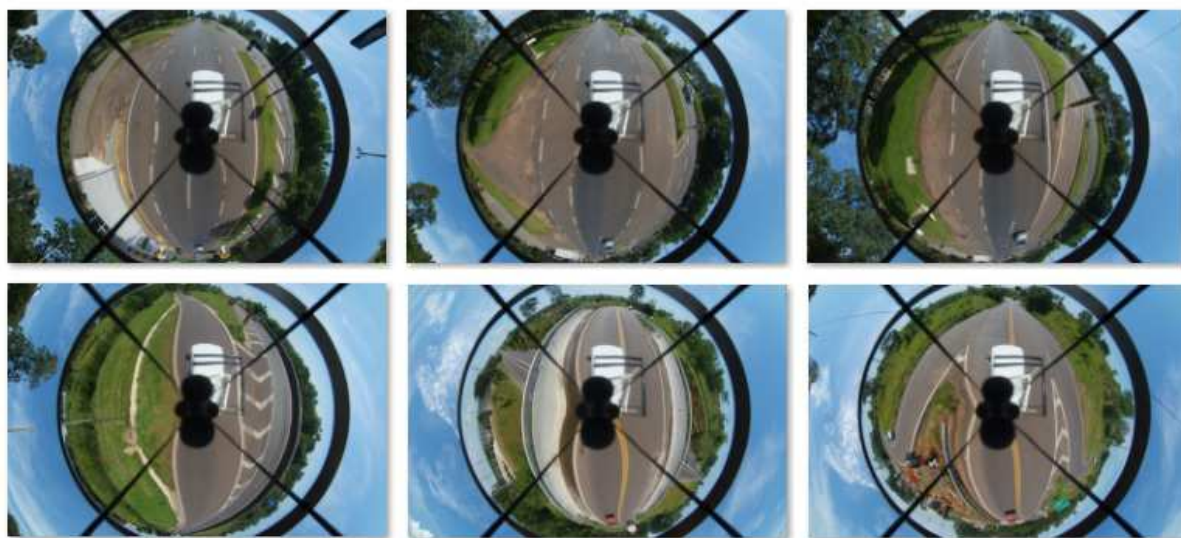


Figura 6.1 - Imagens omnidirecionais adquiridas com o sistema desenvolvido.

No processo de correspondência entre as imagens omnidirecionais retificadas e a imagem orbital, há a necessidade de descartar essas áreas, pois elas influenciam no resultado da correlação entre as janelas de referência e de pesquisa.

Considerando que a estrutura do sistema e o veículo estão sempre na mesma posição (coordenadas da imagem), devido à rigidez na estrutura do sistema, onde os parâmetros que relacionam a câmara e o espelho não são alterados. Os pixels ocupados por essas estruturas possuem pequenas variações no nível de cinza entre as imagens. Uma forma de determinar as áreas pertencentes ao sistema e veículo é realizar uma análise das discrepâncias dos níveis de cinza nos pixels de mesmas coordenadas dentro do conjunto de imagens.

Uma forma de qualificar a variação ou não dos valores dos pixels é a utilização do desvio padrão. Na técnica proposta, a análise do desvio padrão dos níveis de cinza entre todos os pixels que ocupam a mesma posição nas imagens pode ser utilizada para determinar as áreas repetidas. As posições com valores pequenos de desvio padrão pertencem às áreas que se repetem em todas as imagens, podendo haver uma pequena variação devido ao maior ou menor nível de luminosidade.

Inicialmente calculam-se a média e o desvio padrão (6.1) dos níveis de cinza para cada pixel de uma sequência de imagens (ver Figura 6.2).

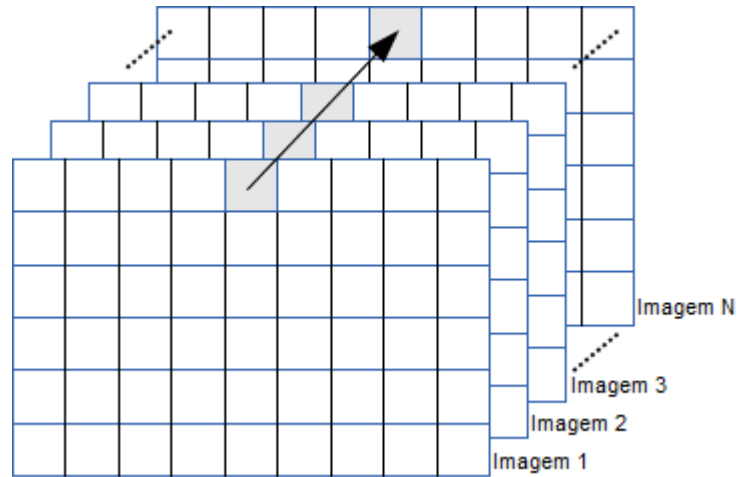


Figura 6.2 - Elementos utilizados no cálculo do desvio padrão e variância relacionada a uma posição de uma sequência de imagens.

Esse processo gera uma matriz, com as mesmas dimensões das imagens, onde em cada posição armazena-se o desvio padrão dos níveis de cinza referente àquela posição do conjunto de imagens, calculado pela Equação (6.1).

$$D_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (g_{ijk} - \bar{g}_{ij})^2} \quad (6.1)$$

onde:

- D_{ij} é o desvio padrão dos níveis de cinza os pixels de mesma posição dentro da sequência de imagens;
- N é o número de imagens utilizadas para o reconhecimento das estruturas;
- g_{ijk} é o nível de cinza do pixel da posição (i, j) em uma determinada imagem k ;
- $\bar{g}_{ij}$ é a média dos níveis de cinza de todos os pixels localizados na posição (i, j) das imagens.

A matriz com os desvios padrão dos níveis de cinza dos pixels na sequência de imagens, é ajustada para que seus valores fiquem compreendidos entre 0 e 255, utilizando a Equação (6.2).

$$Dn_{ij} = \frac{D_{ij} - \min(D)}{\max(D) - \min(D)} \cdot 255 \quad (6.2)$$

onde:

- Dn_{ij} é o valor normalizado para o intervalo de 0 a 255 para a posição i, j ;
- D_{ij} é o valor do desvio padrão na posição i, j ;
- $\min(D)$ é o menor valor contido na matriz D ;
- $\max(D)$ é o maior valor contido na matriz D .

As áreas comuns ao conjunto de imagens são determinadas pela aplicação de um limiar sobre a matriz Dn , onde as posições acima desse limiar pertencem a áreas onde os níveis de cinza variam bastante entre as imagens e as posições abaixo desse limiar são as áreas que se repetem ou tem pouca variação na sequência de imagem.

A Figura 6.3 apresenta uma imagem representando a matriz normalizada resultante desse processamento e a imagem limiarizada onde as áreas com pouca variação aparecem em preto e as áreas com grande variação em branco.

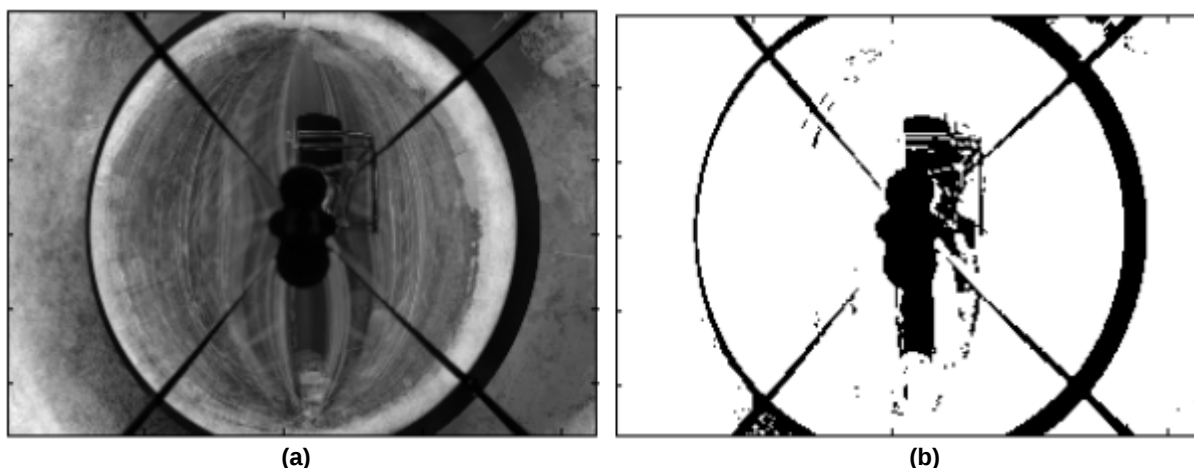


Figura 6.3 - (a) Imagem normalizada dos desvios padrão e (b) imagem após a aplicação do limiar.

Em um processamento posterior das imagens utilizadas na geração da imagem limiarizada, pode-se:

- Utilizar a matriz limiarizada como uma máscara, onde os pontos pertencentes à estrutura são excluídos do processamento, e, em um processo de correspondência, esses pontos não seriam utilizados no cálculo do coeficiente de correlação cruzada normalizada;
- Realizar o preenchimento desses pontos utilizando os pixels com informações úteis de sua vizinhança.

No experimento realizado, o procedimento de determinação das áreas das imagens ocupadas pelas estruturas do sistema e do veículo foi realizado nas imagens coloridas reamostradas com resolução de 50 cm. A Figura 6.4 apresenta em (a) a imagem reamostrada com GSD de 50 cm, (b) a máscara criada e (c) a imagem sem a estrutura e espelhada.

Na matriz limiarizada foi aplicada uma operação morfológica de dilatação visando excluir os pontos dispersos na imagem, como também retirar os pixels brancos das áreas onde estão as estruturas do sistema e do veículo.

A matriz gerada pelo processo foi utilizada para o preenchimento das áreas das imagens ocupadas pelas estruturas do sistema e veículo com valores referentes ao terreno próximo.

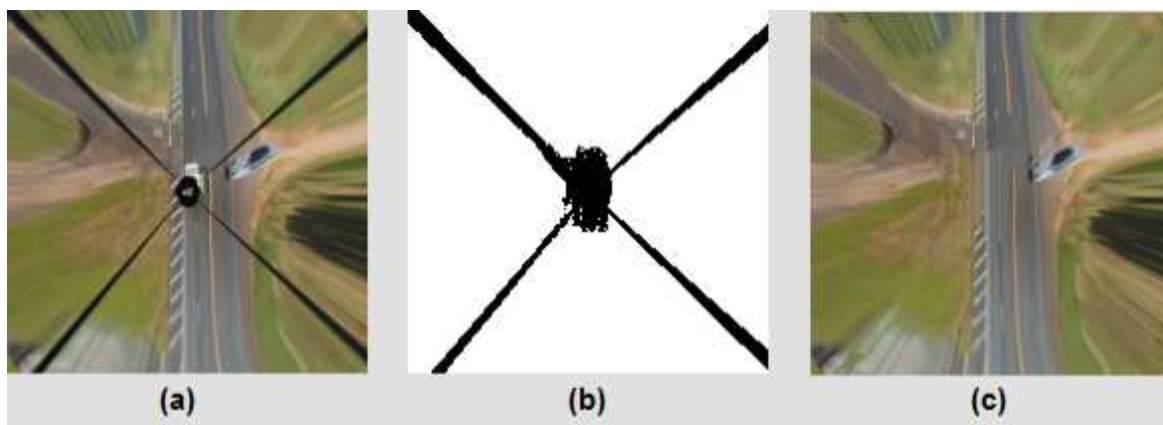


Figura 6.4 - Imagens envolvidas no processo de retirada da estrutura: (a) imagem omnidirecional reamostrada com GSD de 50cm, (b) máscara das áreas repetidas e (c) imagem sem as estruturas do sistema e do veículo.

O procedimento para o preenchimento das áreas repetidas na imagem consiste em varrer elemento a elemento da matriz; quando um valor zero for encontrado (local onde há repetições nas imagens), calcular a média dos 5 pixels anteriores na mesma linha e atribuir o valor resultante ao pixel da imagem com mesmas coordenadas onde o zero foi encontrado. A utilização dos 5 vizinhos anteriores em linha se deve ao sentido de deslocamento do veículo.

6.4. DETERMINAÇÃO DA ÁREA ÚTIL DA IMAGEM REAMOSTRADA

Com uma análise visual da imagem do campo de calibração, reamostrada utilizando o modelo de funções racionais com polinômios de 4° grau, apresentada na Figura 6.5, foi possível verificar que as áreas mais externas sofrem grandes distorções devido à falta de pontos de controle na grade utilizada na estimação dos parâmetros da função de projeção/mapeamento, como também às irregularidades do espelho. No processo de correspondência, essas distorções podem resultar na diminuição do coeficiente de correlação entre as imagens.

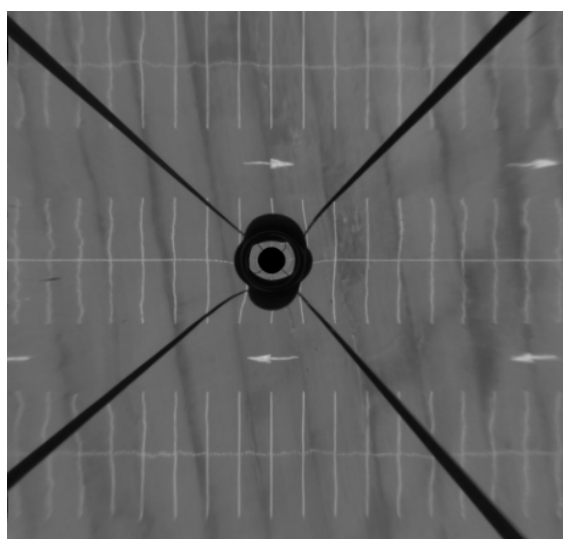


Figura 6.5 - Imagem retificada e suas distorções causadas pelas irregularidades do espelho.

Com uma imagem reamostrada e previamente rotacionada de acordo com os ângulos de atitude, a área útil pode ser determinada de forma visual e indicada manualmente, ou determinada com base na distância linear no solo que permita a identificação dos pontos de controle na imagem orbital. Essa área selecionada será utilizada em todas as imagens. No experimento prático realizado, a área útil foi determinada pela necessidade de um raio de 25 m do ponto de tomada da imagem, ou seja, de uma área de 50 x 50 m no espaço objeto.

6.5. AJUSTE DA RESOLUÇÃO ESPACIAL E RADIOMÉTRICA DA IMAGEM OMNIDIRECIONAL

A imagem de satélite a ser utilizada (ALOS) é pancromática, possuindo elemento de resolução espacial de 2,5 m, com pequeno intervalo dinâmico nos níveis de cinza, conforme apresentado no histograma da Figura 6.6.

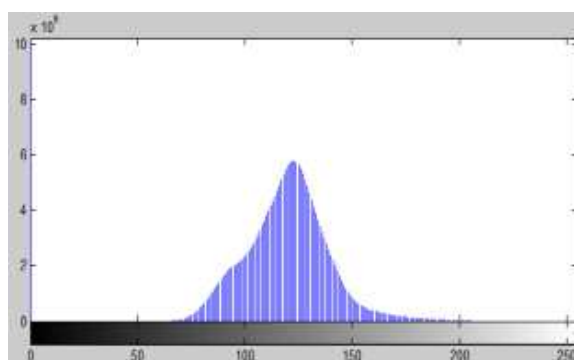


Figura 6.6 - Histograma da imagem orbital.

A imagem omnidirecional capturada com o sistema desenvolvido no projeto é colorida, com elemento de resolução espacial variando entre 2 cm e 15 cm, dependendo da distância em relação ao centro da imagem. Essa imagem foi reamostrada com elemento de resolução espacial fixa de 5 cm.

Visando o processo de correspondência entre uma área da imagem orbital e as imagens omnidirecionais retificadas alguns processos devem ser aplicados visando uma uniformização das imagens.

Em relação à resolução espacial, uma subamostragem da imagem para a resolução da imagem orbital de 2,5 m, apesar da perda de informações, torna as imagens com mesma resolução espacial, sendo possível a correspondência por área.

A resolução radiométrica também é bastante diferente entre essas imagens, sendo que a imagem orbital possui apenas 8 bits para representar os níveis de cinza e a imagem colorida possui um conjunto de 8 bits para representar cada um dos canais das cores básicas, dessa forma utilizando 24 bits para representar cada um dos pixels da imagem.

Outro problema em relação à resolução radiométrica é a distribuição dos níveis de cinza na imagem orbital que está muito concentrada, como apresentado na Figura 6.6, tornando a imagem

com pouco contraste e de difícil identificação de características, como rodovias e estradas sem pavimento. Além disto, para a transmissão dos dados, este satélite realiza uma compressão JPEG o que degrada ainda mais a qualidade da imagem.

A imagem omnidirecional, além de possuir 3 canais, possui também uma melhor distribuição dos níveis em cada um dos canais, com apresentado na Figura 6.7. Essa melhor distribuição dos níveis dos canais resulta em imagens com maior contraste.

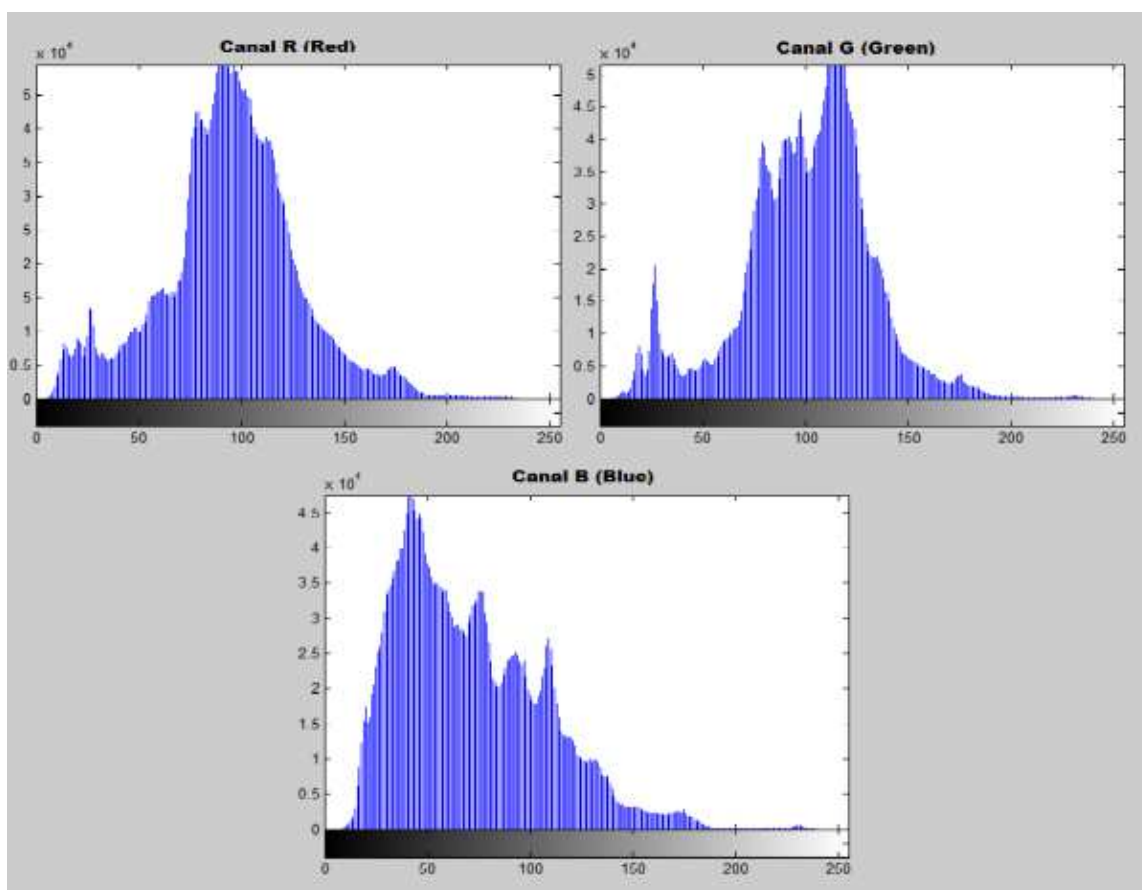


Figura 6.7 - Histograma dos canais de uma imagem omnidirecional.

6.5.1. Ajuste da intensidade da imagem omnidirecional

Com o objetivo de tornar as imagens radiometricamente semelhantes há a necessidade de transformação dos pixels coloridos em níveis de cinza e posterior ajuste na distribuição dos níveis de cinza.

A cor de cada pixel de uma imagem colorida pode ser decomposta em 3 canais R, G e B, como também em Matiz, Saturação e Intensidade de acordo com o modelo HSI (*Hue, Saturation and Intensity*) (GONZALEZ e WOODS, 2007; MARQUES, 2011).

A conversão entre os valores de R, G e B de um pixel de uma imagem colorida e os níveis de cinza de uma imagem pancromática é realizada, da forma mais conhecida, através da Equação (6.3) (GONZALEZ e WOODS, 2007).

$$N_{cinza} = 0,2989 \cdot R + 0,5870 \cdot G + 0,1140 \cdot B \quad (6.3)$$

A utilização da Equação (6.3) sobre a imagem omnidirecional retificada (a) apresentada na Figura 6.8, resulta na imagem em níveis de cinza (b) e com a distribuição dos níveis de cinza (c), sendo bastante diferente na distribuição encontrada na Figura 6.6 da imagem orbital.



Figura 6.8 - Transformação da imagem omnidirecional colorida em níveis de cinza.

A abordagem padrão para a conversão das imagens coloridas em imagens em níveis de cinza não resultou em *templates* com boa correlação por área devido à pequena distribuição dos níveis de cinza nas imagens orbitais e a aspectos das imagens omnidirecionais como a reflexão do sol no asfalto e sombras criadas pela vegetação.

Para a resolução desses problemas, e visando a criação de *templates* com boa correlação, foi utilizada uma abordagem de ajustamento dos níveis de cinza, na qual as variáveis independentes são a Matiz, Saturação e Intensidade, que são geradas a partir dos valores dos componentes R, G e B de cada um dos pixels, conforme as Equações (6.4), (6.5), (6.6) e (6.7) apresentada em Gonzalez e Woods (2007, p. 299-301).

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (6.4)$$

$$h = \cos^{-1} \left\{ \frac{0,5 \cdot [(r-g) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{1/2}} \right\} \quad h \in [0, \pi] \text{ para } b \leq g \quad (6.5)$$

$$h = 2\pi - \cos^{-1} \left\{ \frac{0,5 \cdot [(r-g) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{1/2}} \right\} \quad h \in [\pi, 2\pi] \text{ para } b > g$$

$$s = 1 - 3 \cdot \min(r, g, b) \quad s \in [0, 1] \quad (6.6)$$

$$i = (R+G+B)/(3 \cdot 255) \quad i \in [0, 1] \quad (6.7)$$

Visando a conversão da imagem omnidirecional colorida em uma imagem em tons de cinza, foi definido um modelo em que cada uma das componentes possui um peso associado, ou seja, um percentual de cada uma das componentes é utilizado na formação do nível de cinza desejado, de acordo com a Equação (6.8).

$$N_{cinza} = h \cdot w_1 + s \cdot w_2 + i \cdot w_3 \quad (6.8)$$

Esse peso não é constante, pois cada uma das cores possui uma composição diferente e não linear. Dessa forma, foram utilizadas funções polinomiais de 2° e 3° graus para o peso de cada uma das componentes, sendo que os parâmetros destas funções devem ser determinados em um processo de estimação com base em observações.

Com base nesse conceito, foram definidos 4 modelos matemáticos:

1 – Modelo matemático no qual os pesos das componentes são polinômios de segundo grau baseados na componente intensidade do modelo HSI, conforme a Equação (6.9).

$$N_{cinza} = h(i^2 \cdot a_1 + i \cdot a_2 + a_3) + s(i^2 \cdot b_1 + i \cdot b_2 + b_3) + i(i^2 \cdot c_1 + i \cdot c_2 + c_3) \quad (6.9)$$

2 – Modelo matemático no qual os pesos de cada uma das componentes são polinômios de segundo grau baseados na componente matiz (Equação 6.10).

$$N_{cinza} = h(h^2 \cdot a_1 + h \cdot a_2 + a_3) + s(h^2 \cdot b_1 + h \cdot b_2 + b_3) + i(h^2 \cdot c_1 + h \cdot c_2 + c_3) \quad (6.10)$$

3 – Modelo matemático no qual os pesos são polinômios de segundo grau baseados na componente saturação (Equação 6.11).

$$N_{cinza} = h(s^2 \cdot a_1 + s \cdot a_2 + a_3) + s(s^2 \cdot b_1 + s \cdot b_2 + b_3) + i(s^2 \cdot c_1 + s \cdot c_2 + c_3) \quad (6.11)$$

4 – Modelo matemático no qual os pesos são polinômios de terceiro grau baseados na componente intensidade (Equação 6.12).

$$N_{cinza} = h(i^3 \cdot a_1 + i^2 \cdot a_2 + i \cdot a_3 + a_4) + s(i^3 \cdot b_1 + i^2 \cdot b_2 + i \cdot b_3 + b_4) + i(i^3 \cdot c_1 + i^2 \cdot c_2 + i \cdot c_3 + c_4) \quad (6.12)$$

Nos modelos apresentados, h , s e i são, respectivamente, os valores das componentes matiz, saturação e intensidade para a formação de uma determinada cor, N_{cinza} é o nível de cinza resultante da aplicação das equações e $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3$ e c_4 são os parâmetros dos polinômios estimados com o ajustamento das amostras contendo componentes HSI das cores na imagem omnidirecional e seus respectivos níveis de cinza na imagem orbital.

Para exemplificar a aplicação desta técnica, na estimação dos parâmetros dos modelos foram coletadas 53 observações contendo as 3 componentes do modelo HSI na imagem omnidirecional e seus respectivos níveis de cinza na imagem orbital e realizados ajustamentos utilizando o método dos mínimos quadrados. Para tanto foi desenvolvida uma ferramenta interativa que permite a seleção dos pixels comuns e os demais cálculos, como descrito nesta seção.

Pela análise visual das imagens na Figura 6.9, a que mais se assemelha à imagem de satélite é aquela gerada com a transformação baseada em um polinômio de 3° grau com base na componente intensidade (Opção 4, Equação 6.12).

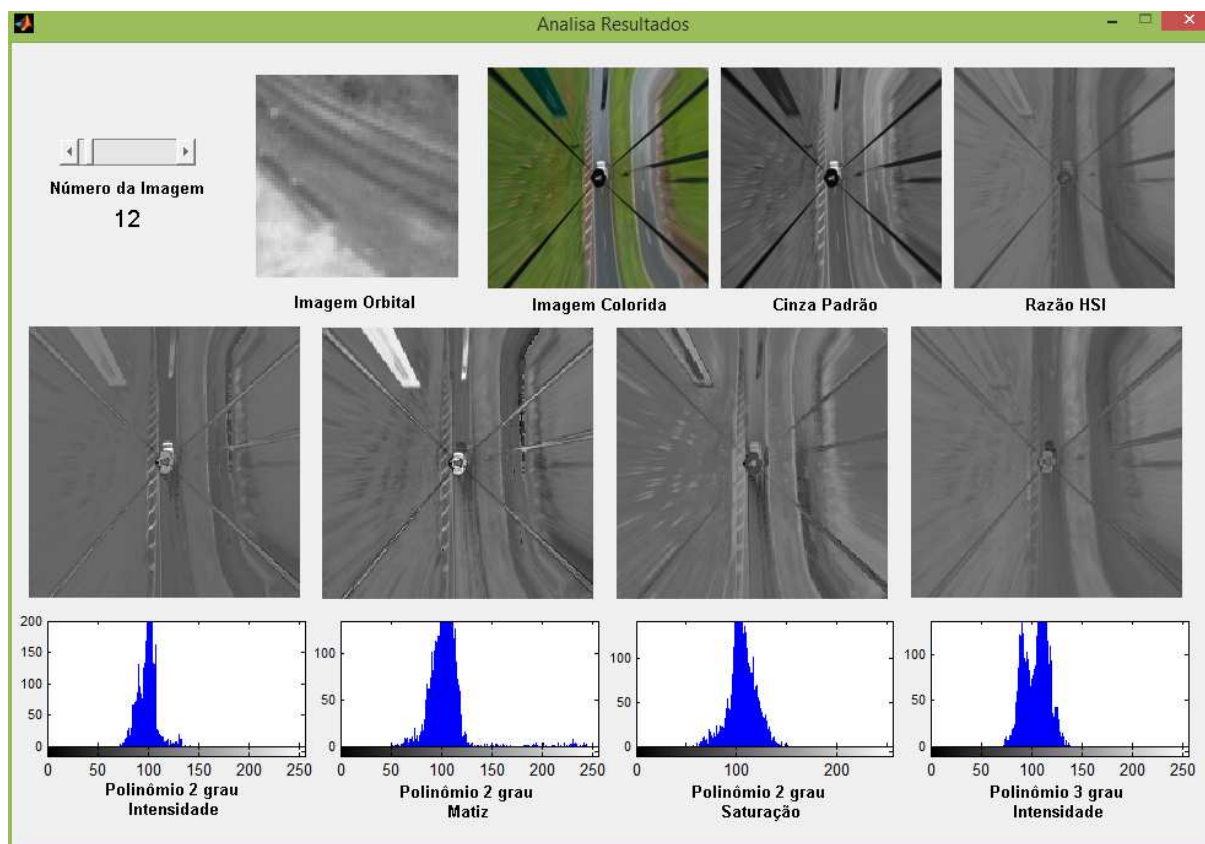


Figura 6.9 – Imagens para a análise dos níveis de cinza com os polinômios apresentados.

Os resíduos resultantes do processo de estimação dos parâmetros dos 4 polinômios utilizados são apresentados na Figura 6.10, na qual é possível notar que os resíduos dos ajustamentos com polinômios baseados na componente intensidade são semelhantes, sendo que o menor entre eles é o modelo com o polinômio de 3° grau. Há uma observação onde resíduo foi muito alto em praticamente todos os ajustamentos. Essa observação possivelmente é um erro durante a coleta das observações.

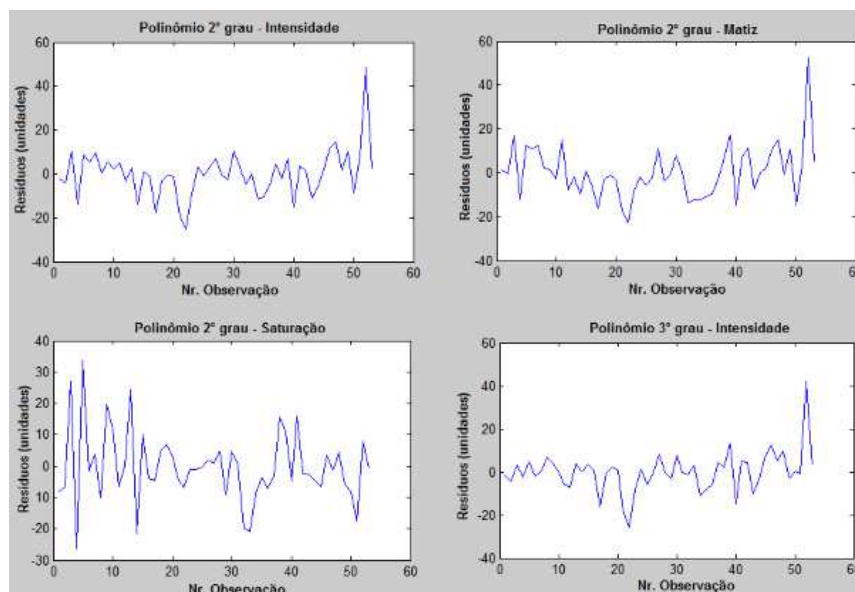


Figura 6.10 - Gráficos dos resíduos dos processos de ajustamento com os polinômios.

Os dados comparativos entre os 4 modelos propostos são apresentados na Tabela 6.1, podendo-se verificar que o modelo que mais se ajusta ao conjunto de observações é o modelo polinomial de 3º grau baseado na componente intensidade.

Tabela 6.1 - Análise dos resíduos do ajustamento com os polinômios, onde os valores são as discrepâncias entre os níveis de cinza estimados com os modelos e os medidos na imagem orbital.

	Polinômio 2º Intensidade	Polinômio 2º Matiz	Polinômio 2º Saturação	Polinômio 3º Intensidade
Média Resíduos Abs.	7,30	8,69	8,38	6,00
REMQ	10,84	12,09	11,63	9,45

Considerando que a observação com alto resíduo no processo de ajustamento tenha sido um erro grosseiro, ela foi retirada do conjunto de observações, resultando nos dados da Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Análise dos resíduos com a retirada da observação com grande resíduo.

	Polinômio 2º Intensidade	Polinômio 2º Matiz	Polinômio 2º Saturação	Polinômio 3º Intensidade
Média Resíduos Abs.	6,58	7,76	8,36	5,39
REMQ	8,55	9,73	11,69	7,45

Com os resultados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, os gráficos da Figura 6.10 e as imagens apresentadas na Figura 6.9, o modelo utilizado para ajustar os níveis de cinza a partir de uma imagem colorida foi o modelo polinomial de 3º grau baseado na componente intensidade do modelo HSI.

Com o objetivo de validar a utilização da técnica de ajustamento dos níveis de cinza com base nas componentes do modelo HSI, foi realizado um experimento com um segmento do trajeto

contendo 167 imagens omnidirecionais georreferenciadas retificadas e sem a estrutura do sistema, em que foram executados os seguintes procedimentos.

1. Subamostragem da imagem – O elemento de resolução espacial da imagem original era de 5 cm, com o tamanho de 1800x1800 pixels, tendo sido subamostrada para o elemento de resolução espacial de 250 cm (2,5 m) (elemento de resolução espacial da imagem de satélite);
2. Orientação das imagens subamostradas – Utilizando os dados de georreferenciamento da imagem omnidirecional, foi realizada a rotação em relação ao ângulo de azimute, colocando a imagem na mesma orientação da imagem orbital. Devido à pequena magnitude e efeito desprezível para esta resolução, os ângulos de arfagem e rolagem não foram corrigidos.
3. Conversão das imagens em níveis de cinza – Para cada imagem omnidirecional subamostrada foram geradas duas imagens em níveis de cinza: na primeira a conversão foi realizada utilizando o procedimento padrão da Equação 6.3 e na segunda foi utilizado o procedimento de ajustamento de níveis de cinza com polinômios de 3º grau baseados na componente intensidade, desenvolvido nesse trabalho.
4. Definição das janelas de busca – Com base no georreferenciamento das imagens omnidirecionais e na estimativa de precisão posicional da imagem orbital, foi realizado um recorte da área de busca dentro da imagem orbital.
5. Realização da correspondência – Com os dois conjuntos de imagens subamostradas em níveis de cinza e o conjunto de imagens com os recortes da imagem orbital, foram realizados procedimentos de correspondência utilizando o coeficiente de correlação.
6. Análise dos resultados – Com os dados da correlação foi realizada a análise numérica e visual dos resultados. Na análise numérica foram definidos 4 limiares (80%, 70%, 60% e 50%) de correlação e os coeficientes calculados de todas as imagens foram classificados. Por meio da análise visual foi verificado se as áreas encontradas são realmente as áreas procuradas, ou seja, foi feita a detecção de falsos positivos.

A Tabela 6.3 apresenta as estatísticas dessa análise, podendo-se verificar numericamente que os resultados são semelhantes e, dessa forma, concluir que a utilização do método de ajustamento dos níveis de cinza não permitiu substancial melhoria em relação ao método tradicional de conversão para níveis de cinza pela Equação 6.3.

Tabela 6.3 - Estatísticas do processo de correspondência comparando o modelo padrão de conversão em níveis de cinza e o modelo de ajuste proposto.

	CCN $\geq$ 80%		CCN $\geq$ 70%		CCN $\geq$ 60%		CCN $\geq$ 50%	
	número corresp.	% do total imagens	número corresp.	% do total imagens	número corresp.	% do total imagens	número corresp.	% do total imagens
Conversão Padrão	3	1,80%	10	5,99%	28	16,77%	65	38,92%
Conversão com Modelo de Ajustamento	2	1,20%	9	5,39%	33	19,76%	69	41,32%
Quantidade de Imagens	167							

Com uma análise da tabela, o coeficiente de correlação de 50% foi alcançado somente em aproximadamente 40% das imagens e menos de 2% das correspondências obtiveram coeficientes de correlação maiores que 80%. Isso ocorre devido à grande diferença entre as imagens e também às características da captura e transferência da imagem orbital (pequeno intervalo dinâmico e compactação JPEG).

A segunda análise realizada sobre os resultados, visa determinar se as correspondências encontradas no processo são corretas ou falsos-positivos. Para isso foi necessário analisar visualmente todos os recortes da imagem orbital e as correspondentes imagens omnidirecionais subamostradas, verificando se o ponto encontrado é realmente o ponto procurado.

Com o resultado da análise sobre as imagens, apresentado na Tabela 6.4, verifica-se que o método de ajustamento dos níveis de cinza apresenta um resultado muito superior ao método tradicional (conversão padrão), para essa aplicação.

Tabela 6.4 - Comparação das correspondências corretas e falsos-positivos da conversão padrão de níveis de cinza e do modelo de ajustamento proposto.

Conversão Padrão	Quantidade	CCN $\geq$ 80%		CCN $\geq$ 70%		CCN $\geq$ 60%		CCN $\geq$ 50%	
		3		10		28		65	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	3	100,00%	8	80,00%	20	71,43%	52	80,00%
	Corretas	0	0,00%	2	20,00%	8	28,57%	13	20,00%
Conversão com Modelo de Ajustamento	Quantidade	2		9		33		69	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	0	0,00%	0	0,00%	7	21,21%	20	28,99%
	Corretas	2	100,00%	9	100,00%	26	78,79%	49	71,01%

A conversão com o método tradicional apresenta baixo percentual de correspondências corretas, ou seja, os níveis de cinza dessa conversão são muito diferentes dos níveis dos recortes das imagens orbitais, gerando falsas correspondências e grande quantidade de falsos-positivos.

No método do ajustamento dos níveis de cinza, o percentual de correspondências em que ocorrem falsos-positivos caiu para aproximadamente 20%, considerando o limiar de 60% de correlação ($CC \geq 0,6$), 30% para o limiar de 50% e, para os limiares de 70% e 80%, todas as

correspondências são corretas. Isso se deve ao ajustamento dos pesos das componentes do modelo HSI, gerando imagens com níveis de cinza semelhantes às imagens orbitais.

O experimento apresentou um resultado satisfatório (coeficiente de correlação maior que 50%) em 69 das correspondências (41,32% das correspondências), onde em 49 das imagens (71,01% das correspondências com coeficiente de correlação superior a 50%) a correspondência foi correta.

No trabalho de campo realizado no experimento prático foram coletadas 646 imagens divididas em 5 segmentos, onde somente 513 foram utilizadas nas análises realizadas, a quantidade de imagens de cada um dos segmentos é apresentada na Tabela 6.5, e maiores detalhes sobre a área do experimento e os segmentos são apresentados no Capítulo 8 – Experimento prático – Imagem ALOS/PRISM.

Nas análises realizadas neste capítulo foram utilizadas as imagens do segmento 1 e os parâmetros do ajustamento realizado nesse segmento de imagens foram aplicados para os demais segmentos, e os resultados são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Correspondência utilizando o ajuste com imagens do segmento 1.

Segmento	Imagens Utilizadas	Coef. Correlação maior 80%		Coef. Correlação maior 70%		Coef. Correlação maior 60%		Coef. Correlação maior 50%	
		número imagens	% das imagens	número imagens	% das imagens	número imagens	% das imagens	número imagens	% das imagens
1	167	2	1,20%	9	5,39%	33	19,76%	69	41,32%
2	27	0	0,00%	1	3,70%	2	7,41%	3	11,11%
3	56	0	0,00%	1	1,79%	9	16,07%	26	46,43%
4	148	1	0,68%	2	1,35%	8	5,41%	33	22,30%
5	115	0	0,00%	0	0,00%	4	3,48%	26	22,61%
Totais	513	3	0,58%	13	2,53%	56	10,92%	157	30,60%

Com os resultados apresentados e a análise visual dos recortes realizada nos vários segmentos foi possível verificar que trechos de diferentes rodovias possuem coberturas asfálticas diferentes, gerando diferentes níveis de cinza nas imagens orbitais.

As coberturas vegetais das bordas das rodovias também são diferentes, como também a composição do solo o que gera diferentes tonalidades de cinza. A ocorrência de chuvas em dias anteriores à coleta, o período do dia, as sombras geradas pelas nuvens, e outros aspectos ambientais causam diferenças nas tonalidades capturadas pelo sensor orbital, como também pelo sistema omnidirecional.

Devido aos efeitos acima mencionados, os parâmetros do ajustamento realizado utilizando com base as imagens do primeiro segmento resultou em níveis de cinza diferentes dos níveis de cinza da rodovia, vegetação e solo dos outros segmentos.

Para minimizar esses efeitos foram determinados novos grupos de parâmetros e realizados novos ajustamentos dos níveis de cinza para os segmentos 2, 3, 4 e 5, cujos resultados são apresentados nas tabelas 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9.

Tabela 6.6 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 2.

		CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Ajustamento do Segmento 1	Quantidade	0		1		2		3	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	0	-	0	0,00%	1	50,00%	2	66,67%
	Corretas	0	-	1	100,00%	1	50,00%	1	33,33%
Ajustamento do Segmento 2	Quantidade	0		3		7		10	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	0	-	1	33,33%	3	42,86%	4	40,00%
	Corretas	0	-	2	66,67%	4	57,14%	6	60,00%

Tabela 6.7 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 3.

		CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Ajustamento do Segmento 1	Quantidade	0		1		9		26	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	0	-	0	0,00%	3	33,33%	14	53,85%
	Corretas	0	-	1	100,00%	6	66,67%	12	46,15%
Ajustamento do Segmento 3	Quantidade	1		6		20		37	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	1	100%	2	33,33%	5	25,00%	13	35,14%
	Corretas	0	0,00%	4	66,67%	15	75,00%	24	64,86%

Tabela 6.8 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 4.

		CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Ajustamento do Segmento 1	Quantidade	1		2		8		30	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	1	100,00%	1	50,00%	4	50,00%	19	63,33%
	Corretas	0	0,00%	1	50,00%	4	50,00%	11	36,67%
Ajustamento do Segmento 4	Quantidade	0		1		11		44	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	0	-	1	100,00%	5	45,45%	21	47,73%
	Corretas	0	-	0	0,00%	6	54,55%	23	52,27%

As tabelas mostram uma melhoria nos coeficientes de correlação para os segmentos, quando o ajustamento dos tons de cinza é realizado com imagens do próprio segmento, principalmente em relação à razão entre os casos de correspondências corretas e os falsos-positivos.

Tabela 6.9 - Comparação entre o ajustamento do nível de cinza com imagens do segmento 1 e com imagens do segmento 5.

Ajustamento do Segmento 1	Quantidade	CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
		0		0		4		26	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	0	-	0	-	3	75,00%	15	57,69%
Ajustamento do Segmento 5	Corretas	0	-	0	-	1	25,00%	11	42,31%
	Quantidade	2		8		23		57	
		quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total	quant. imagens	% do total
	Falsos-positivos	1	50,00%	5	62,50%	16	69,57%	33	57,89%
	Corretas	1	50,00%	3	37,50%	7	30,43%	24	42,11%

A Tabela 6.10 (resumo das tabelas 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9) mostra uma grande melhoria na quantidade de correspondências em cada um dos limiares, quando utilizado um ajustamento com as imagens do próprio segmento.

Tabela 6.10 - Comparação das quantidades de correspondências para cada um dos limiares, utilizando ajustamento dos níveis de cinza com imagens do segmento 1 e do próprio segmento.

Segmento	Imagens Utilizadas	Coef. Correlação maior 80%		Coef. Correlação maior 70%		Coef. Correlação maior 60%		Coef. Correlação maior 50%	
		Seg 1	Próprio	Seg 1	Próprio	Seg 1	Próprio	Seg 1	Próprio
2	27	0	0	1	3	2	7	3	10
3	56	0	1	1	6	9	20	26	37
4	148	1	0	2	1	8	11	33	44
5	115	0	2	0	8	4	23	26	57
Totais	346	1	3	4	18	23	61	88	148

Na Tabela 6.11 mostra-se que há um grande aumento na razão entre as correspondências corretas e os casos de falsos-positivos, ao utilizar o ajustamento de níveis de cinza utilizando imagens do próprio segmento, pois são geradas imagens com distribuição de níveis de cinza mais próxima às imagens orbitais do segmento.

Tabela 6.11 - Comparação das correspondências corretas e falsos-positivos utilizando ajustamento dos níveis de cinza com imagens do segmento 1 e do próprio segmento.

Segmento	Imagens Utilizadas	Imagens do Ajustamento	Coef. Correlação maior 60%			Coef. Correlação maior 50%		
			Total	Corretas	Falsas	Total	Corretas	Falsas
2	27	Segmento 1	2	1	1	3	1	2
		Segmento 2	7	4	3	10	6	4
3	56	Segmento 1	9	6	3	26	12	14
		Segmento 3	20	15	5	37	24	13
4	148	Segmento 1	8	4	4	30	11	19
		Segmento 4	11	6	5	44	23	21
5	115	Segmento 1	4	1	3	26	11	15
		Segmento 5	23	8	20	57	24	33

Outro resultado importante da correspondência encontrada em algumas das imagens, é que foram encontrados vários pontos com alto coeficiente de correlação, pois essas imagens não possuem áreas na rodovia que permitam determinar com precisão a localização desse ponto dentro da rodovia, devido à similaridade dos elementos ao longo da linha da rodovia.

A Figura 6.11 apresenta o recorte da imagem orbital (janela de busca), o *template* (janela de referência) criado a partir da imagem omnidirecional e o resultado do processo de correspondência, onde as áreas mais claras são locais da imagem onde houve maior coeficiente de correlação.



Figura 6.11 - Janela de busca, referência e resultado do processo de correlação cruzada em locais onde não há características que identifiquem o ponto correto de correspondência dentro da janela de busca.

Essas imagens não serão utilizadas na orientação de imagens orbitais utilizando pontos de controle, porém podem ser utilizadas em abordagens que utilizam feições retas no processo de orientação (MEDEIROS e TOMMASELLI, 2006), ou a união de pontos de controle e feições retas como proposto por Marcato Jr. (2011), pois os pontos pertencem às rodovias que são feições retas nas imagens orbitais.

7. METODOLOGIA PARA A CORRESPONDÊNCIA ENTRE AS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS E A IMAGEM ORBITAL

O processo de localização das imagens omnidirecionais reamostradas na imagem orbital envolve inicialmente a aplicação de vários métodos de processamento de imagens visando aproximar as características geométricas e radiométricas dessas imagens.

7.1. PROCESSO DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

Nessa seção é apresentada uma visão geral do processo de localização dos pontos de controle e nas próximas seções é realizado um detalhamento dos procedimentos. O processo de localização dos pontos de controle na imagem orbital utiliza como informações de entrada:

- Conjunto de imagens omnidirecionais retificadas;
- Informações de orientação exterior das imagens omnidirecionais;
- Imagem orbital georreferenciada ou imagem orbital com os dados para a correção geométrica da imagem.

O processo consiste nas seguintes etapas:

1. Definição da área útil das imagens omnidirecionais reamostradas - esse processo é realizado em uma imagem e utilizado para todas as outras imagens do conjunto;
2. Subamostragem do conjunto de imagens omnidirecionais para um GSD intermediário entre a imagem omnidirecional retificada e a imagem orbital, visando minimizar o processamento da etapa 3 de segmentação da imagem. Nos experimentos realizados foi usado o valor de 50 cm;
3. Segmentação e remoção da estrutura do sistema e do veículo das imagens subamostradas;
4. Ajuste dos níveis de cinza com base nos canais HSI para todas as imagens do conjunto;
5. Subamostragem do conjunto de imagens omnidirecionais para o GSD da imagem orbital para o processo de correspondência com a imagem orbital. Para a imagem ALOS/PRISM dos experimentos realizados, o GSD foi de 2,5 m;
6. Associação dos dados de georreferenciamento direto, obtidos durante o levantamento, às imagens omnidirecionais reamostradas com GSD de 2,5 m;

7. Realização dos ajustes nas imagens omnidirecionais, com base nos dados de atitude da orientação direta das imagens. No experimento realizado em campo foi realizada somente uma a rotação 2D do ângulo de azimute orientando a imagem para o norte, pois os valores dos outros ângulos de atitude foram de pequena magnitude;
8. Para a primeira imagem omnidirecional, determinar a janela de busca na imagem orbital utilizando as informações de precisão geométrica da imagem e o procedimento da seção 7.2;
9. Realizar o recorte da janela definida na imagem orbital, armazenando a extremidade superior esquerda da janela para posterior cálculo da posição encontrada pelo processo de correspondência;
10. Executar o processo de correspondência entre a imagem omnidirecional e o recorte da imagem orbital, apresentado no item 7.3.
11. Adicionar a posição em linha e coluna, encontrado pelo processo de correspondência, às coordenadas da extremidade superior esquerda da janela de busca.
12. Armazenar as coordenadas planimétricas do ponto de controle no espaço objeto juntamente às fotocoordenadas encontradas pelo processo de correspondência.
13. Para as demais imagens do conjunto, calcular a janela de busca pelo procedimento apresentado no item 7.2 e repetir os passos de 9 a 12.

7.2. DETERMINAÇÃO DA JANELA DE BUSCA

Os processos de localização de um padrão dentro de uma imagem envolvem uma grande quantidade de cálculos e esses são realizados para cada um dos pixels da imagem. Visando minimizar esse processo de busca, para reduzir o custo computacional e a possibilidade de falsas correspondências, deve-se definir áreas nas quais o possível padrão se encontra. Essas áreas são conhecidas como janelas de busca. Para cada aplicação da correspondência há diferentes critérios para a definição dessas janelas.

No processo de localização das imagens omnidirecionais (pontos de controle) na imagem orbital, a janela é definida com a estimação da linha e coluna da imagem referente à posição do ponto de controle. Nas imagens orbitais georreferenciadas (no caso estudado, a ALOS/PRISM 1B2G) o cálculo da estimativa utiliza como entrada as coordenadas do espaço objeto referentes às extremidades da imagem e o GSD do pixel dessa imagem.

Nas imagens orbitais brutas, o cálculo da posição estimada é realizado utilizando o modelo de colinearidade com os parâmetros de orientação exterior referentes a essa imagem, as efemérides do satélite no momento de captura da imagem e seu GSD, sendo portanto um processo de maior complexidade.

A determinação da janela de busca para a primeira imagem omnidirecional possui um critério diferente das outras imagens do conjunto. Para essa imagem, a determinação da janela de busca utiliza como base as seguintes informações:

- Coordenadas da imagem estimadas da posição do ponto de controle;
- Informações sobre a exatidão absoluta das imagens georreferenciadas ou a informação da precisão das coordenadas estimadas através dos cálculos com os dados de correção geométrica. Para as cenas do sensor ALOS-PRISM, estas informações podem ser encontradas em JAXA (2011) e nos trabalhos de Barros et al. (2008) e Coelho et al. (2009), que realizaram análises planimétricas em cenas desse sensor.

A coordenada estimada é definida como o pixel central da janela, e o valor de $2 \cdot \text{REMQ}$, para as imagens georreferenciadas, ou de duas vezes o desvio padrão, para as estimativas das posições em linha e coluna, como o deslocamento médio em linha e coluna desse pixel dentro da imagem.

A utilização de duas vezes o REMQ ou desvio padrão indica que há 95% de possibilidade do pixel central da janela de referência estar dentro dessa janela de busca de acordo com a distribuição normal.

As coordenadas do pixel central da janela são estimadas com os parâmetros da imagem orbital georreferenciada e os dados do georreferenciamento da imagem omnidirecional reamostrada.

As extremidades da janela de busca P_{se} (coordenadas da extremidade superior esquerda) e P_{id} (coordenadas da extremidade inferior direita) da Equação (7.1) são determinadas com base nas coordenadas do pixel central, deslocamentos médios em linhas e colunas e o tamanho da janela de referência (imagem omnidirecional retificada e subamostrada), onde l_{min} , l_{max} , c_{min} e c_{max} são calculados com as Equações (7.2) e (7.3).

$$P_{se} = (l_{min}, c_{min}), \quad P_{id} = (l_{max}, c_{max}), \quad (7.1)$$

$$l_{min} = l_e - \left(2S_l + \frac{H_r}{2}\right), \quad l_{max} = l_e + \left(2S_l + \frac{H_r}{2}\right) \quad (7.2)$$

$$c_{min} = c_e - \left(2S_c + \frac{L_r}{2}\right), \quad c_{max} = c_e + \left(2S_c + \frac{L_r}{2}\right) \quad (7.3)$$

Onde:

- l_e e c_e são as coordenadas do ponto levantado em campo no sistema de coordenadas da imagem, que são calculadas pelas Equações em (7.4), na correção geométrica de imagens georreferenciadas e geocodificadas (refinamento no georreferenciamento), e através da utilização do modelo rigoroso da seção 2.1.2.2, na orientação de imagens sem correções;

- S_l e S_c são, respectivamente, os desvios padrão, ou REMQ, das coordenadas l_e e c_e ;
- H_r é a altura da janela de referência;
- L_r é a largura da janela de referência.

A janela de busca para as demais imagens omnidirecionais subamostradas pode ter a área reduzida, pois é possível ter uma estimativa mais precisa dentro da cena, utilizando:

- Coordenadas no espaço imagem (l, c) e as coordenadas planimétricas no espaço objeto (E, N) de uma imagem previamente localizada pelo processo de correspondência;
- Coordenadas no espaço objeto (E, N) da imagem omnidirecional subamostrada a ser localizada;
- Informações sobre a acurácia relativa da imagem orbital, onde a acurácia relativa é o desvio padrão dos erros geométricos dentro de uma cena. A acurácia relativa para o sensor ALOS/PRISM é aproximadamente 1/3 da acurácia absoluta, conforme JAXA (2011).

A definição das extremidades da P_{se} e P_{ld} janela é dada pelas Equações (7.5) e (7.6).

$$d_c = \frac{(E - E_a)}{GSD}, \quad d_l = \frac{(N - N_a)}{GSD} \quad (7.4)$$

$$l_{min} = (l_a - d_l) - \left(\frac{2 \cdot S_{rN}}{GSD} + \frac{H_r}{2} \right), \quad l_{max} = (l_a - d_l) + \left(\frac{2 \cdot S_{rN}}{GSD} + \frac{H_r}{2} \right) \quad (7.5)$$

$$c_{min} = (c_a + d_c) - \left(\frac{2 \cdot S_{rE}}{GSD} + \frac{L_r}{2} \right), \quad c_{max} = (c_a + d_c) + \left(\frac{2 \cdot S_{rE}}{GSD} + \frac{L_r}{2} \right) \quad (7.6)$$

Onde:

- l_a e c_a são as coordenadas no espaço imagem da imagem localizada anteriormente;
- S_{rE} e S_{rN} são, respectivamente, os desvios padrão, ou REMQ, das coordenadas E e N no espaço objeto que indicam a acurácia relativa dentro de uma cena;
- d_l e d_c são os deslocamentos em linha e coluna, calculados utilizando as Equações em (7.4), referente ao deslocamento em N e E , respectivamente.

A estimação das coordenadas do centro da janela com base nas coordenadas de um o ponto de controle anteriormente localizado diminui a janela de busca devido à utilização de um valor menor para o desvio padrão, o desvio padrão dentro de uma cena.

Nos pontos de controle, onde o coeficiente de correlação é baixo, é possível fazer um ajustamento de todos os pontos considerando as distâncias em linhas e colunas e utilizando nos

pontos de controle com alta correlação um peso maior no ajustamento e a utilização das distâncias como injunções. Esse estudo pode ser realizado como trabalho futuro.

7.3. MÉTODO DE CORRESPONDÊNCIA

O método utilizado para a correspondência das imagens é baseado em área e a função de correlação é a correlação cruzada normalizada, um algoritmo insensível às variações de tons de cinza, pois utiliza a subtração da média da intensidade das janelas e dessa forma não é tão influenciado pela variação na luminosidade do ambiente.

A normalização gera um resultado entre -1 e 1 ; onde ocorre maior correlação o valor é mais próximo a 1 ; onde o valor é próximo a 0 não há correlação e se o resultado for -1 ocorre a correlação inversa.

7.4. ELIMINAÇÃO DAS CORRESPONDÊNCIAS COM FALSOS POSITIVOS

Dentro do conjunto de imagens, há uma grande quantidade de correspondências que possuem um coeficiente alto de correlação, porém as áreas localizadas não se referem à área correta (*template*), denominadas correspondências falso-positivas.

A utilização dos falsos-positivos no ajustamento dos parâmetros do modelo de correção das imagens orbitais resultará em erros grosseiros nas correções da imagem resultante, sendo necessário detectá-las e eliminá-las.

Visando eliminar as correspondências onde ocorreram falsos-positivos foi utilizado um método em que são eliminadas as correspondências com grandes diferenças em relação a grande maioria, ou seja, as magnitudes dos resíduos são analisadas, e as correspondências com grandes discrepâncias em relação ao conjunto de pontos de controle são retiradas.

Para a eliminação das correspondências, o processo parte de um conjunto de n pontos com as seguintes informações: coordenadas na imagem (c, l) calculadas a partir das coordenadas terrestres de pontos de controle, utilizando os dados da imagem georreferenciada (ou o modelo de colinearidade para imagens orbitais com dados de órbita) e coordenadas na imagem (c', l') localizadas pelo processo de correspondência.

O processo de eliminação dos falsos-positivos consiste na realização de um ajustamento com um modelo simples, como uma transformação plana, que relacione os pontos calculados e os pontos localizados. Na análise dos resíduos desse ajustamento, os falsos-positivos apresentarão grandes resíduos, pois esses pontos não são modelados corretamente pelo modelo utilizado no ajustamento.

O modelo utilizado nesse processo é a transformação afim, pois é uma transformação simples, que mantém invariante o paralelismo entre as respectivas linhas da figura, mas altera sua

forma. Esse modelo possui 6 parâmetros, sendo dois fatores de escala, um fator de não ortogonalidade entre os eixos, uma rotação e duas translações. As equações da transformação afim são apresentadas em (7.7) e (7.8).

$$c' = p_1 \cdot c + p_2 \cdot l + \Delta c \quad (7.7)$$

$$l' = p_3 \cdot c + p_4 \cdot l + \Delta l \quad (7.8)$$

Onde os termos das equações são:

- $p_1, p_2, p_3, p_4, \Delta c, \Delta l$ - os parâmetros da transformação afim geral no plano a serem estimados pelo método dos mínimos quadrados;

- c', l' - as coordenadas da imagem referentes aos pontos de controle, localizadas pelo processo de correspondência;

- l, c : as coordenadas na imagem dos pontos de controle, calculadas a partir das coordenadas de terreno dos pontos de controle (E, N, h) utilizando as informações de georeferenciamento (ou o modelo de colinearidade, caso se esteja usando o modelo rigoroso);

O processo de eliminação das correspondências falso-positivas consiste na seguinte sequência:

1. Com o conjunto formado pelas coordenadas calculadas e localizadas dos pontos de controle, fazer o primeiro ajustamento utilizando a transformação representada pelas Equações (7.7) e (7.8);
2. Calcular os resíduos resultantes para cada um dos pontos de controle e a raiz do erro médio quadrático para os pontos de controle.
3. Se o valor da raiz do erro médio quadrático para os pontos de controle for menor que um limiar determinado, não há mais pontos de controle com falsos-positivos discrepantes. Enquanto o valor for maior que o limiar repetir as etapas 4, 5 e 6 até atingir o limiar.
4. Localizar o ponto de controle com maior resíduo e retirar esse ponto do conjunto pontos de controle, supondo que esse ponto é um falso-positivo;
5. Refazer o ajustamento utilizando o novo conjunto de dados de entrada;
6. Calcular os resíduos para o novo conjunto de dados e a raiz do erro médio quadrático para os pontos de controle.

No final do processo haverá um conjunto de pontos, do qual foram eliminados os falsos-positivos com grandes discrepâncias em relação ao conjunto de pontos, e contendo somente os pontos de controle com correlação correta ou com erros de pequena magnitude.

Visando eliminar também pequenos erros foi realizado o mesmo processo, porém utilizando um modelo mais complexo, a transformação projetiva, representada pelas equações (7.9) e (7.10). No ajustamento foi utilizada a função *cp2tform* do *Image Processing Toolbox* do MATLAB, que permite estimar os parâmetros de uma transformação espacial a partir de um conjunto de pontos entre os dois espaços. Com esses parâmetros foram calculados os resíduos resultantes para todos os pontos de controle utilizados no ajustamento.

$$c' = \frac{a_1 \cdot c + a_2 \cdot l + a_3}{a_7 \cdot c + a_8 \cdot l + 1} \quad (7.9)$$

$$l' = \frac{a_4 \cdot c + a_5 \cdot l + a_6}{a_7 \cdot c + a_8 \cdot l + 1} \quad (7.10)$$

Cujos termos:

$a_1, \dots, a_8$ - representam os parâmetros da transformação projetiva a serem estimados com o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados.;

c', l' - representam as coordenadas da imagem dos pontos de controle localizadas pelo processo de correspondência;

c, l - representam as coordenadas calculadas com base na orientação da imagem orbital.

8. EXPERIMENTO PRÁTICO – IMAGEM ALOS/PRISM

A validação da abordagem proposta nesse trabalho foi realizada com um experimento prático em campo com o sistema catadióptrico embarcado em veículo automotor. Esse experimento foi realizado na região de Presidente Prudente, no oeste do estado de São Paulo.

Nesse experimento foi utilizada uma imagem do sensor ALOS/PRISM com o nível de processamento 1B2G, que é corrigida geometricamente com dados de órbita e reamostrada e, portanto, possui dados de georreferenciamento. Foram adquiridas 646 imagens omnidirecionais das rodovias da região e 577 dessas imagens tiveram um resultado satisfatório no processamento dos dados GNSS/INS.

8.1. ÁREA DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no Oeste Paulista, compreendendo a região dos municípios de Presidente Prudente, Regente Feijó, Indiana, Pirapozinho, Anhumas, Álvares Machado, Alfredo Marcondes, Presidente Bernardes e Tarabai, como apresentado na Figura 8.1.

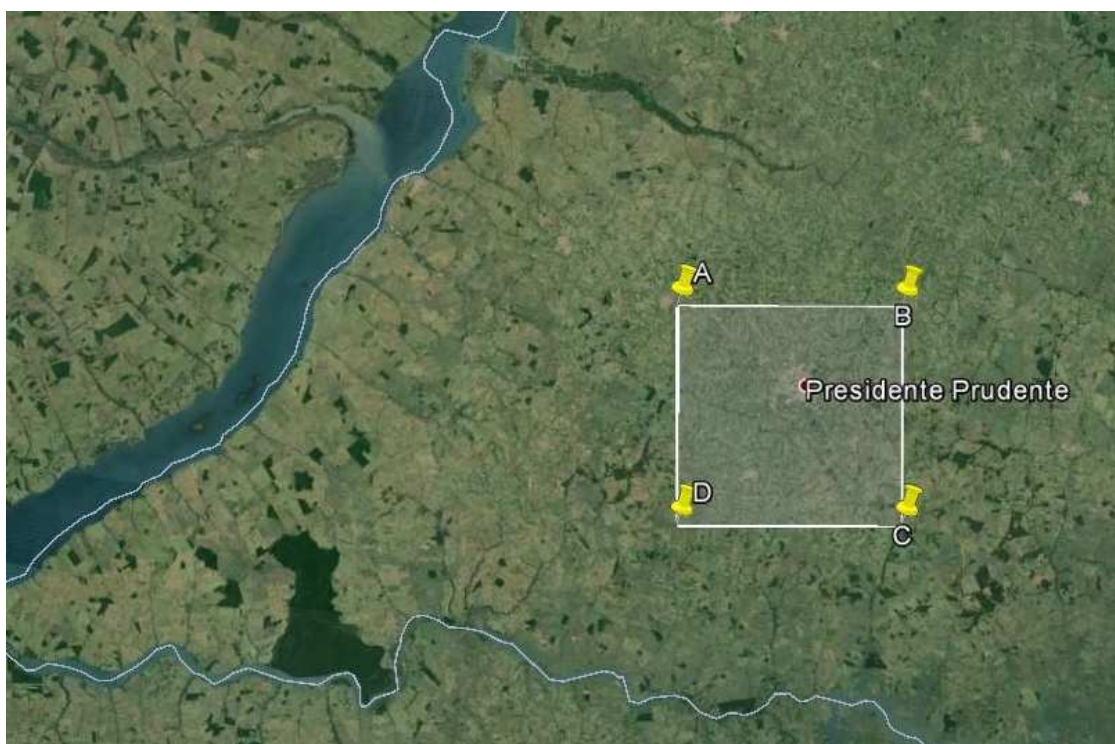


Figura 8.1 - Área de realização do experimento.

Essa área foi escolhida devido à boa distribuição de rodovias, a facilidade no levantamento dos dados em campo, por se tratar da área onde está localizado o campus da Universidade Estadual Paulista e pela disponibilidade da imagem orbital do sensor ALOS/PRISM. A distribuição das rodovias é apresentada na Figura 8.2.

A distribuição das rodovias é de grande importância para se conseguir uma melhor distribuição dos pontos de controle dentro da imagem.



Figura 8.2 - Área imageada com a distribuição das rodovias.

A área do experimento está situada entre as coordenadas apresentadas no Quadro 8.1, sendo que as coordenadas UTM se referem à zona UTM 22s.

Quadro 8.1 - Coordenadas das extremidades da área do experimento.

Extremidades	Latitude	Longitude	E (m)	N (m)
Superior Esquerda	-21,9828°	-51,6324°	434.711,71	7.568.939,75
Superior Direita	-21,9839°	-51,2129°	478.026,71	7.568.939,75
Inferior Direita	-22,3637°	-51,2134°	478.026,71	7.526.904,75
Inferior Esquerda	-22,3626°	-51,6341°	434.711,71	7.526.904,75

8.2. IMAGEM ORBITAL

A imagem orbital utilizada foi uma cena da visada nadir do sensor ALOS/PRISM com a identificação ALPSMN150464045-O1B2G_UN, que abrange a região de Presidente Prudente/SP nas coordenadas apresentadas no Quadro 8.2.

Essa imagem é um produto ALOS/PRISM com nível de processamento 1B2G, com correção geométrica e radiométrica que utiliza dados de efemérides, gerando uma imagem com georreferenciamento e geocodificação (Figura 8.3).

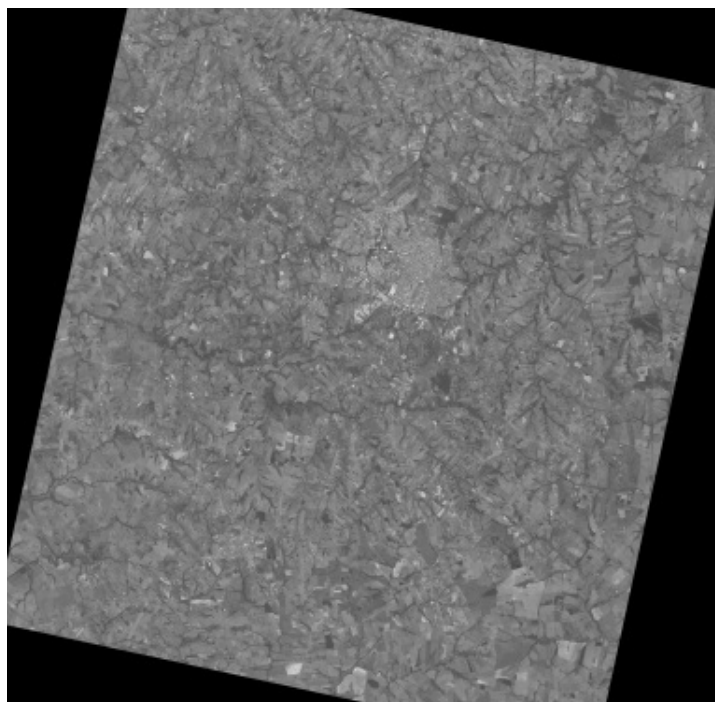


Figura 8.3 - Produto ALOS/PRISM 1B2G - visada nadiral.

O Quadro 8.2 apresenta as informações referentes a imagem ALOS/PRISM utilizada no experimento.

Quadro 8.2 - Características da imagem ALOS/PRISM utilizada no experimento.

Características da Imagem ALOS-PRISM	
Nome da Imagem	ALPSMN150464045-O1B2G_UN
Nível de Processamento	1B2G
Sensor	PRISM
Visada	Nadir (35 km)
Orbita	15046
Frame	4045
Data/Hora	10/06/2010 – 15:21:14
Largura da imagem	17326 pixels
Altura da imagem	16814 pixels
Resolução radiométrica	8 bits
Resolução do pixel	2,5 m
Coordenadas das extremidades da imagem	
Superior esquerdo	X=434712,956 e Y=7568938,504
Inferior direito	X=478025,456 e Y=7526906,004
Informações sobre a Projeção utilizada	
Projeção	UTM - <i>Universal Transverse Mercator</i>
Zona	22
Elipsoide de referência	WGS 84 (<i>World Geodetic System' 1984</i>)
Datum	WGS 84

8.3. PERCURSO PARA LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE

O percurso para o levantamento dos pontos de controle foi definido visando cobrir a maior área possível da imagem utilizada no experimento. Nesse experimento optou-se por utilizar as rodovias pavimentadas, mas o sistema desenvolvido pode ser usado em qualquer tipo de via. A Figura 8.4 apresenta o percurso realizado durante o experimento.

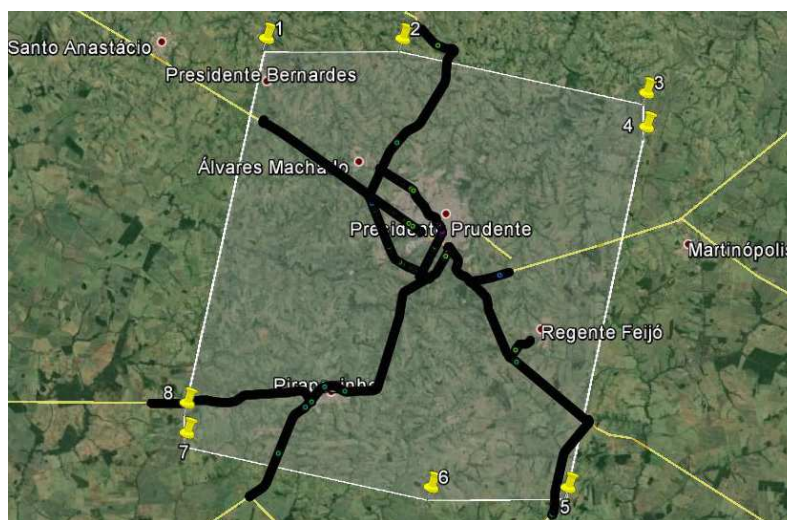


Figura 8.4 - Percurso realizado no experimento.

O percurso foi dividido em 5 segmentos. Essa divisão visa reduzir os arquivos de dados GNSS/INS, e evitar problemas como o preenchimento total do cartão de memória e corromper os arquivos GNSS/INS em caso de falha no sistema de fornecimento de energia do sistema. Os segmentos e suas informações são apresentados nas Figuras 8.5, 8.6, 8.7, 8.8 e 8.9.

Segmento 1	
Horário	
11:43:31 – 13:02:54	
Quantidade de imagens	
203	
Imagens uteis	
166	
Área	
Pres. Prudente	
Álvares Machado	
Pres. Bernardes	

Figura 8.5 - Segmento 1 – Área entre Presidente Prudente e Presidente Bernardes.



Figura 8.6 - Segmento 2 - Presidente Prudente à Martinópolis.

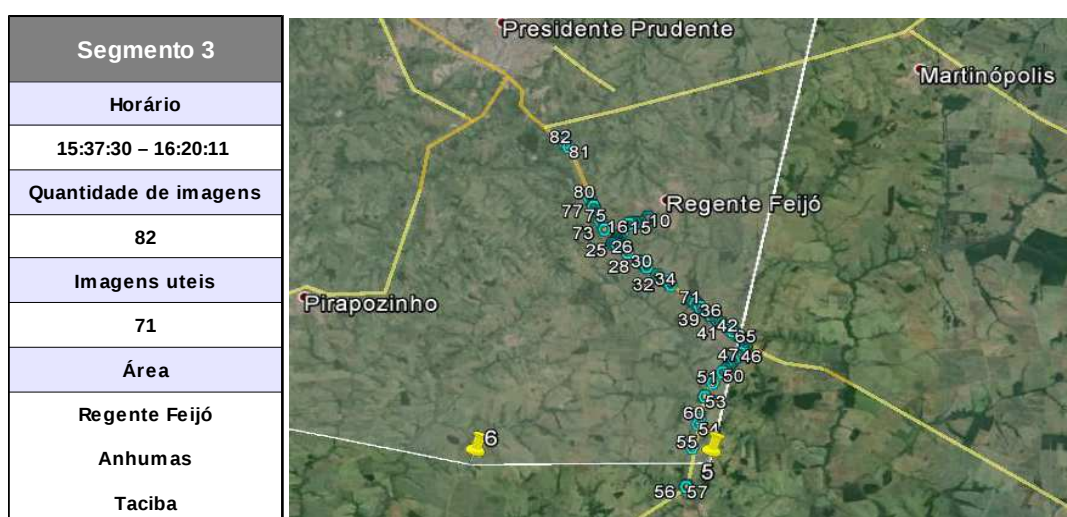


Figura 8.7 - Segmento 3 - Presidente Prudente à Taciba.

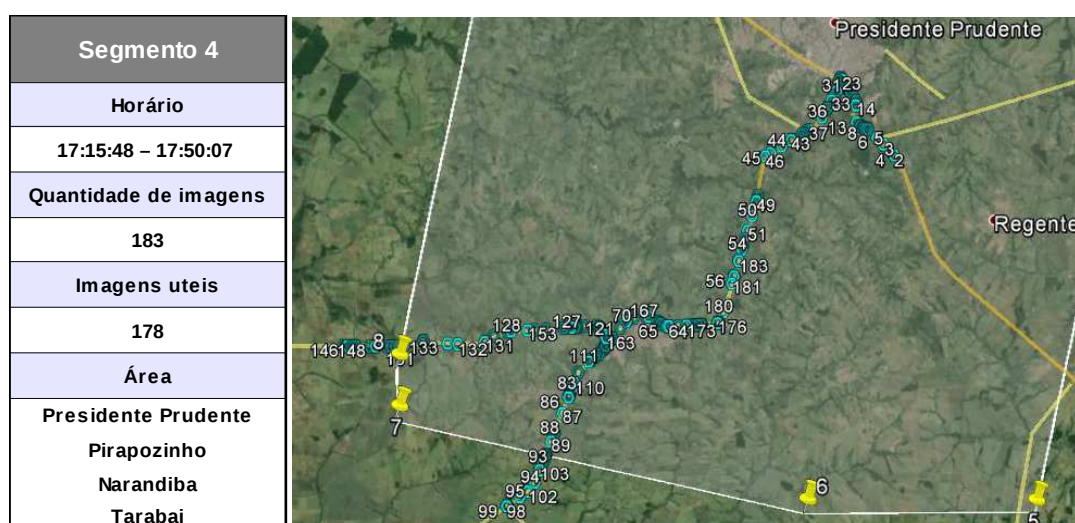


Figura 8.8 - Segmento 4 - Pirapozinho, Narandiba e Tarabai.



Figura 8.9 - Segmento 5 – Presidente Prudente à Alfredo Marcondes.

8.4. PROCESSAMENTO DOS DADOS GNSS/INS

As imagens omnidirecionais foram coletadas com georreferenciamento direto utilizando o sistema inercial SPAN-CPT da Novatel Inc., que integra um receptor GNSS de dupla frequência a uma unidade de medida inercial. Os dados capturados pelo equipamento foram processados pelo software *Waypoint Inertial Explorer*, que faz a integração dos dados GNSS com os dados da IMU.

Nesse projeto foi utilizado o processamento com os dados fortemente acoplados e suavizados com filtro de Kalman. Nesta seção são apresentados os resultados do processamento dos 5 segmentos do trajeto através das tabelas 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5 e os termos Desvio Padrão, Média, Max e Min representam:

- **Desvio Padrão** – desvio padrão das precisões estimadas;
- **Média** – a média dos valores das precisões estimadas;
- **Max** – o maior valor das precisões estimadas;
- **Min** – o menor valor das precisões estimadas.

Tabela 8.1 - Precisão estimada das medidas - Segmento 1.

Precisão Estimada das Medidas (Segmento 1)									
	Desvio Padrão	Media	Max	Min		Desvio Padrão	Media	Max	Min
E (East) (m)	0,0149	0,0101	0,1384	0,0046	Roll (arcmin)	0,3967	0,3902	0,7525	0,2404
N (North) (m)	0,0198	0,0109	0,2182	0,0046	Pitch (arcmin)	0,4122	0,4039	0,7815	0,2187
Altitude (m)	0,0222	0,0125	0,2329	0,0043	Heading (arcmin)	1,9100	1,8850	3,0780	1,2940

Tabela 8.2 - Precisão estimada das medidas - Segmento 2.

Precisão Estimada das Medidas (Segmento 2)									
	Desvio Padrão	Media	Max	Min		Desvio Padrão	Media	Max	Min
E (East) (m)	0,0096	0,0094	0,0195	0,0070	Roll (arcmin)	0,3991	0,0398	0,0537	0,0345
N (North) (m)	0,0093	0,0092	0,0184	0,0071	Pitch (arcmin)	0,4042	0,4029	0,5447	0,3504
Altitude (m)	0,0093	0,0091	0,0206	0,0069	Heading (arcmin)	2,7120	2,5690	4,4260	1,4050

Tabela 8.3 - Precisão estimada das medidas - Segmento 3.

Precisão Estimada das Medidas (Segmento 3)									
	Desvio Padrão	Media	Max	Min		Desvio Padrão	Media	Max	Min
E (East) (m)	0,0073	0,0068	0,0274	0,0044	Roll (arcmin)	0,3639	0,3599	0,6303	0,2323
N (North) (m)	0,0085	0,0080	0,0330	0,0051	Pitch (arcmin)	0,3635	0,3600	0,6138	0,2435
Altitude (m)	0,0075	0,0070	0,0261	0,0045	Heading (arcmin)	1,7600	1,7450	2,4980	0,9970

Tabela 8.4 - Precisão estimada das medidas - Segmento 4.

Precisão Estimada das Medidas (Segmento 4)									
	Desvio Padrão	Media	Max	Min		Desvio Padrão	Media	Max	Min
E (East) (m)	0,0159	0,0127	0,0830	0,0043	Roll (arcmin)	0,4028	0,3974	0,7118	0,2568
N (North) (m)	0,0173	0,0137	0,0924	0,0045	Pitch (arcmin)	0,4026	0,3973	0,7194	0,2492
Altitude (m)	0,0165	0,0126	0,1008	0,0038	Heading (arcmin)	2,1780	2,1060	4,5880	1,1810

Tabela 8.5 - Precisão estimada das medidas - Segmento 5.

Precisão Estimada das Medidas (Segmento 5)									
	Desvio Padrão	Media	Max	Min		Desvio Padrão	Media	Max	Min
E (East) (m)	0,0197	0,0144	0,0737	0,0039	Roll (arcmin)	0,3809	0,3741	0,6785	0,2282
N (North) (m)	0,0217	0,0155	0,0934	0,0044	Pitch (arcmin)	0,3771	0,3698	0,6879	0,2200
Altitude (m)	0,0191	0,0142	0,0681	0,0040	Heading (arcmin)	1,8900	1,7700	4,2970	0,9790

Com a análise dos dados do processamento GNSS/INS, os erros médios estimados nas coordenadas (*E*, *N*, *h*) foram menores que 1,5 cm e o maior valor de desvio padrão estimado foi 10 cm, com exceção do trecho 1 onde o veículo transitou em área urbana atingindo um desvio padrão estimado de 20 cm. É importante ressaltar que estes valores podem estar superestimados, devido ao grande número de observações e consequente redundância.

Em relação aos ângulos de atitude, o desvio padrão médio estimado para a arfagem e rolagem ficou entre 0,35 e 0,40 arcos de minuto e para a guinada ficou entre 1,7 e 2,5 arcos de minuto. O maior valor para o desvio padrão estimado da guinada foi de 4,58 arcos de minuto.

8.5. REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

Para a reamostragem das imagens omnidirecionais foi utilizado o modelo de funções racionais com polinômios de 4° grau, que apresentou melhor precisão, com erros estimados de 1/3 dos valores dos erros nos modelos de distâncias polares, para os dados do campo de calibração.

Os parâmetros do modelo estimados com as imagens do campo de calibração foram utilizados para reamostrar as imagens coletadas nas rodovias. Os resultados da utilização desses

parâmetros indicaram que as imagens reamostradas possuíam significativa diferença de escala entre o lado esquerdo e direito da imagem. Este efeito é verificado com a imagem apresentada na Figura 8.10.

A pista da rodovia onde está o veículo com o sistema de imageamento omnidirecional possui a largura de aproximadamente 200% da largura da pista de sentido oposto. Os templates gerados com esse efeito resultarão em coeficientes baixos de correlação durante o processo de correspondência.

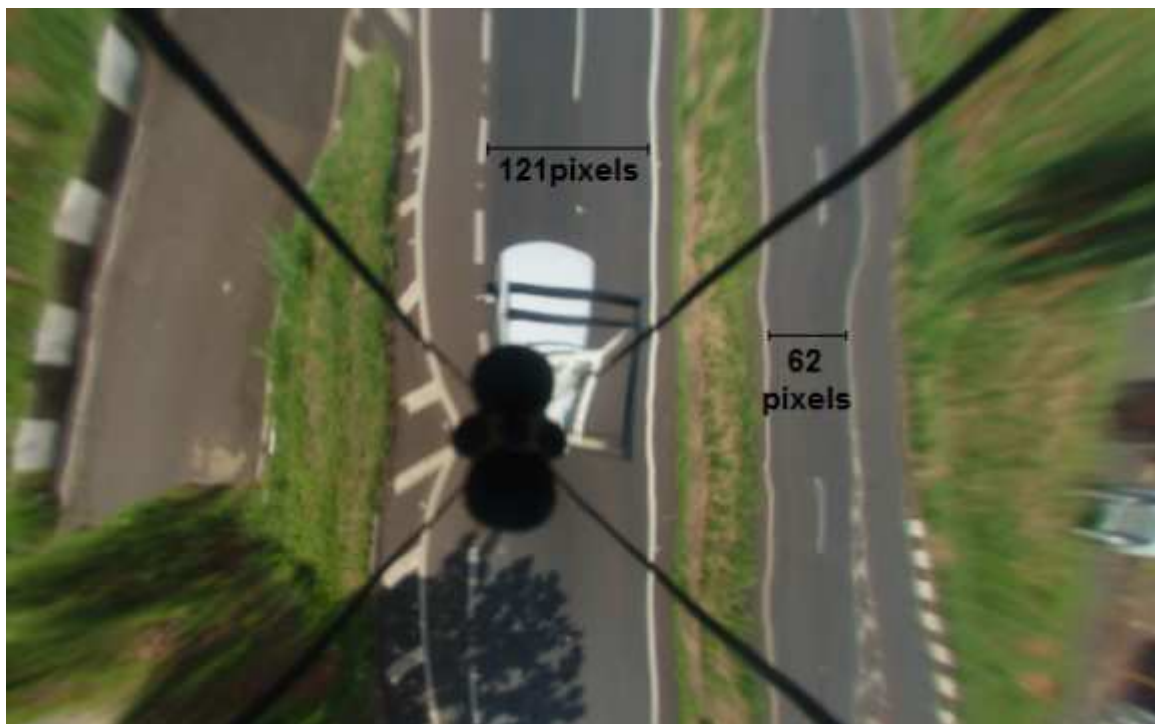


Figura 8.10 - Imagem reamostrada com os parâmetros da imagem do campo de calibração.

Esse efeito foi provavelmente causado por mudança nas configurações do sistema, ou seja, alterações na relação entre a câmara e o espelho entre a coleta no campo de calibração e a coleta na rodovia. Com base nesta análise, concluiu-se que os parâmetros estimados no campo de calibração não seriam adequados para as imagens de rodovia.

Com os problemas encontrados há a necessidade de estimar novos parâmetros para o modelo utilizado na reamostragem da imagem omnidirecional. Para isto, foram utilizadas imagens de rodovia capturadas durante o trabalho de campo.

8.6. UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE CAMPO (RODOVIA) NA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

Para a estimação dos parâmetros do modelo são necessárias coordenadas do espaço imagem e o posterior levantamento das coordenadas no espaço objeto dos pontos identificáveis nessas imagens.

Uma técnica para a determinação das coordenadas do espaço objeto e imagem utilizando imagens registradas durante o trabalho de campo segue as seguintes etapas:

1. Seleção, através de análise visual, das imagens omnidirecionais a serem utilizadas no processo de determinação dos parâmetros do modelo para reamostragem destas imagens. Nessa análise foram verificadas as seguintes características nas imagens:
 - a) Quantidade de pontos – As imagens a serem utilizadas devem possuir grande quantidade de pontos fotoidentificáveis;
 - b) Distribuição dos pontos – Os pontos foto-identificáveis devem ser bem distribuídos na imagem para que toda a área possa ser modelada;
 - c) Ângulos de rolagem e arfagem da imagem – As imagens omnidirecionais possuem informações da atitude no momento da aquisição; dessa forma os ângulos de rolagem e arfagem podem ser analisados e devem próximos a zero. Quanto maiores os valores para esses ângulos, principalmente o ângulo de rolagem, maiores serão as diferenças de escala nas imagens reamostradas.
2. Determinação das coordenadas planimétricas do espaço objeto para os pontos identificados nas imagens, gerando um sistema de coordenadas local com origem no local da aquisição da imagem e os eixos x e y orientados de acordo com o eixo x e y do sistema de coordenadas fotogramétricas.

Com o sistema de coordenadas definido, os pontos foto-identificáveis devem ser medidos e suas coordenadas definidas. As coordenadas dos pontos de controle no terreno podem ser levantadas de duas formas:

- (1) diretamente no local com utilização de um receptor GPS e uma estação total, onde o receptor GPS é utilizado para determinar a origem do sistema e a estação total para fazer o levantamento dos outros pontos em um sistema local, ou;
- (2) realizando medições em imagens aéreas e ortofotos de alta resolução ou através da fototriangulação de bloco de imagens aéreas, nas ortofotos e na fototriangulação as coordenadas estimadas possuem correções em relação ao relevo.

Nesse experimento, a medição das coordenadas dos pontos no espaço objeto foi realizada através da utilização de uma imagem aérea de alta resolução da área. Para isso foram realizados os seguintes passos:

- a) Localizar da imagem aérea – Conhecendo a posição de coleta da imagem omnidirecional selecionada, localiza-se uma imagem aérea que cubra a área dos pontos identificáveis;
- b) Orientar a imagem omnidirecional em relação a imagem aérea, fazendo com que as imagens tenham os sistemas de coordenadas alinhados. Para isso são utilizados os dados de orientação exterior das duas imagens;

- c) Localizar os pontos identificáveis, que servirão de pontos de controle, em ambas as imagens. Com esse processo são definidas as coordenadas dos pontos na imagem omnidirecional e as coordenadas dos pontos na imagem aérea que servirão para gerar pontos de controle no terreno;
- d) Determinar as coordenadas da origem do sistema de coordenadas do espaço objeto dentro da imagem aérea. Para isso é necessário localizar na imagem aérea as coordenadas referentes ao centro da imagem omnidirecional, com base em seus parâmetros de orientação exterior;
- e) Determinar as coordenadas dos pontos identificados no espaço objeto, fazendo a translação das coordenadas dos pontos da imagem aérea para a origem do sistema do espaço objeto identificado no item (d) e aplicando um fator escala baseado no GSD da imagem aérea. Deste modo foi definido um sistema local e considerou-se a área contendo os pontos como plana. Para o nível de resolução final isto pode ser considerado suficiente.

Nesse experimento foram utilizados 123 pontos de controle com a distribuição apresentada na Figura 8.11. As coordenadas no espaço objeto foram extraídas de uma imagem aérea de alta resolução (GSD de 6 cm).



Figura 8.11 - Distribuição dos pontos de controle no espaço objeto.

Ao utilizar imagens de rodovia, observou-se que a quantidade e a distribuição dos pontos na imagem não são satisfatórias para estimar corretamente os parâmetros do modelo de funções racionais. Desta forma optou-se por utilizar o modelo de coordenadas polares que demonstrou apresentar mesmo nível de qualidade, porém com um menor número de pontos de controle.

Com a utilização do modelo de coordenadas polares, verificou-se que os resíduos resultantes do processo de ajustamento possuem grande magnitude e o comportamento semelhante

a uma senóide, conforme mostra a Figura 8.12. Para minimizar esses resíduos foi definido um modelo adicional, com correção com base no ângulo horizontal.

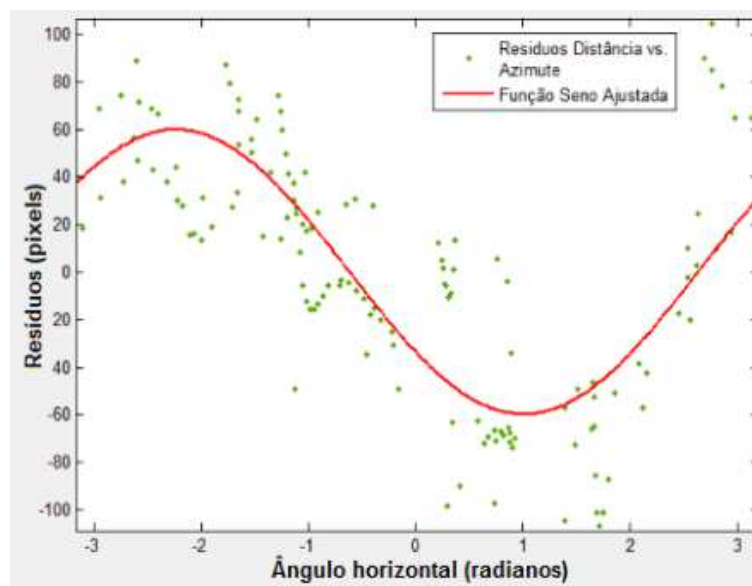


Figura 8.12 - Comportamento dos resíduos no ajustamento por distâncias polares.

8.7. MODELO DE COORDENADAS POLARES COM CORREÇÃO DE DISTÂNCIA UTILIZANDO FUNÇÃO SENO AJUSTADA

A abordagem de ajustamento de coordenadas polares e posterior correção das diferenças nas distâncias radiais é uma melhoria no modelo de coordenadas polares que tem como objetivo minimizar os problemas (distorções assimétricas) causados pela falta de alinhamento entre o eixo óptico da câmara e o eixo do cone.

Considerando que sempre há um desalinhamento entre os eixos, mesmo que pequeno, em algumas das distâncias radiais os resíduos apresentam uma variação sistemática em função do ângulo horizontal em um comportamento próximo a uma senóide, conforme apresentado na Figura 8.12. Nesta figura os pontos são os resíduos nas amostras, o eixo X é a variação do ângulo em relação ao eixo X do sistema de coordenadas do espaço objeto e o eixo Y é o resíduo da distância radial em pixels.

O modelo de coordenadas polares com correção adicional, utiliza como base o modelo de coordenadas polares, apresentado na seção 4.1.4, no qual há um polinômio para modelar a distância polar na imagem em função da distância polar no espaço objeto e outro para modelar o ângulo horizontal na imagem em relação ao ângulo do mesmo ponto no espaço objeto.

Esses polinômios modelam a projeção entre a imagem omnidirecional e o espaço objeto, considerando o perfeito alinhamento entre os eixos óptico e do espelho cônico. Porém esse alinhamento dificilmente ocorre. Utilizando esse modelo, com os eixos desalinhados, os resíduos gerados variam de acordo com o ângulo horizontal, onde em um lado da imagem, os resíduos são

grandes e positivos e no lado oposto esses valores são grandes, porém negativos, como mostrado na Figura 8.12.

Na modelagem dos resíduos, gerados pela falta de alinhamento, foi utilizada uma equação com a função seno (8.1), na qual c_1 , c_2 e c_3 são os coeficientes para correção dos resíduos com base no ângulo horizontal (θ), considerando que, para cada ângulo, a correção tem um valor diferente.

$$r_c = c_1 \cdot \text{sen}(c_2 \cdot \theta + c_3) \quad (8.1)$$

A distância polar final r_f para este modelo é formada pela distância resultante r_a do polinômio da Equação (4.11) e a correção do resíduo r_c conforme a Equação (8.1).

$$r_f = r_a + r_c \quad (8.2)$$

A distância polar r_f dada pela Equação (8.1) e o ângulo horizontal θ da Equação (4.10) definem as coordenadas polares no espaço imagem, transformadas em coordenadas cartesianas retangulares c' , l' pela Equação (8.3).

$$c' = r_f \cdot \cos(\theta), \quad l' = r_f \cdot \text{sen}(\theta) \quad (8.3)$$

Para transformar c' , l' em linha (l) e coluna (c) é necessário transladar para a origem da imagem, no canto superior esquerdo e refletir o eixo y, utilizando a equação (4.12).

Os valores de a_0 , a_1 , ..., a_n , b_0 , b_1 , ..., b_n e c_1 , c_2 e c_3 são estimados pelo método dos mínimos quadrados. O processo detalhado é apresentado nos passos a seguir.

- 1 – Realizar medidas (c , l) no espaço imagem e (X , Y) no espaço objeto, conforme detalhado no processo de definição dos parâmetros da projeção (considerar Z constante);
- 2 – Nas medidas (c , l), fazer a translação para o local da imagem onde é projetado o centro do cone, para que os dois sistemas estejam com a origem na mesma posição (este valor é constante e definido a priori) e realizar a rotação da imagem com base no ângulo de guinada dos parâmetros de orientação direta, visando alinhar os eixos dos sistemas de coordenadas do espaço objeto e imagem;
- 3 – Transformar as coordenadas (c' , l') em coordenadas polares (θ , r) no espaço imagem e as coordenadas (X , Y) em coordenadas polares (θ , R) no espaço objeto;
- 4 – Considerando n distâncias polares R no espaço objeto, n distâncias polares r no espaço imagem e um polinômio de sexto grau, foi utilizada a função `polyfit` do MATLAB para a estimação dos parâmetros utilizados na projeção das distâncias do espaço objeto para o espaço imagem. Funções similares podem ser encontradas em outros ambientes de programação;

A função $p = \text{polyfit}(\text{origem}, \text{destino}, n)$ retorna uma estrutura p contendo os coeficientes do polinômio de grau n obtido no ajustamento utilizando informações do espaço origem e destino. Nesse caso, as informações do espaço origem são as distâncias polares R no espaço objeto e do espaço destino são os valores das distâncias r no espaço imagem. Com esses parâmetros de entrada para a função polyfit , o polinômio ajustado p faz a transformação de distâncias do espaço objeto para distâncias no espaço imagem.

- 5 – Com os n ângulos θ no espaço imagem e n ângulos horizontais Θ no espaço objeto, a função polyfit foi utilizada para estimar os coeficientes do polinômio para a transformação entre os azimutes do espaço objeto e espaço imagem. Na modelagem dos ângulos foi utilizado um polinômio de terceiro grau.
- 6 – Calcular os resíduos res no conjunto de distâncias através das diferenças entre as distâncias medidas r e as distâncias estimadas r' com o polinômio p ajustado e a utilização da função $r1 = \text{polyval}(p, R)$, que permite a estimação dos valores na imagem utilizando como entrada o polinômio p e as distâncias no espaço objeto R .
- 7 – Modelar a correção nas distâncias da imagem com base no ângulo horizontal. Nessa correção é utilizada a Equação (8.1), cujos parâmetros são estimados através de um ajustamento utilizando o método dos mínimos quadrados com a função fit do MATLAB. A função $c = \text{fit}(\text{origem}, \text{destino}, mxy)$ permite estimar os parâmetros do modelo mxy , que relaciona os valores de entrada origem aos valores de saída destino. Na função foi utilizada como origem de dados os ângulos horizontais no espaço objeto e destino os resíduos calculados para cada ângulo horizontal no espaço objeto.

8.8. ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA A REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

Com os 123 pontos coletados a partir da imagem aérea e o modelo de coordenadas polares com correção adicional, foi realizado o ajustamento das distâncias e dos azimutes entre os pontos de controle no espaço imagem e objeto. No ajustamento das distâncias, os resíduos encontrados foram grandes, conforme apresentado no gráfico da Figura 8.13.

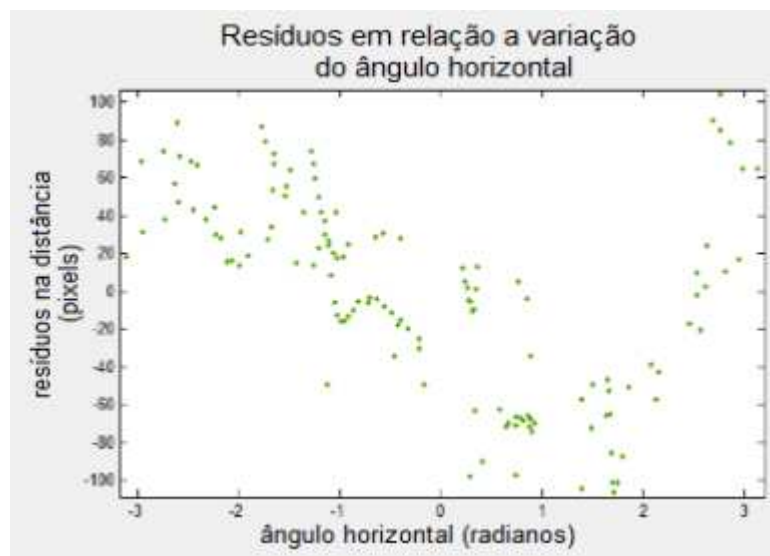


Figura 8.13 - Resíduos do ajustamento utilizando polinômio para a distância polar.

Para minimizar os resíduos é aplicada a correção utilizando a Equação de correção (8.1), resultando na redução dos resíduos nas distâncias, conforme apresentado na Figura 8.14.

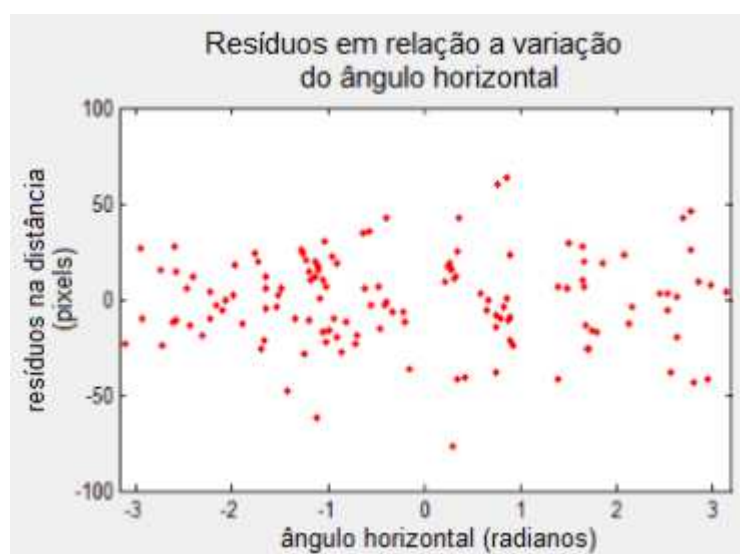


Figura 8.14 - Resíduos após a correção das distâncias polares.

Com a utilização do modelo ajustado de coordenadas polares e a posterior correção das distâncias, que visa diminuir os efeitos causados pela falta de alinhamento entre os eixos óptico e do cone, os resultados para a estimação das coordenadas cartesianas da imagem com base nas coordenadas cartesianas no espaço objeto são melhorados (Figura 8.15).

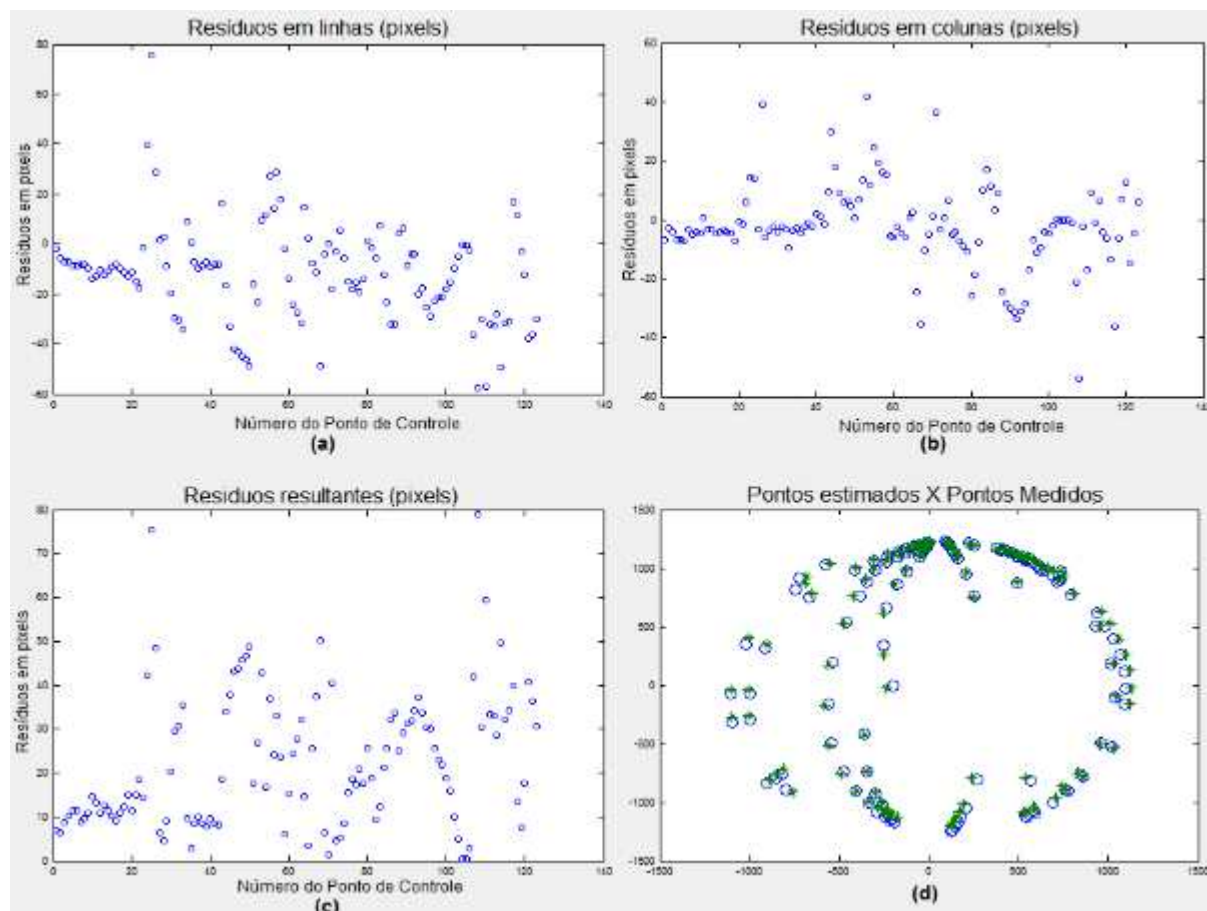


Figura 8.15 - Resultados com o ajustamento de distâncias polares com correção.

O gráfico da Figura 8.16 demonstra que os maiores resíduos estão nas áreas mais próximas ao sistema, pois o GSD do pixel nessas áreas varia de aproximadamente 1 a 5 cm. Como o modelo tem que se ajustar às diferentes escalas e distâncias, o modelo ajusta-se melhor nas áreas mais distantes onde a quantidade de pontos de controle é maior.

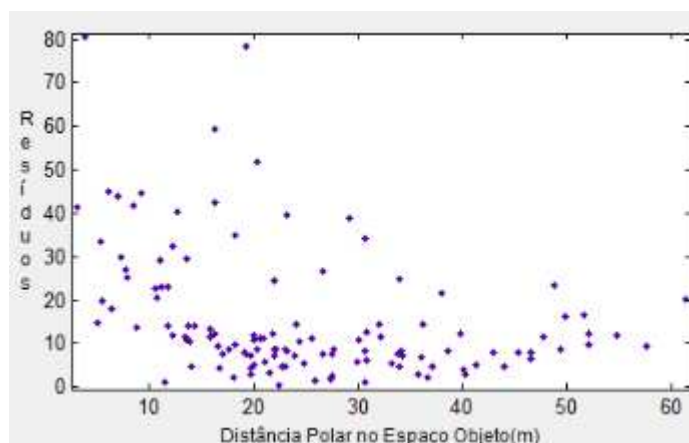


Figura 8.16 - Resíduos em pixels em relação à distância polar do espaço objeto (metros).

8.9. CORREÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATITUDE

No processo de aquisição das imagens omnidirecionais georreferenciadas, os eixos do sistema de coordenadas da plataforma (veículo) não estão alinhados com o sistema de coordenadas da imagem orbital, sendo necessário um alinhamento entre esses sistemas, ou seja, a correção da imagem utilizando os ângulos de atitude da plataforma no momento da aquisição da imagem.

O ângulo de guinada ou azimuth foi corrigido para todas as imagens utilizando uma rotação 2D na imagem omnidirecional reamostrada, e os ângulos de arfagem e rolagem para o experimento realizado não foram corrigidos, pois esses ângulos são pequenos, menores que 5 graus, com a maioria inferior a 3 graus, como é possível ver nos gráficos da Figura 8.17.

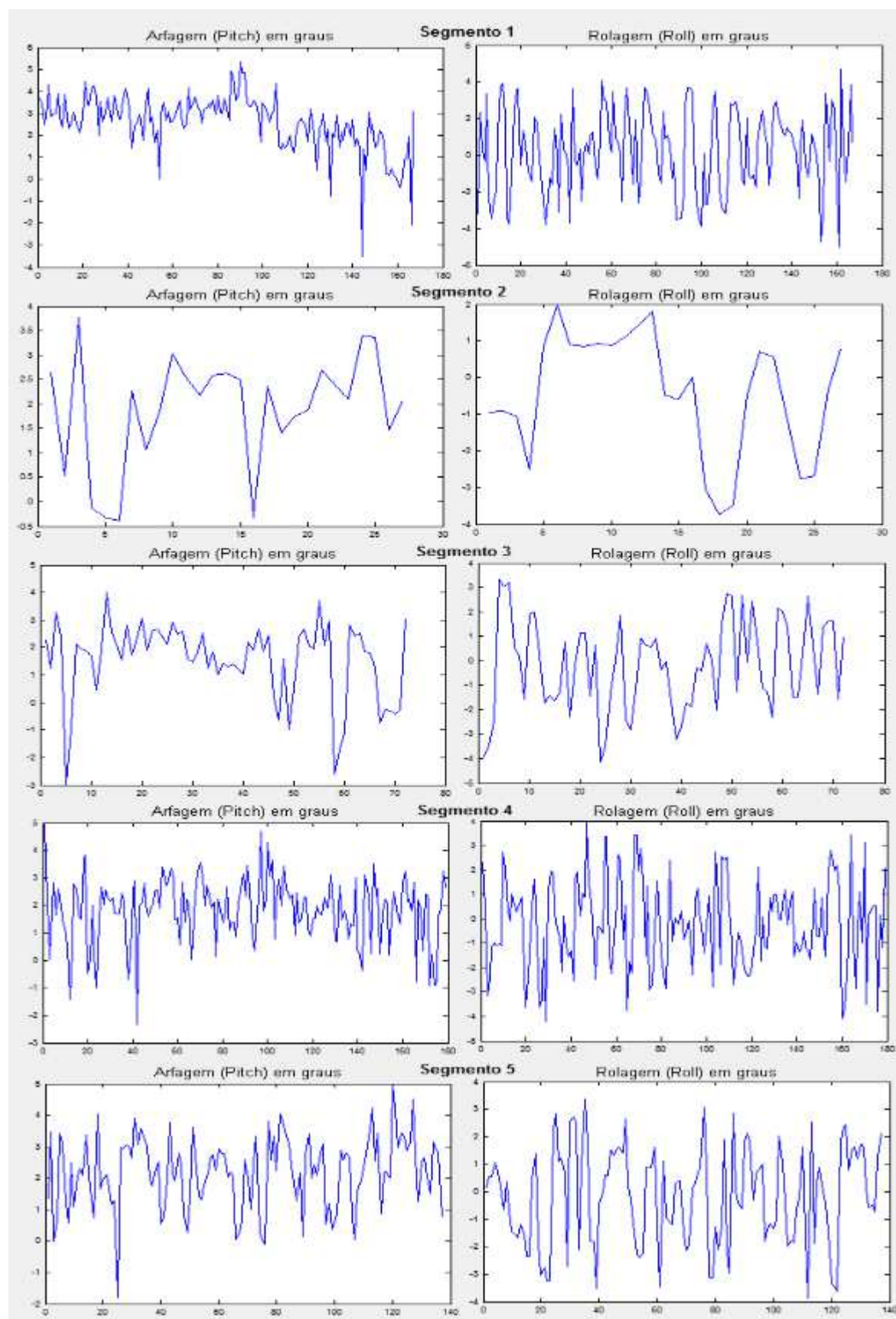


Figura 8.17 - Variação dos ângulos de arfagem (*pitch*) e rolagem (*roll*) nas imagens coletadas.

8.10. LOCALIZAÇÃO DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS GEORREFERENCIADAS NA IMAGEM ORBITAL

Com as imagens omnidirecionais reamostradas, convertidas em níveis de cinza (utilizando a função de conversão apresentada na Equação (6.12) da Seção 6.5.1) e subamostradas, e os recortes realizados na imagem orbital com base nos dados de georeferenciamento da própria imagem, foi realizado o processo de correspondência entre as imagens.

No processo de correspondência por área foi utilizada como função de correspondência a correlação cruzada normalizada. O conjunto do experimento é formado por 516 pares de imagens (*template* terrestre e recorte da imagem orbital) divididos em 5 segmentos. A Tabela 8.6 apresenta as informações sobre as imagens registradas durante o trabalho de campo.

Tabela 8.6 - Informações sobre as imagens registradas durante o trabalho de campo.

Segmento	Total de Imagens	Imagens Georref.		Imagens não Georref.		Imagens fora do cenário		Áreas sem Imageamento		Imagens Utilizadas	
		Quant. imagens	% total do segmento	Quant. imagens	% total do segmento	Quant. imagens	% total do segmento	Quant. imagens	% total do segmento	Quant. imagens	% total do segmento
1	203	167	82,27%	36	17,73%	0	0,00%	0	0,00%	167	82,27%
2	31	27	87,10%	4	12,90%	0	0,00%	0	0,00%	27	87,10%
3	82	72	87,80%	10	12,20%	7	8,54%	9	10,98%	56	68,29%
4	183	165	90,16%	18	9,84%	0	0,00%	17	9,29%	148	80,87%
5	147	137	93,20%	10	6,80%	18	12,24%	4	2,72%	115	78,23%
Totais	646	568	87,93%	78	12,07%	25	3,87%	30	4,64%	513	79,41%

Na Tabela 8.6 as colunas representam:

- **Total de Imagens** – Quantidade de imagens registradas em campo para cada um dos segmentos;
- **Imagens Georref.** - Imagens com dados de georeferenciamento após o pós-processamento;
- **Imagens não Georref.** - Imagens sem os dados completos de georeferenciamento;
- **Imagens fora do cenário** – Imagens que foram registradas e estão fora da cena orbital utilizada no experimento;
- **Áreas sem Imageamento orbital** – Área dentro da cena, mas devido às correções geométricas realizadas na imagem orbital, os pixels, ou parte deles, estão sem informações (pretos) com apresentado na Figura 8.18;
- **Imagens Utilizadas** – Imagens realmente utilizadas no processo de correspondência.

As imagens omnidirecionais reamostradas possuem o tamanho de 25 x 25 pixels com GSD de 2,5 m, imageando o correspondente a 62,5 x 62,5 metros. Os recortes das imagens orbitais são 55 x 55 pixels, totalizando uma janela no solo de 137,5 x 137,5 metros.

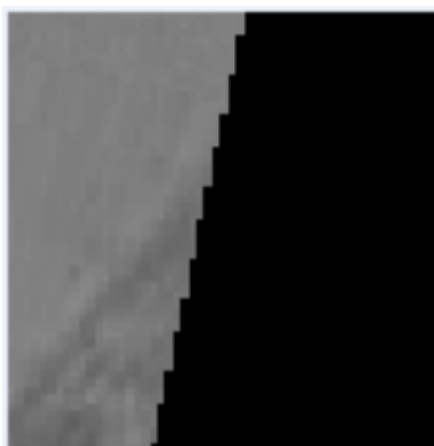


Figura 8.18 - Exemplo de área na imagem orbital com informações parciais de níveis de cinza.

Os resultados do processo de correspondência são apresentados na Tabela 8.7, podendo-se verificar que 42,3% (217 imagens) das imagens obtiveram coeficiente de correlação maior que 0,5 (50% de correlação) e aproximadamente 20% das imagens tiveram coeficiente de correlação maior que 60%.

Tabela 8.7 - Resultados do processo de correspondência.

Segmento	Imagens	Coef. Correlação maior 80%		Coef. Correlação maior 70%		Coef. Correlação maior 60%		Coef. Correlação maior 50%	
		Quant. imagens	% imagens segmento	Quant. imagens	% imagens segmento	Quant. imagens	% imagens segmento	Quant. imagens	% imagens segmento
1	167	2	1,20%	9	5,39%	33	19,76%	69	41,32%
2	27	0	0,00%	3	11,11%	7	25,93%	10	37,04%
3	56	1	1,79%	6	10,71%	20	35,71%	37	66,07%
4	148	0	0,00%	1	0,68%	11	7,43%	44	29,73%
5	115	2	1,74%	8	6,96%	23	20,00%	57	49,57%
Totais	513	5	0,97%	27	5,26%	94	18,32%	217	42,30%

Um grande número de imagens obteve coeficientes de correlação acima de 50%, porém, entre essas imagens há uma grande quantidade de falsos-positivos, ou seja, imagens com bons valores de correlação, mas em posições incorretas. As tabelas 8.8 e 8.9 apresentam dados sobre as imagens com correlação correta e falsos-positivos, determinadas por inspeção visual, respectivamente para coeficientes de correlação maiores que 60% e 50%.

Nas tabelas 8.8 e 8.9, a coluna “Imagens com Correlação” representa o percentual de correspondências em relação à quantidade de imagens com correlação maior que 60% ou 50%, e a coluna “Total de Imagens”, o percentual de correlações em relação ao total de imagens utilizadas no processo de correspondência.

Com os dados dessas tabelas é possível afirmar que aproximadamente 40% das correlações são falsos-positivos (para os coeficientes de correlação de 50% e 60%), ou seja,

correspondências erradas, que devem ser eliminadas antes do processamento de correção da imagem orbital.

Tabela 8.8 - Resultados da análise visual das correspondências com coeficiente de correlação superior à 60%.

Processamento e análise com coeficiente de correlação maior que 60%										
Segmento	Imagens Utilizadas		Imagens com coeficiente maior que 60%		Correlação Correta			Falsos Positivos		
					Quant.	Imagens com Correlação	Total de Imagens	Quant.	Imagens com Correlação	Total de Imagens
1	167	82,27%	33	19,76%	26	78,79%	15,57%	7	21,21%	4,19%
2	27	87,10%	7	25,93%	4	57,14%	14,81%	3	42,86%	11,11%
3	56	68,29%	20	35,71%	15	75,00%	26,79%	5	25,00%	8,93%
4	148	80,87%	11	7,43%	6	54,55%	4,05%	5	45,45%	3,38%
5	115	78,23%	23	20,00%	7	30,43%	6,09%	16	69,57%	13,91%
Totais	513	79,41%	94	18,32%	58	61,70%	11,31%	36	38,30%	7,02%

Tabela 8.9 - Resultados da análise visual das correspondências com coeficiente de correlação superior à 50%.

Processamento e análise com coeficiente de correlação maior que 50%										
Segmento	Imagens Utilizadas		Imagens com coeficiente maior que 50%		Correlação Correta			Falsos Positivos		
					Quant.	Imagens com Correlação	Total de Imagens	Quant.	Imagens com Correlação	Total de Imagens
1	167	82,27%	69	41,32%	49	71,01%	29,34%	20	28,99%	11,98%
2	27	87,10%	10	37,04%	6	60,00%	22,22%	4	40,00%	14,81%
3	56	68,29%	37	66,07%	24	64,86%	42,86%	13	35,14%	23,21%
4	148	80,87%	44	29,73%	23	52,27%	15,54%	21	47,73%	14,19%
5	115	78,23%	57	49,57%	24	42,11%	20,87%	33	57,89%	28,70%
Totais	513	79,41%	217	42,30%	126	58,06%	24,56%	91	41,94%	17,74%

Nas tabelas 8.10, 8.11, 8.12, 8.13 e 8.14 são apresentados os resultados de cada um dos segmentos com análise visual para todos os limiares.

Tabela 8.10 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 1.

Segmento 1								
	CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Quantidade	2		9		33		69	
	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp
Falsos-Positivos	0	0,00%	0	0,00%	7	21,21%	20	28,99%
Corretas	2	100%	9	100%	26	78,79%	49	71,01%

Tabela 8.11 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 2.

Segmento 2								
	CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Quantidade	0		3		7		10	
	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp
Falsos-Positivos	0	-	1	33,33%	3	42,86%	4	40,00%
Corretas	0	-	2	66,67%	4	57,14%	6	60,00%

Tabela 8.12 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 3.

Segmento 3								
	CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Quantidade	1		6		20		37	
	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp
Falsos-Positivos	1	100%	2	33,33%	5	25,00%	13	0,351351
Corretas	0	0,00%	4	66,67%	15	75,00%	24	0,648649

Tabela 8.13 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 4.

Segmento 4								
	CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Quantidade	0		1		11		44	
	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp
Falsos-Positivos	0	-	1	100,00%	5	45,45%	21	47,73%
Corretas	0	-	0	0,00%	6	54,55%	23	52,27%

Tabela 8.14 - Resultados da análise visual das correspondências para o segmento 5.

Segmento 5								
	CCN >= 80%		CCN >= 70%		CCN >= 60%		CCN >= 50%	
Quantidade	2		8		23		57	
	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp	quant. imagens	% do total corresp
Falsos-Positivos	1	50,00%	5	62,50%	16	69,57%	33	57,89%
Corretas	1	50,00%	3	37,50%	7	30,43%	24	42,11%

8.11. ELIMINAÇÃO DOS FALSOS-POSITIVOS

As correspondências com resultados falsos-positivos, que são correspondências com altos coeficientes de correlação, cuja posição localizada não representa a área procurada (*template*), devem ser eliminadas do conjunto de dados.

A validação do procedimento de eliminação das correspondências com falsos-positivos foi realizada com a aplicação do procedimento apresentado na seção 7.4 (Eliminação das correspondências com falsos positivos” do capítulo 7), em dois conjuntos de dados diferentes.

No primeiro conjunto foram agrupados os pontos de todos os segmentos que obtiveram coeficientes de correspondência superiores a 50%, formando um conjunto com 217 pontos de controle.

A exclusão de pontos do conjunto ocorreu enquanto a raiz do erro médio quadrático para os pontos de controle foi superior a 3, e o ponto excluído a cada iteração foi o que obteve o maior resíduo. A Tabela 8.15 apresenta os resultados por segmento e total desse processo.

Com os valores da Tabela 8.15 é possível verificar que alguns dos pontos da análise visual que foram rotulados como correspondências corretas eram áreas onde não havia características para identificar precisamente o local correto na rodovia.

Tabela 8.15 - Informações sobre o processo de eliminação dos falsos-positivos nas correspondências com coeficientes de correlação superiores a 50%.

Processo de Eliminação de Falsos-Positivos com Coeficiente maior que 50%					
Segmento	Quantidade de Imagens	Corretas	Falsos-Positivos	Imagens no Ajustamento	Imagens Retiradas
1	69	49	20	30	39
2	10	6	4	3	7
3	37	24	13	13	24
4	44	23	21	15	29
5	57	24	33	18	39
Totais	217	126	91	79	138

A Figura 8.19 apresenta os resíduos resultantes do ajustamento da coordenada X e a distribuição desses resíduos dentro da cena utilizada, e a Figura 8.20 mostram os resíduos em relação à coordenada Y da transformação afim para ajustar os pontos de controle localizados com o processo de correspondência em relação às posições calculadas com base na orientação da imagem. As coordenadas (X, Y) são relacionadas as linhas e colunas da imagem orbital e seus valores são em pixels da imagem orbital.

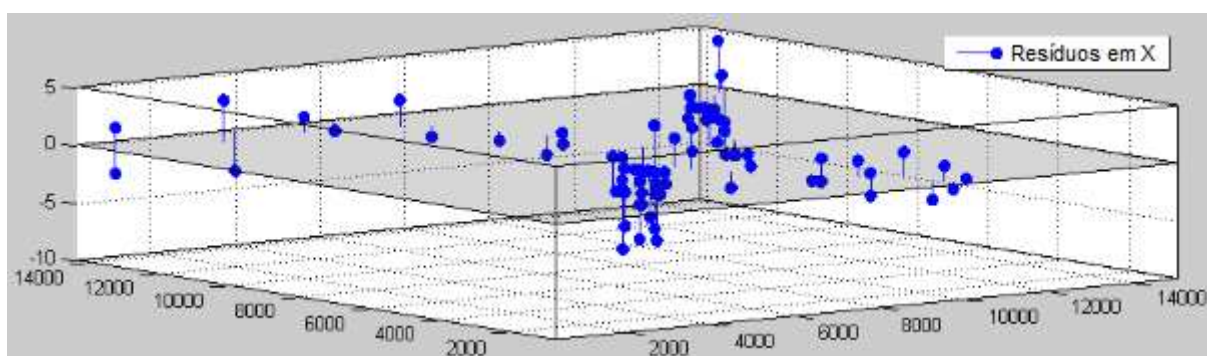


Figura 8.19 - Resíduos resultantes do ajustamento dos pontos em relação à coordenada X .

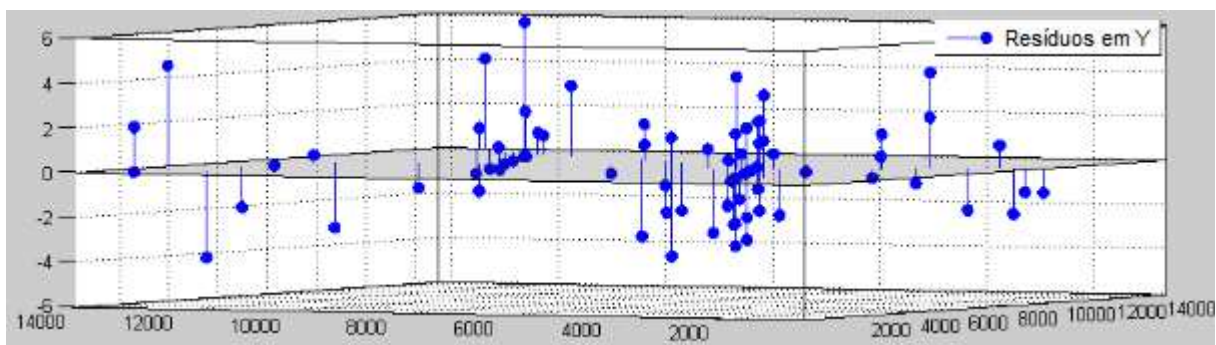


Figura 8.20 - Resíduos resultantes do ajustamento dos pontos em relação à coordenada Y.

Os gráficos da Figura 8.21 apresentam os resíduos em X , Y e a resultante desses resíduos na sequência de pontos de controle. Com a magnitude dos resíduos é possível verificar que dentro da cena os resíduos não são superiores a 6 pixels para a transformação Afim. Na utilização do modelo polinomial, para a correção geométrica da imagem, esses resíduos poderão ser absorvidos pelo modelo.

A quantidade de pontos remanescentes no conjunto foi de 79 pontos, sendo retirados, de forma automática, 128 pontos de controle do conjunto que obtiveram os maiores resíduos até que o REMQ do conjunto de dados ajustado seja inferior a 3 pixels.

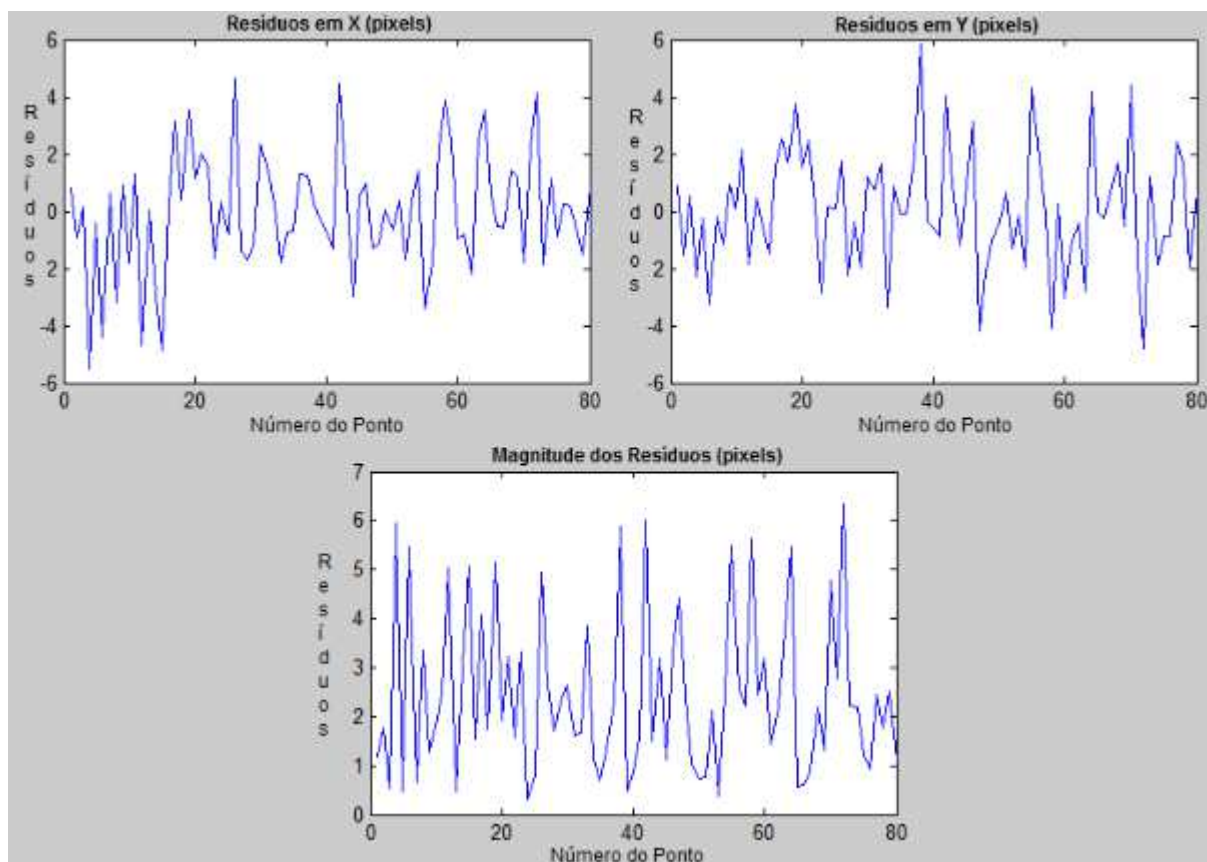


Figura 8.21 - Resíduos no final do processo de eliminação das correspondências com falsos-positivos utilizando transformação Afim.

O maior resíduo em magnitude no conjunto de pontos de controle restante foi de 6,0 pixels e a REMQ foi de 2,94 pixels.

No segundo conjunto foram agrupados 94 pontos de controle dos 5 segmentos que obtiveram coeficientes de correlação superiores a 60%. A seleção e exclusão dos pontos seguiram o mesmo critério do primeiro conjunto. A Tabela 8.16 apresenta os resultados da retirada dos pontos de controle onde o processo de correspondência resultou em falsos-positivos.

Tabela 8.16 - Informações sobre o processo de eliminação dos falsos-positivos nas correspondências com coeficientes de correlação superiores a 60%.

Processo de Eliminação de Falsos-Positivos com Coeficiente maior que 60%					
Segmento	Quantidade de Imagens	Corretas	Falsos-Positivos	Imagens no Ajustamento	Imagens Retiradas
1	33	26	7	19	14
2	7	4	3	3	4
3	20	15	5	9	11
4	11	6	5	5	6
5	23	7	16	5	18
Totais	94	58	36	41	53

Com a utilização das correspondências com coeficientes de correlação superiores à 60% houve uma menor distribuição dos pontos dentro da imagem e as figuras 8.22 e 8.23 mostram essa distribuição junto aos resíduos nesse ajustamento, que continuam na mesma proporção que o experimento anterior, com as correspondências com coeficientes de correlação superiores a 50%.

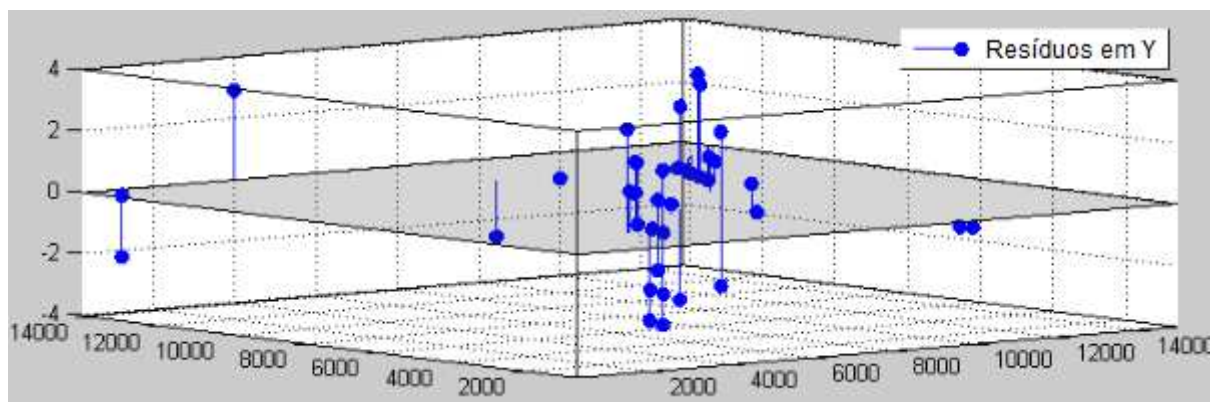


Figura 8.22 - Resíduos da coordenada Y no ajustamento com transformação Afim

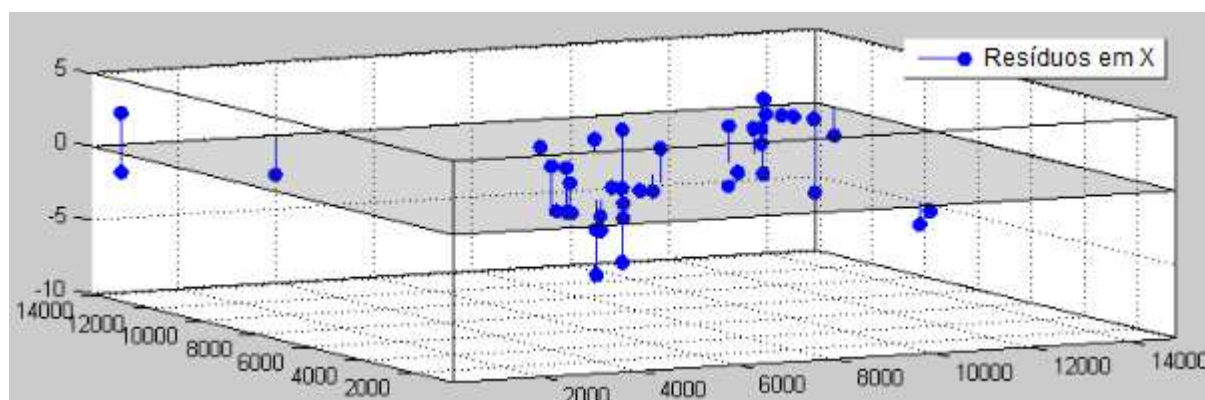


Figura 8.23 - Resíduos da coordenada X no ajustamento com transformação Afim

Apesar da menor eliminação de pontos de controle devido aos falsos-positivos, a utilização de um conjunto maior de imagens, mesmo com um maior percentual de falsos-positivos, permite o melhor espalhamento dos pontos de controle dentro da imagem.

8.12. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO PRODUTO ALOS/PRISM

Para a avaliação da qualidade do produto ALOS/PRISM 1B2G foram realizados experimentos utilizando dois conjuntos de dados: o conjunto dos pontos de controle com coeficiente de correlação maior ou igual a 50% e com coeficiente igual ou superior a 60%. Nos dois conjuntos foram eliminados automaticamente os falsos-positivos.

Essa avaliação consistiu na análise das discrepâncias encontradas entre as coordenadas dos pontos de verificação, localizadas pelo processo de correspondência e as coordenadas extraídas da imagem orbital georreferenciada. Essa análise visa determinar a qualidade do georreferenciamento da imagem orbital.

No primeiro experimento foram utilizados 79 pontos de controle, cujas coordenadas de terreno foram determinadas pelo sistema GNSS e localizadas na imagem ALOS/PRISM com o processo de correspondência. A distribuição dos pontos de controle na cena é apresentada na Figura 8.24.

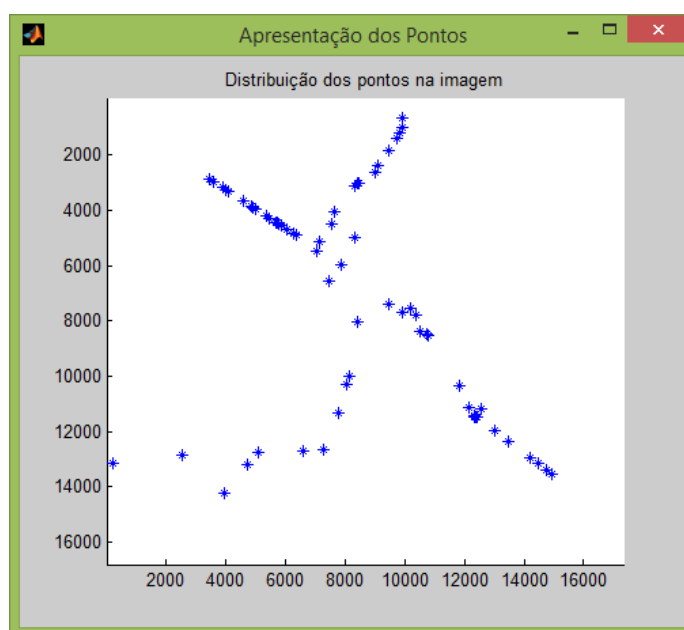


Figura 8.24 - Distribuição dos pontos de controle na imagem para o conjunto com correlação superior a 50%.

A Figura 8.25 apresenta graficamente os erros em linha, coluna e a resultante dos erros, sendo o erro resultante médio das coordenadas estimadas de 4,62 pixels (aproximadamente 11,5 metros no terreno) em relação às coordenadas dos pontos localizados no processo de correspondência. O erro máximo na resultante foi de 16,12 pixels e o REMQ de 5,54 pixels.

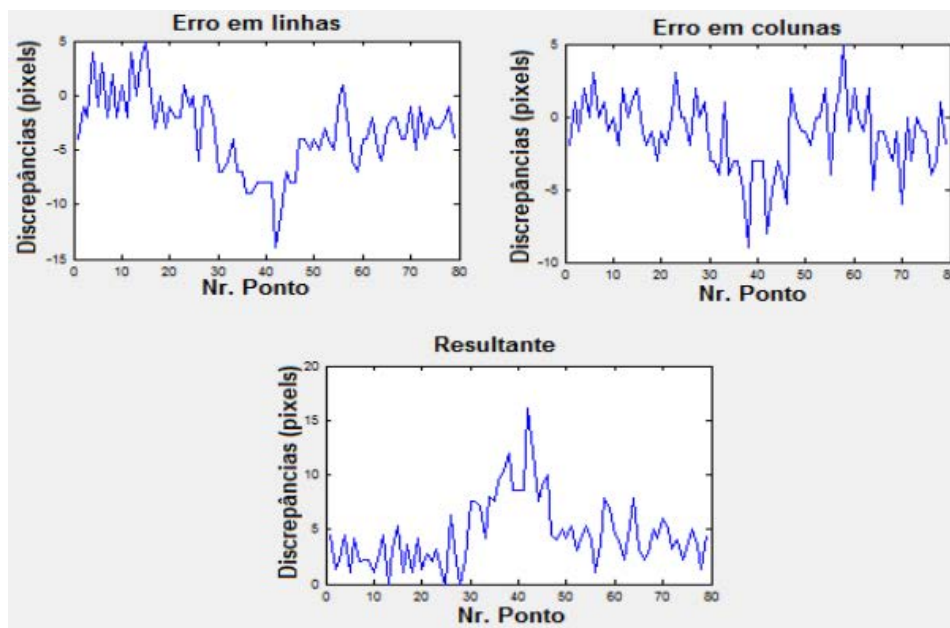


Figura 8.25 - Resultados do processamento.

Estes resultados são maiores que a expectativa de qualidade geométrica do produto, como definido pela JAXA (2011), porém, analisando os pontos nos quais as resultantes das discrepâncias foram acima do esperado, verificou-se que esses pontos estavam sobre a rodovia, mas não era possível identificar com precisão o local correto das correspondências, devido à falta de características que distinguíssem esse ponto, conforme apresentado na Figura 6.11.

No segundo experimento foi utilizado um conjunto com 41 pontos, selecionados com o processo de correspondência cujo coeficiente de correlação fosse superior ou igual a 60%.

A distribuição desses pontos no espaço imagem é apresentada na Figura 8.26, podendo-se verificar que esse conjunto possui distribuição menos favorável que o conjunto de pontos com coeficiente de correlação maior que 50%, fazendo com que algumas áreas possam não ser modeladas corretamente.

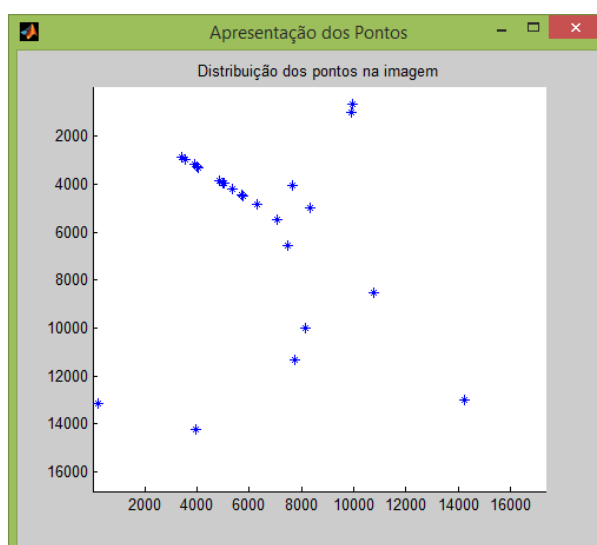


Figura 8.26 - Distribuição dos pontos do conjunto com correlação superior ou igual a 60%

Para este conjunto de dados, os resultados do processo de avaliação da qualidade são apresentados graficamente na Figura 8.27. O erro médio foi de 4,48 pixels; o REMQ de 5,32 pixels e o maior valor da resultante das discrepâncias de 10,3 pixels. Esses valores se aproximam da precisão estimada para o produto, porém ultrapassando ainda o valor esperado e novamente ocorreram correspondências nas quais não foi possível indicar com precisão o ponto da rodovia onde o ponto foi coletado.

Com esses resultados, o conjunto de dados formado pelos pontos com o coeficiente de correlação maior ou igual a 60% resulta em uma melhor estimativa dos parâmetros para o modelo polinomial a ser utilizado na correção da imagem orbital, porém com uma distribuição de pontos menos favorável dentro da cena.

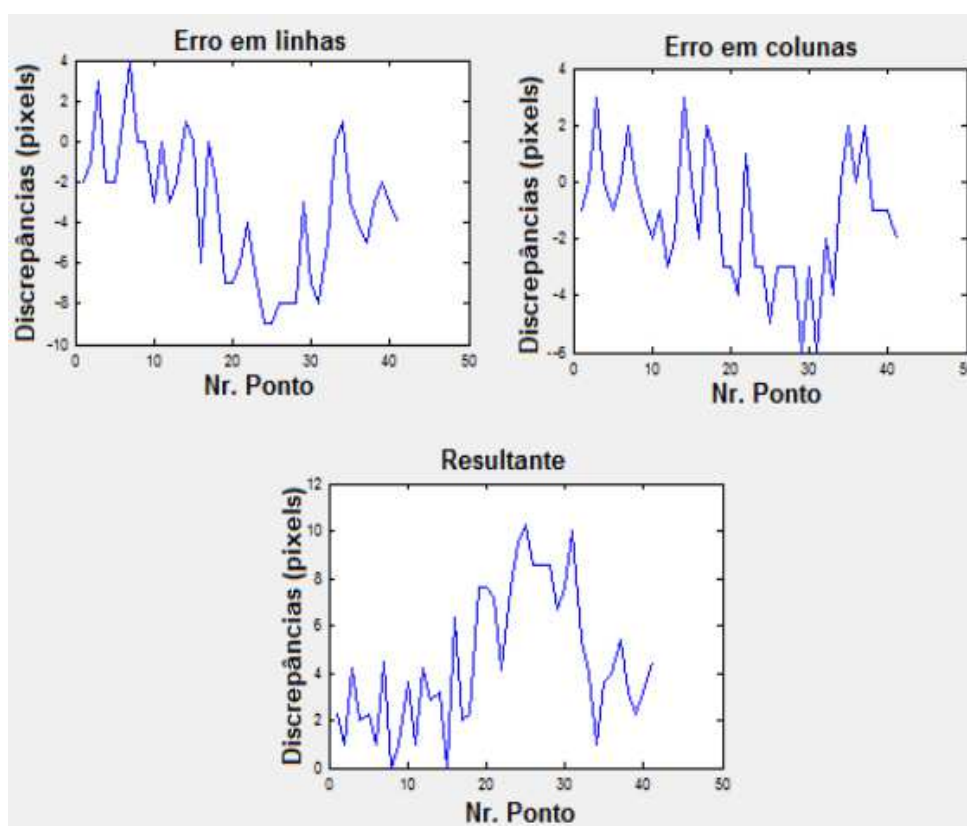


Figura 8.27 - Resultados do processo de avaliação com o conjunto de dados com coeficiente de correlação igual ou superior a 60%.

8.13. CORREÇÃO GEOMÉTRICA

A avaliação do processo de correção geométrica foi realizada através da análise dos resíduos, que visa determinar a qualidade do ajuste dos parâmetros do modelo ao conjunto de dados, e a análise dos erros encontrados nos pontos de verificação.

Com esse objetivo foi realizado um experimento com o conjunto de dados das correspondências com coeficiente de correlação igual ou superior a 50%, com a eliminação dos falsos positivos, em um total de 71 pontos.

Nesse conjunto de pontos foi realizada uma avaliação das discrepâncias entre as coordenadas calculadas com os parâmetros do georreferenciamento e as coordenadas localizadas pelo processo de correspondência.

Os pontos cujas discrepâncias em linha ou coluna forem superiores a 3 vezes o desvio padrão (99,75% das amostras) estimado pela Jaxa (2011) para os produtos 1B2 (imagens georreferenciadas), apresentado na Tabela 8.17, foram retirados do conjunto.

O conjunto de dados ao final desse processo continha 59 pontos de controle. O conjunto de pontos foi dividido em duas partes: 25% do conjunto de pontos foram utilizados como pontos de verificação; e 75% desse conjunto foi utilizado como pontos de controle para o ajustamento do modelo para correção geométrica.

Tabela 8.17 - Valores do desvio padrão dentro de uma cena (Fonte: Jaxa, 2011) e os limiares para eliminação de pontos.

Direção	Desvio Padrão na Cena		Limiar (3 sigma)
	Distância (m)	Distância (pixels)	Distância (pixels)
Direção da Coluna	4	1,6	4,8
Direção da Linha	6	2,4	7,2
GSD = 2,5m			3*sigma – 99,75%

A escolha dos pontos de verificação foi realizada de forma aleatória com a utilização da função `randi` do MATLAB, que retorna um conjunto de números aleatórios inteiros entre 1 e um valor máximo, e como pontos de controle foram utilizados os pontos restantes do conjunto.

Com esse processo, 12 pontos foram utilizados como pontos de verificação e 47 pontos de controle, cuja distribuição é apresentada na Figura 8.28.

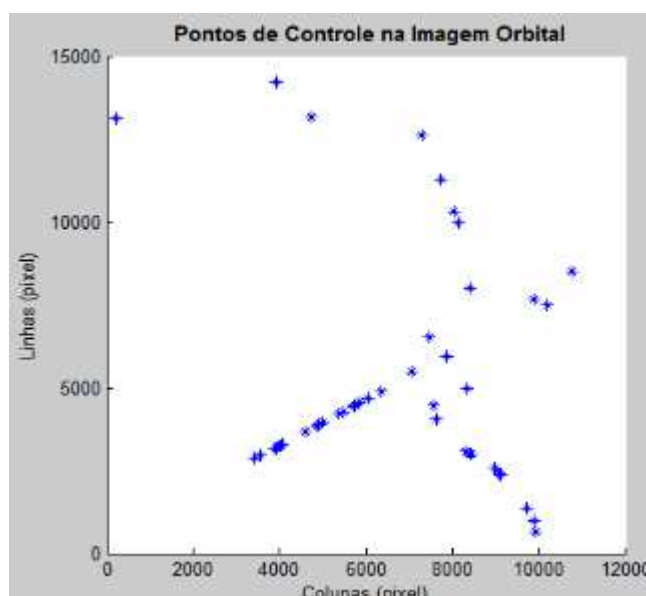


Figura 8.28 - Distribuição dos pontos de controle na imagem orbital.

Cada ponto de controle/verificação possui: as coordenadas da imagem orbital (c , l) estimadas projetando-se as coordenadas do espaço objeto do instante de captura da imagem

omnidirecional, com os parâmetros de georreferenciamento; e as coordenadas (x, y) localizadas com o processo de correspondência.

Com esses pontos de controle foi realizado um ajustamento utilizando polinômios de 4º grau conforme as equações 8.4 e 8.5.

$$\begin{aligned} c = & a_{00} + a_{10} * x + a_{01} * y + a_{20} * x^2 + a_{11} * x * y \\ & + a_{02} * y^2 + a_{30} * x^3 + a_{21} * x^2 * y + a_{12} * x * y^2 \\ & + a_{03} * y^3 + a_{40} * x^4 + a_{31} * x^3 * y + a_{22} * x^2 * y^2 \\ & + a_{13} * x * y^3 + a_{04} * y^4 \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} l = & b_{00} + b_{10} * x + b_{01} * y + b_{20} * x^2 + b_{11} * x * y \\ & + b_{02} * y^2 + b_{30} * x^3 + b_{21} * x^2 * y + b_{12} * x * y^2 \\ & + b_{03} * y^3 + b_{40} * x^4 + b_{31} * x^3 * y + b_{22} * x^2 * y^2 \\ & + b_{13} * x * y^3 + b_{04} * y^4 \end{aligned} \quad (8.5)$$

Onde a_{ij} e b_{ij} são os coeficientes dos polinômios utilizados para relacionar as coordenadas estimadas com informações de georreferenciamento das imagens (x, y) com as coordenadas localizadas pelo processo de correspondência (c, l) .

Com a realização do ajustamento, os valores estimados para os coeficientes do modelo são apresentados no Quadro 8.3.

Quadro 8.3 - Coeficientes dos polinômios do modelo estimados com o ajustamento

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
a00	6715,0581	b00	5401,4616
a10	2323,0971	b10	-1,2130
a01	3,9830	b01	3439,6907
a20	14,0616	b20	16,0523
a11	-13,6738	b11	-11,6674
a02	-19,4550	b02	-20,3748
a30	-16,6135	b30	-14,1623
a21	6,3268	b21	4,8212
a12	42,4106	b12	36,5813
a03	17,5546	b03	18,1714
a40	4,1175	b40	1,1241
a31	5,2616	b31	4,4737
a22	-17,2229	b22	-10,2638
a13	-18,8617	b13	-15,0297
a04	-3,8733	b04	-3,9752

A Tabela 8.18 apresenta os pontos de controle com as discrepâncias, onde as colunas representam:

Tabela 8.18 - Pontos de controle utilizados na correção geométrica da imagem orbital.

Número Ponto	Coluna GeoTiff	Linha GeoTiff	Coluna Corresp	Linha Corresp	Discrep Coluna	Discrep Linha	Discrep Result	Resíduo Coluna	Resíduo Linha	Resíduo Result
10011	7866	5977	7870	5979	4	2	4,47	1,16	1,60	1,98
10021	6359	4917	6360	4916	1	-1	1,41	-0,50	-0,29	0,58
10026	5855	4563	5851	4561	-4	-2	4,47	-4,88	-1,30	5,04
10027	5746	4487	5747	4487	1	0	1,00	0,26	0,67	0,72
10029	5698	4453	5700	4453	2	0	2,00	1,32	0,66	1,48
10030	5462	4287	5460	4286	-2	-1	2,24	-2,37	-0,43	2,41
10032	5366	4219	5368	4220	2	1	2,24	1,76	1,53	2,33
10037	5012	3970	5011	3970	-1	0	1,00	-0,82	0,33	0,88
10039	4910	3898	4912	3900	2	2	2,83	2,30	2,27	3,23
10047	4061	3302	4061	3302	0	0	0,00	0,85	-0,18	0,87
10048	4014	3269	4011	3268	-3	-1	3,16	-2,15	-1,19	2,45
10049	3914	3198	3909	3196	-5	-2	5,39	-4,11	-2,16	4,64
10050	3900	3188	3900	3189	0	1	1,00	0,90	0,85	1,23
10053	3564	2968	3564	2969	0	1	1,00	-0,40	-0,01	0,40
10070	3423	2890	3426	2893	3	3	4,24	0,73	0,66	0,99
10075	4004	3267	4006	3269	2	2	2,83	2,58	1,59	3,03
10085	4594	3682	4596	3682	2	0	2,00	2,40	-0,10	2,40
10087	4856	3866	4855	3863	-1	-3	3,16	-0,80	-2,90	3,01
10090	4911	3905	4912	3905	1	0	1,00	1,14	0,13	1,15
10103	6058	4711	6058	4711	0	0	0,00	-1,17	0,70	1,36
10129	7469	6563	7471	6562	2	-1	2,24	-0,26	0,41	0,49
20019	10780	8541	10784	8540	4	-1	4,12	0,06	0,00	0,06
40020	10198	7531	10202	7531	4	0	4,00	-0,27	0,42	0,49
40032	9891	7694	9896	7695	5	1	5,10	0,55	-0,63	0,83
40048	8151	9988	8155	9989	4	1	4,12	-0,08	-0,24	0,25
40049	8144	10009	8149	10011	5	2	5,39	0,94	0,79	1,22
40050	8048	10324	8051	10324	3	0	3,00	-0,82	-0,86	1,19
40077	4721	13222	4726	13220	5	-2	5,39	0,35	-0,24	0,42
40084	3943	14250	3943	14254	0	4	4,00	-0,19	0,15	0,24
40136	215	13158	214	13158	-1	0	1,00	0,00	0,00	0,00
40177	7283	12672	7287	12670	4	-2	4,47	-0,41	-0,07	0,41
40183	7750	11312	7754	11312	4	0	4,00	0,88	0,43	0,98
50022	8394	8018	8396	8019	2	1	2,24	-2,29	0,07	2,29
50033	7049	5494	7054	5492	5	-2	5,39	2,72	-1,56	3,14
50043	7647	4047	7650	4048	3	1	3,16	1,67	0,77	1,84
50051	8315	3116	8317	3117	2	1	2,24	-0,17	-0,78	0,80
50052	8422	3013	8424	3015	2	2	2,83	-0,45	-0,17	0,48
50053	8443	2997	8447	3000	4	3	5,00	1,50	0,74	1,67
50058	8979	2607	8983	2608	4	1	4,12	0,80	-2,79	2,90
50060	9105	2399	9106	2405	1	6	6,08	-2,13	2,24	3,09
50072	9719	1387	9720	1390	1	3	3,16	-0,86	0,66	1,08
50076	9902	1002	9904	1003	2	1	2,24	0,60	-0,42	0,73
50078	9926	665	9929	666	3	1	3,16	0,47	-0,24	0,53
50111	9101	2402	9104	2406	3	4	5,00	-0,13	0,24	0,27
50114	8440	2998	8442	3001	2	3	3,61	-0,49	0,76	0,90
50128	7554	4494	7555	4493	1	-1	1,41	-1,00	-1,61	1,89
50136	8339	4972	8343	4974	4	2	4,47	0,82	-0,47	0,94
50128	7554	4494	7555	4493	1	-1	1,41	-1,42	-1,81	2,30

- **Coluna Geotiff** – Coluna da imagem orbital estimada com os dados de orientação direta das imagens omnidirecionais e os dados de georreferenciamento da imagem orbital;
- **Linha Geotiff** – Linha da imagem orbital estimada da mesma forma da Coluna Geotiff;
- **Coluna Corresp** – Coluna da imagem orbital localizada através do processo de correspondência;
- **Linha Corresp** – Linha da imagem orbital localizada através do processo de correspondência;
- **Discrep Coluna** – Discrepância entre a coluna localizada pelo processo de correspondência e a coluna estimada com os dados de georreferenciamento;
- **Discrep Linha** – Discrepância entre a linha localizada pelo processo de correspondência e a linha estimada com os dados de georreferenciamento;
- **Discrep Result** – É a resultante das discrepâncias;
- **Resíduo Coluna** – Resíduo em coluna do processo de estimação dos parâmetros do modelo utilizado para os pontos de controle;
- **Resíduo Linha** – Resíduo em linha do processo de estimação dos parâmetros;
- **Resíduo Result** – Resultante dos resíduos.

A Figura 8.29 apresenta um gráfico de agulhas com os resíduos do processo de ajustamento para a correção geométrica da imagem orbital através do modelo polinomial de 4º grau.

No gráfico de agulhas, os resíduos foram superdimensionados em 150 vezes para visualizar a direção e magnitude de cada um dos resíduos encontrados e determinar os erros grosseiros e possíveis problemas na modelagem.

Com o gráfico da Figura 8.29 e os dados da Tabela 8.18 foi verificado que na grande maioria dos pontos, os resíduos nos pontos de controle foram absorvidos pelo modelo. Na coluna “Diferença Modelo” da tabela são apresentados os valores de cada um dos pontos de controle que foram absorvidos pelo modelo ajustado. Observou-se que nos pontos em ocorreram grandes resíduos as discrepâncias entre as coordenadas estimadas pelos dados de georreferenciamento da imagem e as coordenadas localizadas com o processo de correspondência não foram corretamente modeladas.

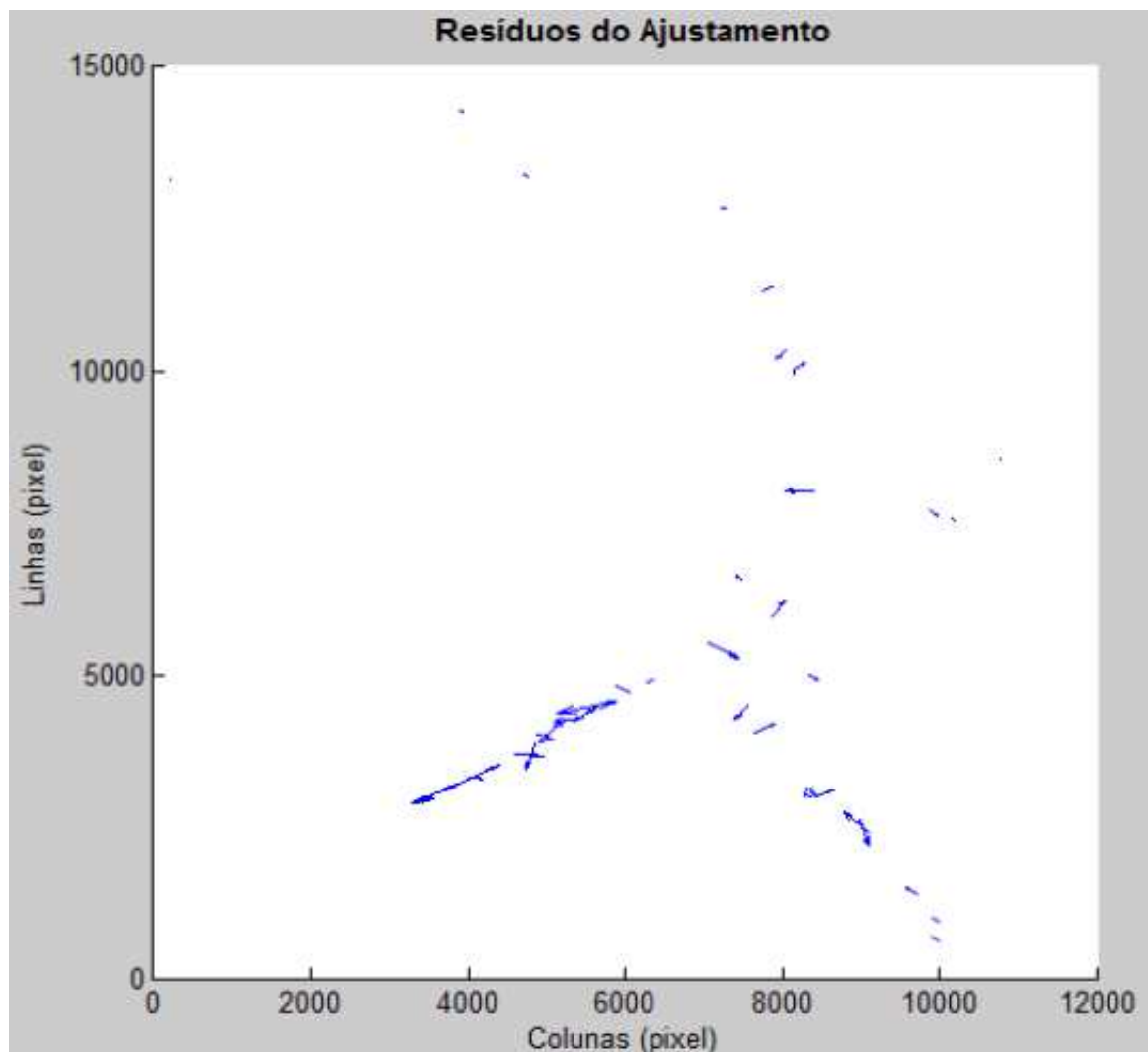


Figura 8.29 - Gráfico de agulhas mostrando os resíduos do ajustamento.

No gráfico de agulhas da Figura 8.29 os vetores apontam na direção das rodovias, o que pode indicar o problema de falsa correspondência, principalmente relacionado aos casos de locais na rodovia onde não há feições distinguíveis exceto as bordas da rodovia. Neste caso não há como determinar precisamente o ponto de correspondência por não haver características no *template* gerado para diferenciar o local da rodovia onde a imagem foi capturada. Esse problema foi detalhado na Figura 6.11 da seção 6.5.1.

Os pontos de verificação utilizados para analisar o modelo ajustado são apresentados na Figura 8.30. A Tabela 8.19 apresenta os dados referentes aos pontos de verificação utilizados para analisar o ajuste do modelo e seus parâmetros.

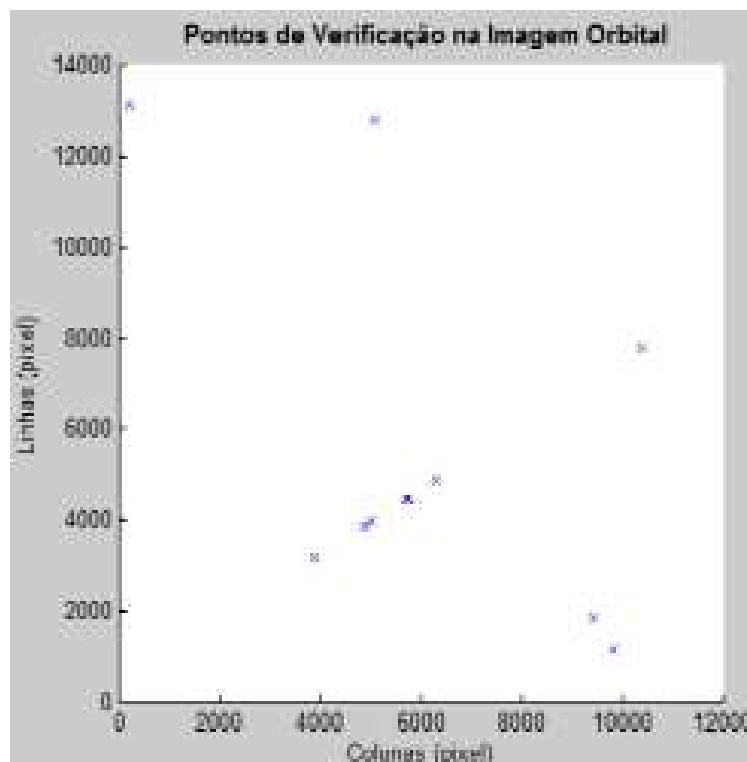


Figura 8.30 - Distribuição dos pontos de verificação.

Os erros resultantes da avaliação dos pontos de verificação são maiores que os resíduos e, em alguns casos, maiores que as discrepâncias existentes antes do processo de ajustamento do modelo. Isso pode ocorrer quando: os pontos não estão bem distribuídos na cena ou georreferenciamento da imagem tem boa qualidade mas o modelo polinomial utilizado está superparametrizado com relação à qualidade do georreferenciamento. Observa-se que a direção das discrepâncias é a mesma das rodovias, o que permite levantar a hipótese de erros de correspondência ao longo da rodovia, como foi mostrado na seção 6.5.1 (Figura 6.11), ou ainda de erros de sincronismo entre o tempo de aquisição da imagem e o registro do evento.

Tabela 8.19 - Pontos de verificação.

Número Ponto	Coluna Corresp	Linha Corresp	Coluna Estimada	Linha Estimada	Erro Coluna	Erro Linha	Erro Result
10023	6285	4864	6284,41	4862,28	0,59	1,72	1,82
10028	5721	4468	5724,71	4470,33	-3,71	-2,33	4,38
10040	4858	3862	4861,64	3863,75	-3,64	-1,75	4,04
10051	3882	3176	3878,15	3174,19	3,85	1,81	4,26
10074	3893	3189	3891,43	3188,42	1,57	0,58	1,67
10092	5000	3967	4999,93	3966,79	0,07	0,21	0,22
10102	5747	4491	5747,80	4492,38	-0,80	-1,38	1,59
40016	10386	7803	10386,75	7804,49	-0,75	-1,49	1,67
40071	5087	12782	5088,68	12778,60	-1,68	3,40	3,79
40151	216	13158	211,94	13159,94	4,06	-1,94	4,50
50068	9442	1853	9439,66	1856,29	2,34	-3,29	4,04
50075	9846	1183	9843,36	1184,73	2,64	-1,73	3,16

Na Figura 8.31 são apresentados visualmente a resultante dos erros nos pontos de verificação, que foram superamostrados em 150 vezes para sua visualização no gráfico que representa a imagem orbital.

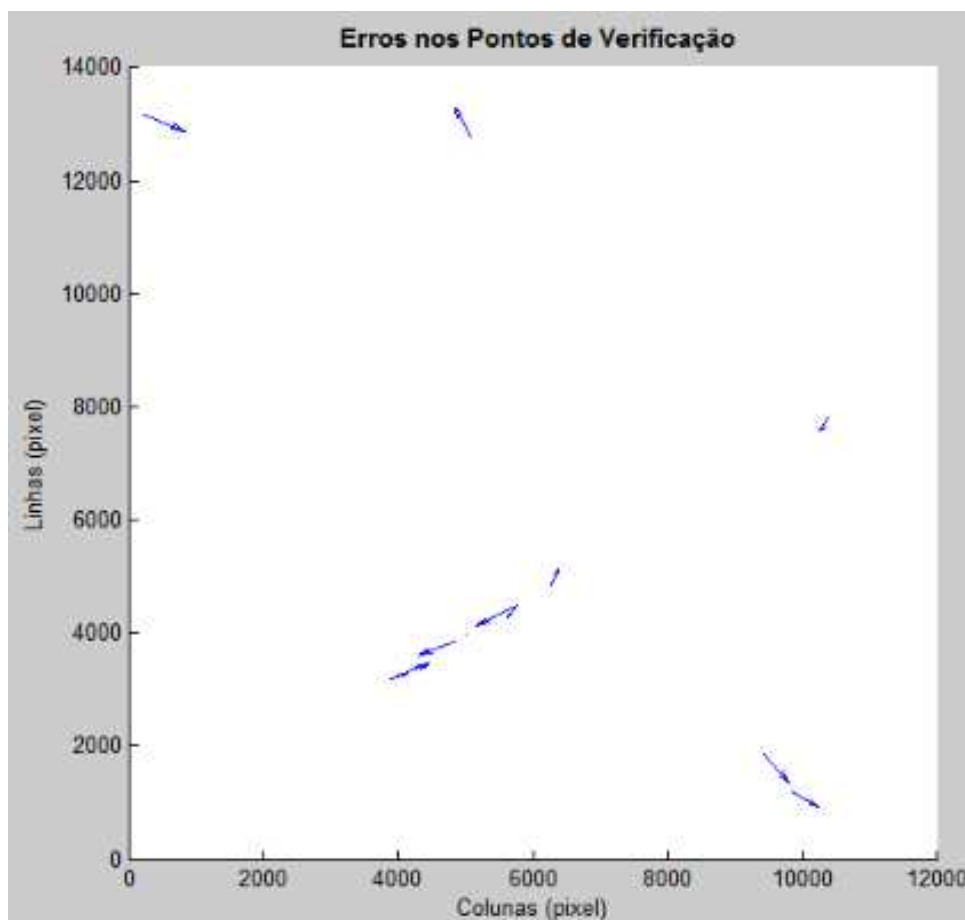


Figura 8.31 - Gráfico de agulhas para os erros resultantes dos pontos de verificação.

9. SOFTWARE DESENVOLVIDO

Para o desenvolvimento do projeto foi verificada a necessidade de uma aplicação computacional capaz de fornecer suporte à metodologia proposta por esse trabalho. A aplicação foi desenvolvida utilizando o MATLAB, um software interativo de alto desempenho para cálculo numérico, que também possui uma linguagem que permite o fácil tratamento de matrizes, imagens e ainda o desenvolvimento de aplicações visuais.

O desenvolvimento da interface com o usuário é suportado pelo aplicativo GUIDE (*the graphical user interface development environment of MATLAB*), que é um ambiente de desenvolvimento de interface gráfica com o usuário, que permite de uma forma simples agrupar e controlar um conjunto de componentes gráficos.

A aplicação oferece suporte às seguintes fases da metodologia proposta:

- Criação de projetos para a orientação e/ou análise de qualidade das imagens orbitais;
- Calibração das imagens omnidirecionais utilizando os vários modelos apresentados, com a importação de informações de pontos de controle e verificação armazenadas em planilhas do Excel;
- Análise e visualização das discrepâncias dos pontos de verificação utilizando um processo de calibração pré-definido;
- Retificação e processamento do conjunto de imagens omnidirecionais incluídas no projeto;
- Associação das imagens omnidirecionais com os dados de GNSS/IMU, previamente processados pelo *Waypoint Inertial Explorer*;
- Localização das imagens omnidirecionais na imagem orbital;
- Exportação, através de arquivo do tipo texto, das coordenadas do espaço imagem e espaço objeto referente a cada um dos pontos de controle;
- Análise de qualidade da imagem orbital.

A janela principal da aplicação (Figura 9.1) apresenta todos os dados do projeto atual, como: os nomes dos arquivos onde estão as coordenadas do terreno, as imagens dos pontos de controle e de verificação para a calibração e retificação das imagens omnidirecionais, o nome do arquivo que contém as coordenadas das imagens omnidirecionais e o nome do arquivo da imagem orbital, como também os dados referentes ao projeto.

As coordenadas dos pontos de controle e verificação, como também as coordenadas das imagens omnidirecionais podem ser acessadas diretamente da janela principal.

principal

Projeto Calibrar e Retificar Dados IMU/GNSS

Pasta Padrão dos Projetos: C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos

Dados do Projeto

Nome do Projeto: prudente Criação: 28-Jan-2014 14:46:12 Atualização: 21-Feb-2014 17:56:48

Arquivo de Configuração: C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente.omn

Pasta: C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente Planilha dos Pontos: C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente

Pontos de Controle - Imagem

C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente\PontosContCheck\ControleImagem.pto Quantidade: 210 Visualizar Pontos

Pontos de Controle - Terreno

C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente\PontosContCheck\ControleTerreno.pto Quantidade: 210 Visualizar Pontos

Pontos de Checagem - Imagem

C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente\PontosContCheck\CheckImagem.pto Quantidade: 21 Visualizar Pontos

Pontos de Checagem - Terreno

C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente\PontosContCheck\CheckTerreno.pto Quantidade: 21 Visualizar Pontos

Arquivo de Eventos

Imagem de Satélite

C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\prudente\ImSatelite\ALPSMN150464045-O1B2G_UN.tif Visualizar Imagem

Figura 9.1 - Janela principal da aplicação com os dados do projeto atual.

9.1. ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA A REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

O processo de estimação dos parâmetros para a reamostragem das imagens omnidirecionais utilizando a aplicação desenvolvida inicia com a importação das coordenadas de terreno dos pontos de controle e verificação, a partir de uma planilha eletrônica .xls. Esse processo é realizado na janela "Importar Planilha", que define o nome dos arquivos onde serão armazenados os dados desses pontos, realiza a separação dos pontos de controle dos pontos de verificação e executa o processo de extração desses dados.

O arquivo .xls para a importação das coordenadas dos pontos de controle e verificação deve conter duas planilhas, com os nomes e estrutura apresentada na Figura 9.2.

	A	B	C	D
1	Numero	X	Y	Tipo
2	101	24,65	30,96	1
3	102	22,24	30,96	1
4	103	19,72	30,96	0
5	104	17,29	30,96	1
6	105	14,78	30,96	1
7	106	12,37	30,96	1

	A	B	C	D
1	Numero	Coluna	Linha	
2	101	1356,50	491,00	
3	102	1410,00	456,00	
4	103	1465,00	426,00	
5	104	1526,50	394,00	
6	105	1595,50	360,50	
7	106	1671,50	330,50	

Figura 9.2 - Estrutura da tabela com os dados de controle e verificação.

Na planilha das coordenadas do terreno deve constar a coluna contendo o número do ponto de controle/verificação, as coordenadas X e Y no sistema local e uma coluna com o tipo:

quando as coordenadas forem de um ponto de controle, o valor deve ser 1, e quando forem de um ponto de verificação a coluna deverá conter o valor 0.

Com a planilha contendo os pontos de controle e verificação é utilizada a interface da Figura 9.3, na qual o operador seleciona o arquivo contendo a planilha a ser importada para a aplicação. Nessa interface é possível definir se os pontos importados serão incorporados aos pontos existentes no projeto, ou os pontos que já estão inseridos no projeto serão sobrepostos.

Figura 9.3 - Interface para a importação dos pontos de controle e verificação utilizados na estimação dos parâmetros do modelo para reamostragem da imagem omnidirecional.

É possível ainda criar um sistema local para as coordenadas do espaço objeto, definindo a coordenada **(E, N)** da origem do sistema e o azimute para rotacionar as coordenadas nesse sistema local criado.

Com os pontos de controle e verificação armazenados no projeto, o processo de calibração e seus parâmetros podem ser definidos utilizando a janela de calibração apresentada na Figura 9.4.

Nessa janela é definido o tipo de modelo utilizado para o processo de calibração, onde os disponíveis são: Distâncias Polares, RFM, Coordenadas Polares e Coordenadas Polares com Correção. Para o modelo de distâncias polares há três formas de modelagem das distâncias, polinomial, exponencial e RFM. O modelo RFM pode ser utilizado com polinômios de terceiro e quarto

graus. Na janela de calibração o operador define o ponto central da imagem digitando as coordenadas de linha e coluna previamente medidas na imagem, essa medição é realizada de forma manual.

Figura 9.4 - Janela de definição dos parâmetros para a calibração.

Com a definição dos modelos e seus parâmetros, o procedimento de calibração pode ser executado e os parâmetros do modelo são ajustados através do método dos mínimos quadrados. Após o processo de calibração, seus dados devem ser armazenados e os resultados podem ser analisados através da janela apresentada na Figura 9.5.

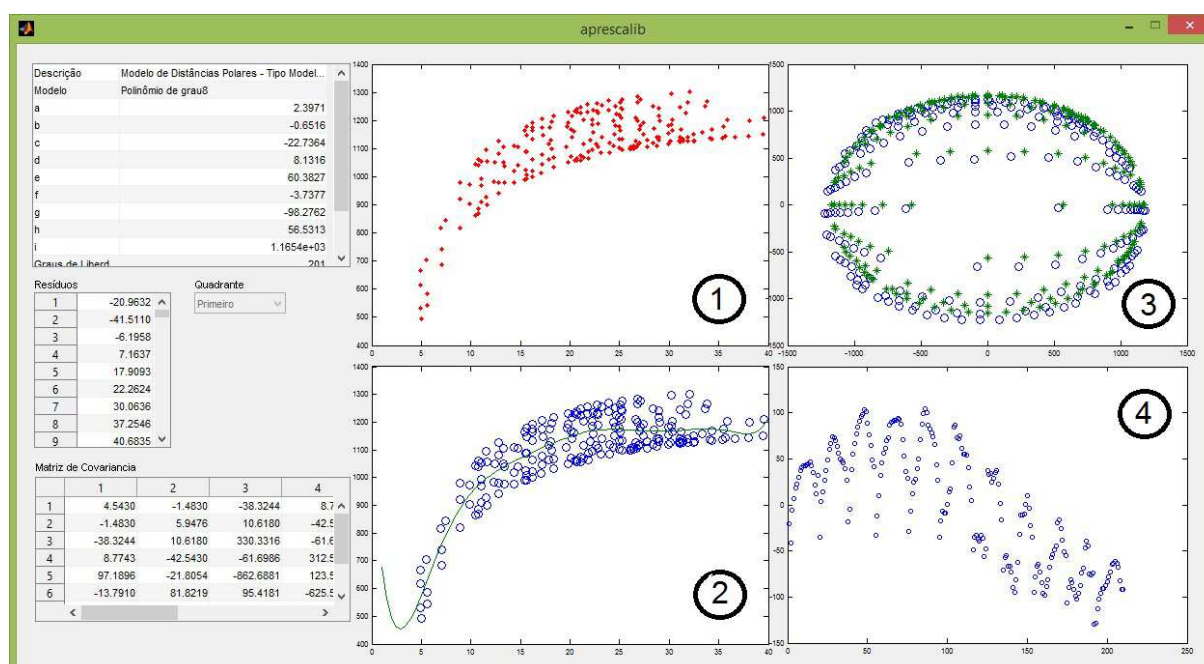


Figura 9.5 - Janela de apresentação dos resultados da calibração.

Nessa janela os resultados são apresentados de forma numérica através das tabelas localizadas no lado esquerdo, onde na primeira tabela é apresentado o modelo utilizado, como também os valores dos parâmetros ajustados, a segunda tabela apresenta os resíduos resultantes do processo de ajustamento e a terceira mostra a matriz de covariância.

Na janela são apresentados quatro gráficos. O gráfico 1 apresenta a distribuição das distâncias (pixels) no espaço imagem em relação às distâncias (metros) no espaço objeto, e o gráfico 2 a distribuição do gráfico 1 com o modelo ajustado. No gráfico 3 são apresentados os pontos medidos na imagem e os pontos estimados pelo modelo ajustado e o gráfico 4 apresenta a dispersão dos resíduos do processo de ajustamento.

9.2. ANÁLISE DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO REFERENTES AO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

Para a análise dos pontos de verificação avalia-se as discrepâncias em pixels entre as coordenadas estimadas com o modelo, e as coordenadas do ponto medido na imagem. O modelo utilizado na análise dos pontos é selecionado pelo operador. Na aplicação desenvolvida, as discrepâncias são apresentadas em relação a linha, coluna e distância entre os pontos medidos e estimados.

A janela de análise dos pontos de verificação apresenta essas discrepâncias de forma numérica através da tabela na área superior e de forma visual, onde o valor medido é representado por um sinal de +, e o ponto estimado por um X, conforme apresentado na Figura 9.6.

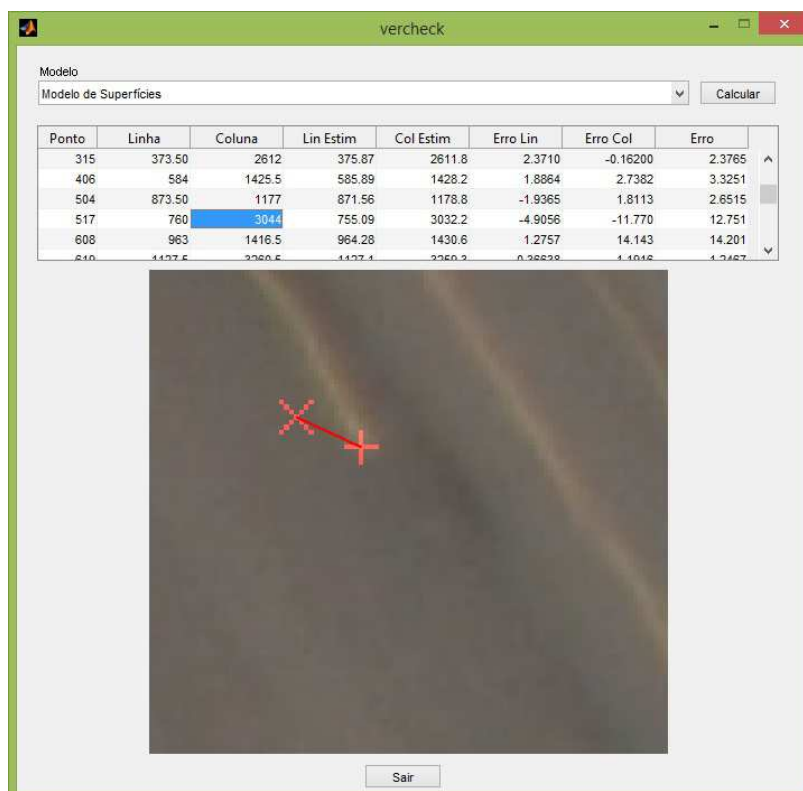


Figura 9.6 - Janela de apresentação de dados da verificação dos pontos.

9.3. REAMOSTRAGEM DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

A aplicação permite reamostrar um conjunto de imagens omnidirecionais que posteriormente serão utilizadas no processo de correspondência; essas imagens podem estar localizadas em diferentes pastas no sistema. Quando incluídas no processo de retificação, elas são copiadas para uma pasta dentro do projeto e nomeadas sequencialmente.

A janela de reamostragem permite ao operador selecionar as imagens e organizá-las até o envio para a pasta do projeto.

Nessa janela o operador define o modelo a ser utilizado no processo de retificação; somente estarão disponíveis os modelos com os parâmetros previamente estimados, e o GSD do pixel da imagem resultante, conforme apresentado pela Figura 9.7. Na área abaixo do modelo a ser utilizado são apresentadas as tarefas realizadas durante todo o processo.

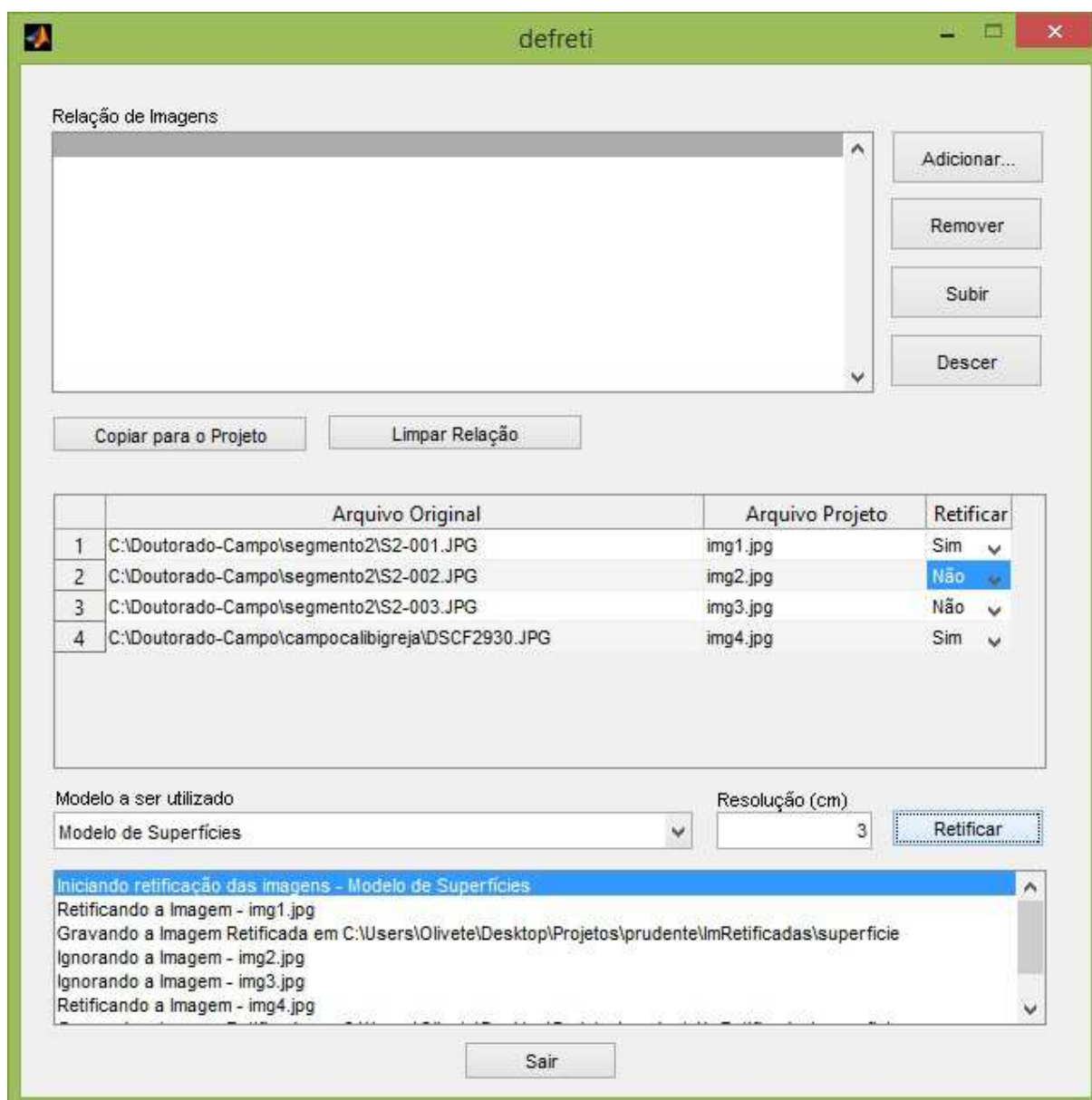


Figura 9.7 - Janela de reamostragem das imagens omnidirecionais

Após o processo de retificação, a aplicação disponibiliza uma janela para a visualização das imagens retificadas (Figura 9.8).

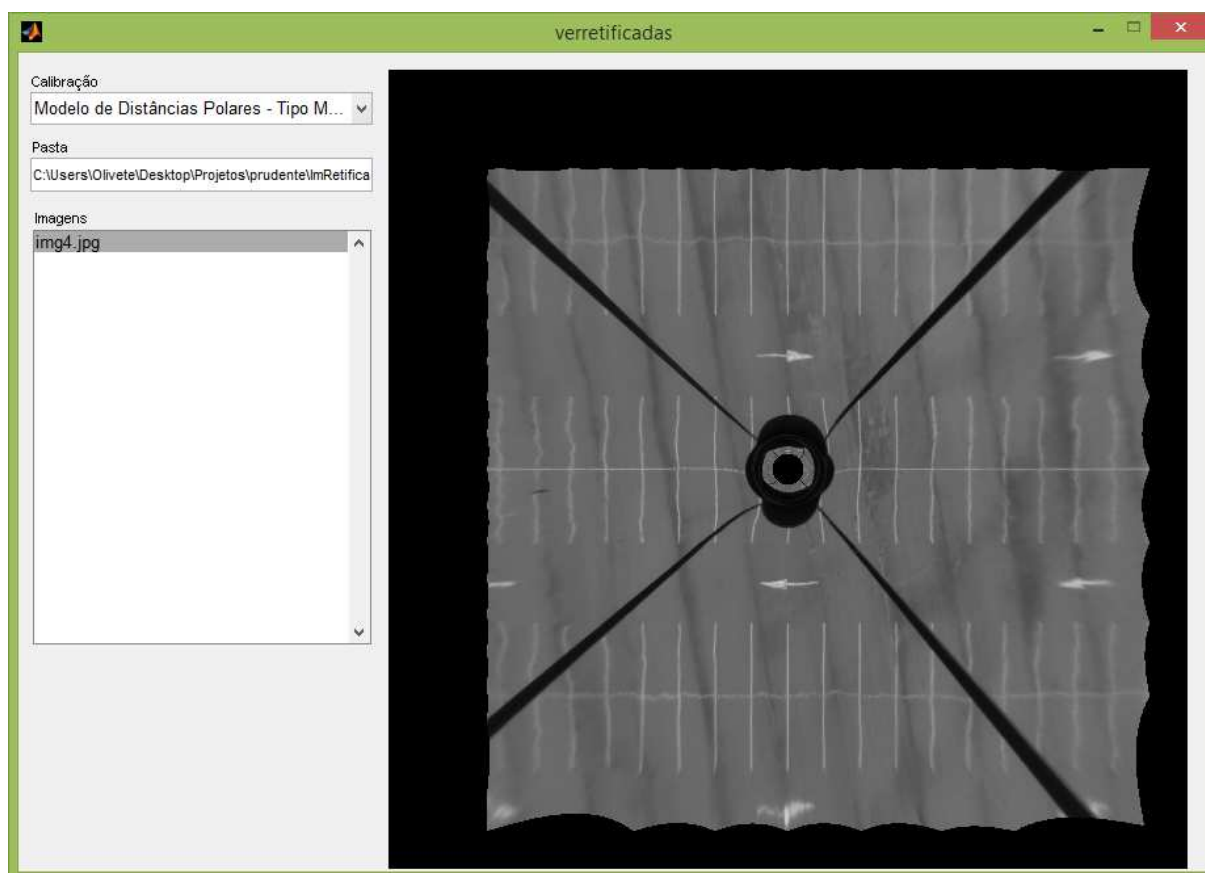


Figura 9.8 - Janela de visualização das imagens reamostradas.

9.4. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA A CONVERSÃO RGB PARA NÍVEIS DE CINZA

Para a estimação dos parâmetros dos modelos para conversão RGB para níveis de cinza é necessário a coleta de várias amostras contendo as 3 componentes do modelo HSI na imagem omnidirecional e seus respectivos níveis de cinza na imagem orbital. Com esse objetivo foi desenvolvida uma interface (Figura 9.9), com a qual é possível selecionar a imagem orbital e a omnidirecional utilizadas na coleta, selecionar pixel ou conjunto de pixels em cada uma das imagens e armazenar esses dados em uma tabela.

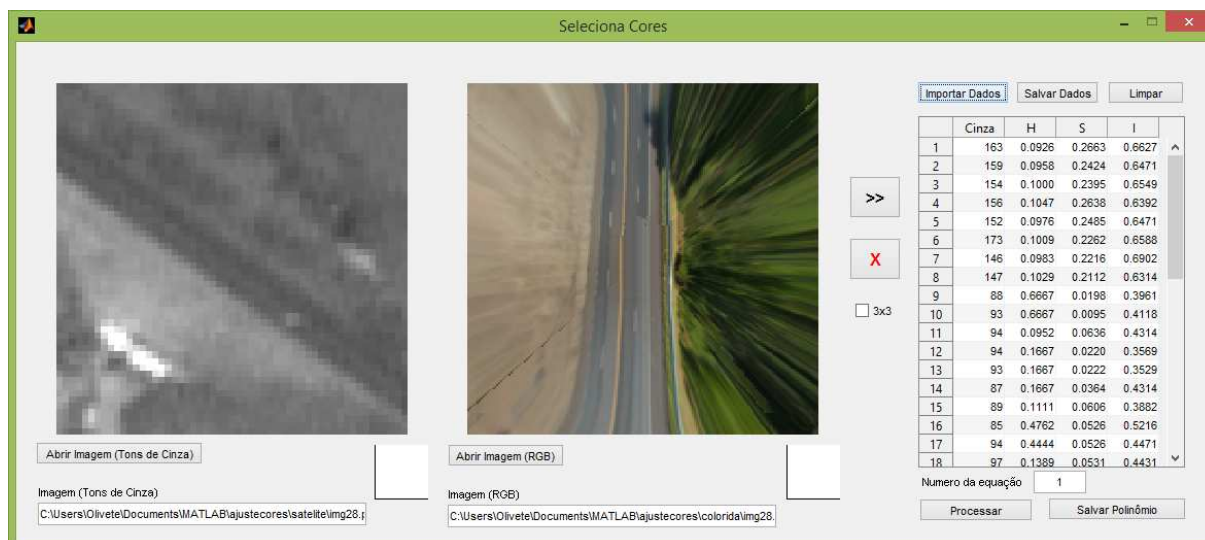


Figura 9.9 - Interface da aplicação desenvolvida para coletar as observações e estimar os parâmetros da transformação em níveis de cinza.

Para a análise dos resultados dos ajustamentos foi desenvolvida outra interface (Figura 9.10) que apresenta cada imagem omnidirecional retificada com seu respectivo recorte da imagem orbital, e várias imagens em níveis de cinza geradas utilizando diferentes polinômios. Através dessa interface é possível analisar visualmente o melhor resultado para um conjunto de imagens.

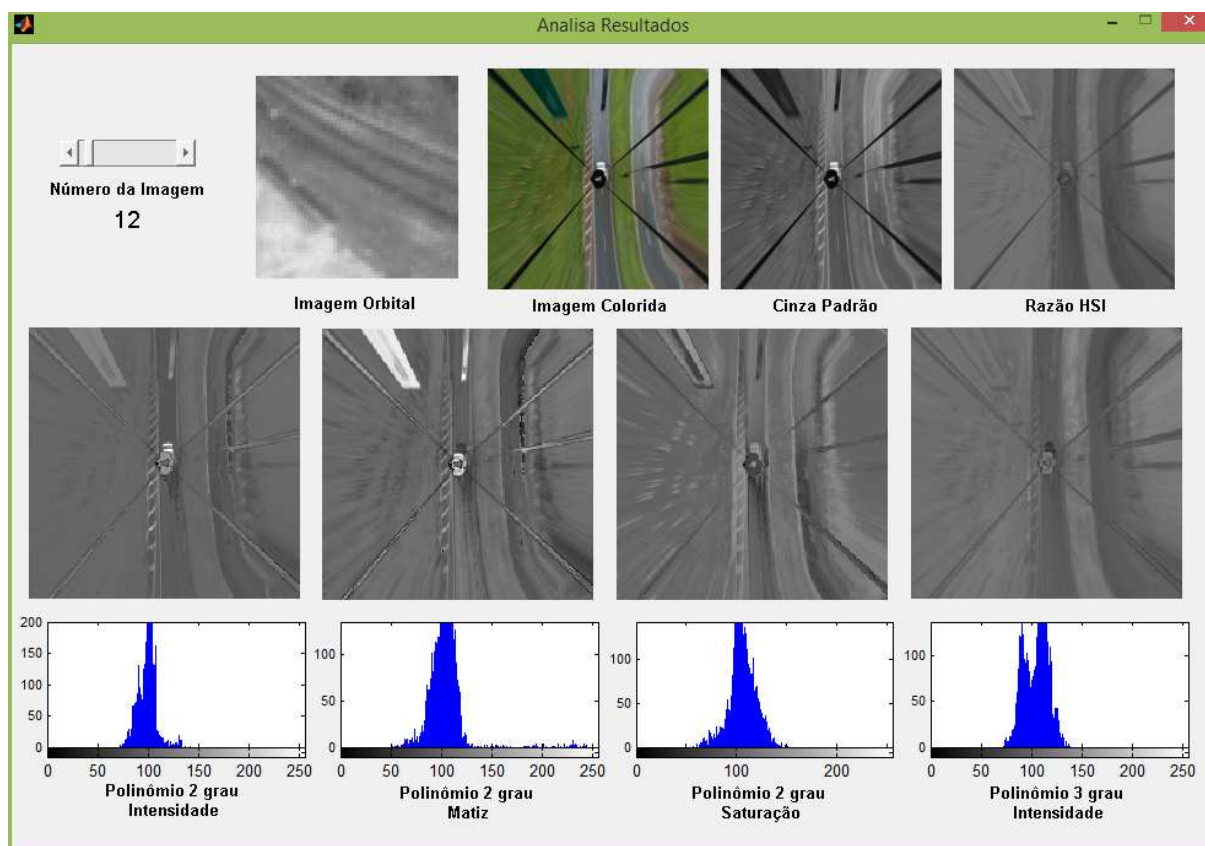


Figura 9.10 - Interface para análise visual das imagens transformadas em níveis de cinza com os polinômios propostos.

9.5. IMPORTAÇÃO DAS COORDENADAS E ÂNGULOS DE ATITUDE DAS IMAGENS OMNIDIRECIONAIS

As coordenadas e ângulos de atitude das imagens omnidirecionais resultantes do processamento dos dados GNSS/INS pelo Waypoint Inertial Explorer podem ser importados para a aplicação através da janela da Figura 9.11, que, após o processamento do arquivo selecionado pelo operador, apresenta todos os dados importados.

The screenshot shows a software window titled 'importaposicaoatitude'. It has a file selection area at the top with a text box for the file path and a 'Selecionar Arquivo' button. Below this is a text box for the file name and location, showing 'C:\Users\Olivete\Desktop\Projetos\AgoraVai5\ArqInertialExplorer.apa'. A large text area displays project details: Project: Segmento5, Program: Inertial Explorer Version 8.30.1007, Profile: UTM, Source: Features/stations(Smoothed TC Combined), ProcessInfo: Segmento03 by Unknown on 10/8/2013 at 16:06:55, Datum: WGS84, (processing datum), Master 1: Name ppte0460, Status ENABLED, Antenna height 0.110 m, to L1-PC (TRM59800.00, MeasDist 0.002 m to mark/ARP), Position -22 07 11.65710, -51 24 30.72251, 431.050 m (WGS84, Ellipsoidal hgt), Remote: Antenna height 0.450 m, to L1-PC (Generic), Map projection info: UTM Zone: 22, SD/Covariance Scaling Settings: [empty]. Below the text area are buttons for 'Processar Arquivo' and 'Limpar Dados'. At the bottom is a table with 11 columns: Número, Hor GPS, Data, Norte (N), Leste (E), Alt (H), DP (N), DP (E), DP (H), Roll, and Pitch. The table contains 11 rows of data. At the very bottom are buttons for 'Apresentar Gráficos' and 'Gravar Processamento'.

Número	Hor GPS	Data	Norte (N)	Leste (E)	Alt (H)	DP (N)	DP (E)	DP (H)	Roll	Pitch
9	18:58:15.63	2/15/2013	7.5467e+06	4.5602e+05	438.8980	0.0060	0.0050	0.0050	0.1444	1
10	18:58:41.11	2/15/2013	7.5469e+06	4.5650e+05	439.9480	0.0060	0.0050	0.0060	0.5473	3
11	18:59:08.90	2/15/2013	7.5472e+06	4.5701e+05	442.1360	0.0070	0.0060	0.0070	0.5492	-0
12	18:59:13.74	2/15/2013	7.5473e+06	4.5710e+05	443.5950	0.0070	0.0060	0.0060	1.0525	0
13	18:59:50.86	2/15/2013	7.5477e+06	4.5774e+05	445.0530	0.0150	0.0140	0.0150	0.7412	3
14	18:59:56.85	2/15/2013	7.5477e+06	4.5784e+05	446.5670	0.0160	0.0140	0.0150	0.2028	3
15	19:00:49.95	2/15/2013	7.5479e+06	4.5757e+05	434.7520	0.0140	0.0130	0.0140	-0.6516	1
16	19:01:03.49	2/15/2013	7.5481e+06	4.5736e+05	436.6630	0.0160	0.0150	0.0170	0.3750	0
17	19:01:21.76	2/15/2013	7.5483e+06	4.5706e+05	436.8540	0.0100	0.0100	0.0120	-0.7034	2
18	19:01:59.83	2/15/2013	7.5486e+06	4.5633e+05	422.8910	0.0080	0.0080	0.0090	-1.4486	1
19	19:02:01.31	2/15/2013	7.5486e+06	4.5630e+05	422.1510	0.0090	0.0080	0.0100	-1.5695	2

Figura 9.11 - Janela de importação dos dados GNSS/INS.

O arquivo do *Waypoint Inertial Explorer* deve ser exportado com os seguintes dados:

1. **Stati** – Número do evento (imagem);
2. **GPSTime** – Horário GPS do momento da aquisição;
3. **Date** – Data da aquisição da foto;
4. **Easting (m)** – Coordenada UTM E;
5. **Northing (m)** – Coordenadas UTM N;
6. **H-Ell (m)** – Altura em relação ao elipsoide nas coordenadas (E, N);
7. **SDEast (m)** – Desvio padrão em relação à coordenada UTM E;
8. **SDNorth (m)** – Desvio padrão em relação à coordenada UTM N;

9. ***SDHeigh (m)*** – Desvio padrão em relação a altura em relação ao elipsoide na coordenada (E,N);

10. ***Pitch (Deg)*** – Ângulo de arfagem do sensor no momento da aquisição da imagem;

11. ***Roll (Deg)*** – Ângulo de rolamento do sensor no momento da aquisição da imagem;

12. ***Heading (Deg)*** – Ângulo de guinada do sensor;

13. ***RollSD (Deg)*** – Desvio padrão em relação ao ângulo de arfagem;

14. ***PitchSD (Deg)*** – Desvio padrão em relação ao ângulo de rolamento;

15. ***HdngSD (Deg)*** – Desvio padrão em relação ao ângulo de guinada.

Após a importação dos dados GNSS/INS é possível ver gráficos estatísticos sobre a distribuição desses dados durante a trajetória realizada. A Figura 9.12 apresenta a interface para a visualização desses dados, onde é possível visualizar separadamente os dados de posicionamento (***e, n, h***) e de atitude (arfagem, rolamento e guinada).

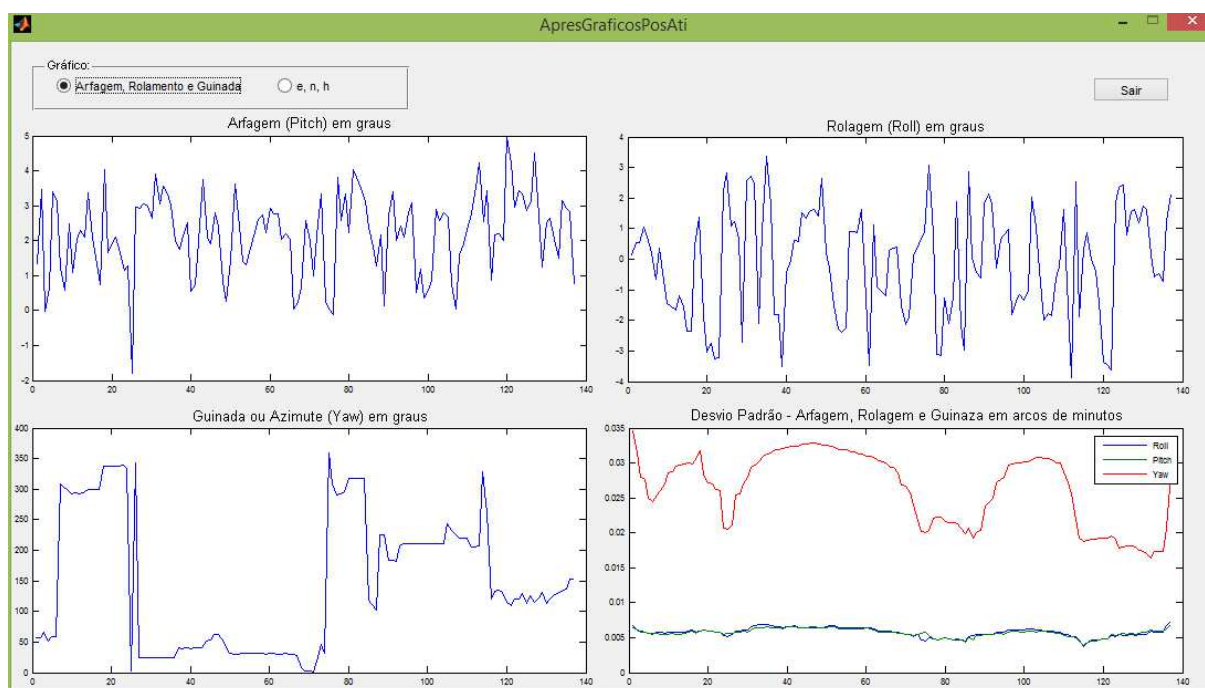


Figura 9.12 - Interface de apresentação dos gráficos referentes aos dados GNSS/INS durante o trajeto realizado.

Na Figura 9.12 a interface está sendo utilizada para a visualização dos dados de atitude dos pontos de controle levantados em campo, apresentando de forma separada cada um dos ângulos de atitude e o desvio padrão desses ângulos.

9.6. VISUALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE ESTIMADOS NA IMAGEM ORBITAL

Com a importação das coordenadas da aquisição das imagens em campo e com os dados de georreferenciamento da imagem orbital é possível estimar as coordenadas desses pontos dentro da imagem orbital.

Para a visualização desses pontos foi desenvolvida uma interface, apresentada na Figura 9.13, com a qual é possível verificar visualmente os erros do processo de georreferenciamento e reamostragem da imagem orbital. Nessa janela há três formas de visualização: a imagem orbital inteira, somente a área onde há pontos de controle e a área de cada um dos pontos de controle.



Figura 9.13 - Janela de visualização dos pontos de controle na imagem georreferenciada.

9.7. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE NA IMAGEM ORBITAL

O processo de localização dos pontos de controle na imagem orbital da aplicação consiste na aplicação de várias técnicas para o ajuste das imagens omnidirecionais detalhadas na metodologia, na determinação das janelas de busca na imagem orbital e a utilização do processo de correspondência com a função de correlação cruzada normalizada.

A interface desenvolvida permite executar um a um dos procedimentos utilizados na preparação das imagens, execução da correspondência, e cálculo e apresentação dos resultados desse processo, essa interface é apresentada na Figura 9.14.

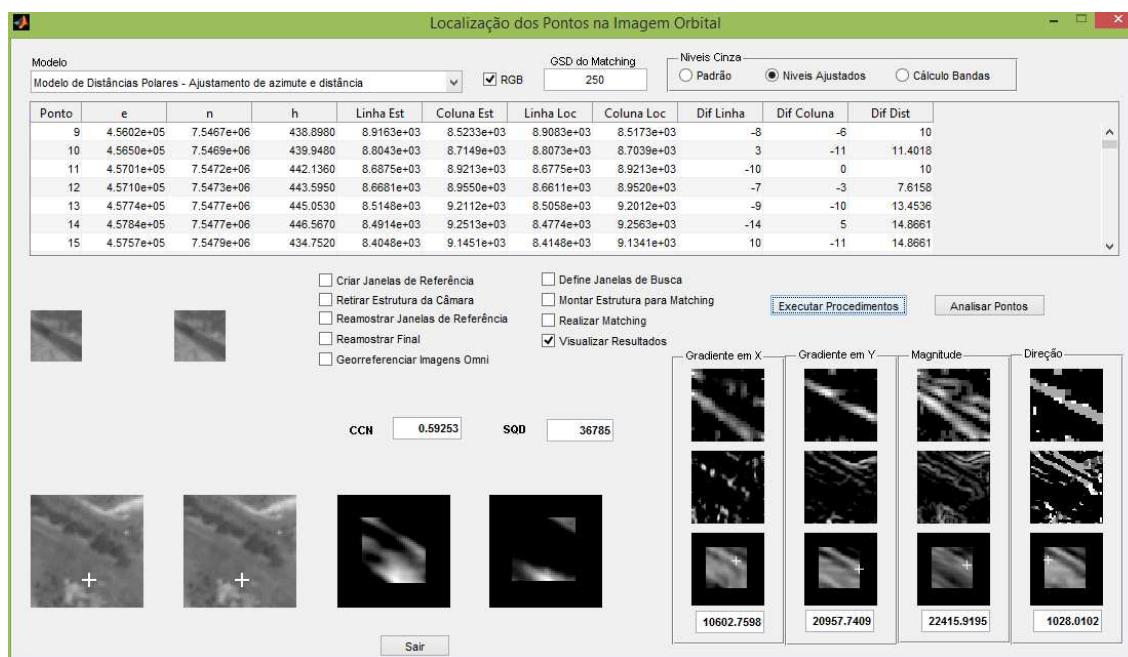


Figura 9.14 - Interface de localização dos pontos na imagem orbital.

A interface da Figura 9.14 permite determinar os parâmetros utilizados durante o processo de localização automática dos pontos de controle, como o modelo utilizado na reamostragem, a forma de conversão para níveis de cinza, o GSD utilizado, e as etapas que serão executadas. Após a execução dos procedimentos é possível visualizar informações numéricas e visuais do processamento para cada um dos pontos de controle.

9.8. ANÁLISE INTERATIVA DA CORRESPONDÊNCIA

Com o objetivo de auxiliar o operador na análise dos resultados do processo de correspondência, foi desenvolvida uma interface, apresentada na Figura 9.15, que permite, além da análise dos resultados, a definição interativa da correspondência entre as imagens omnidirecionais e a imagem orbital.

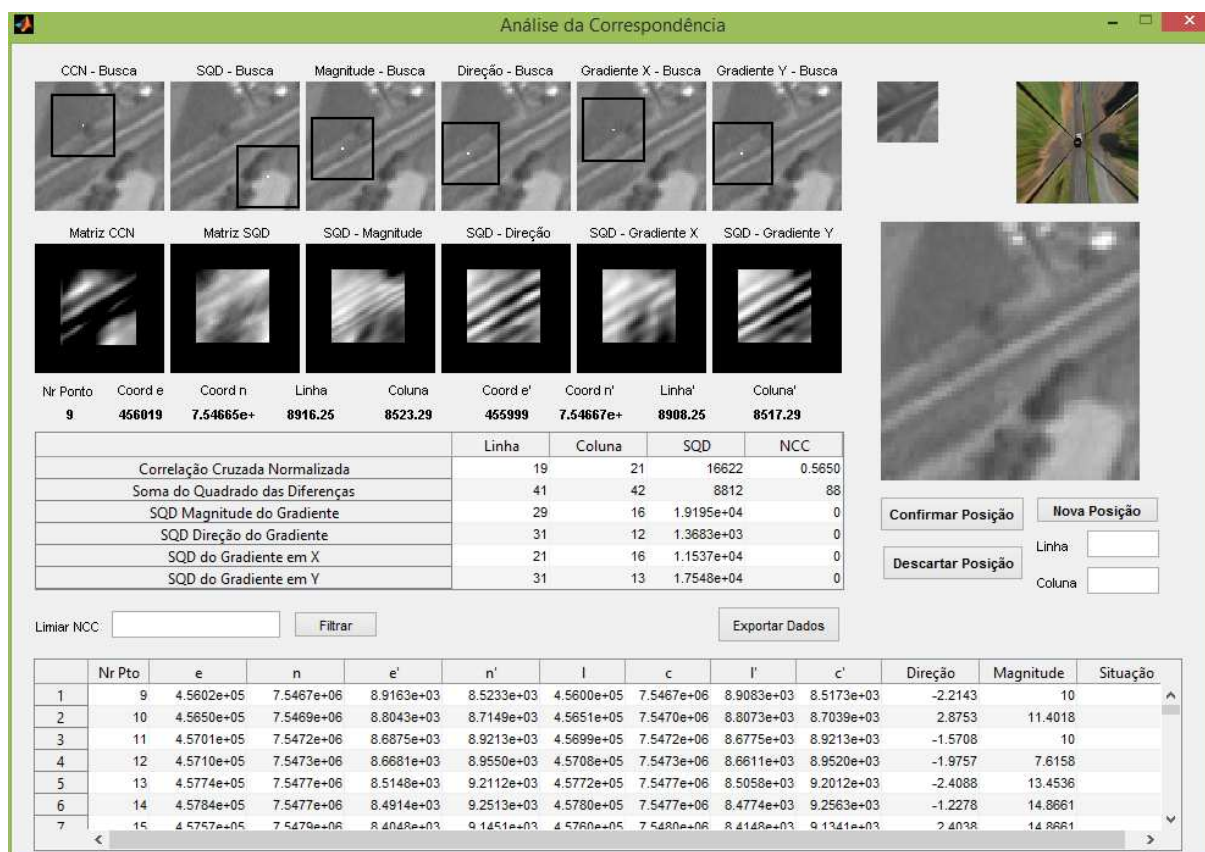


Figura 9.15 - Interface para a análise da correspondência.

Essa interface permite ao operador:

- ver o resultado do processo de correspondência para cada uma das imagens omnidirecionais, apresentando os coeficientes de correlação cruzada e a soma do quadrado da diferença para a imagem em níveis de cinza, como também a soma do quadrado da diferença para a magnitude do gradiente, direção do gradiente, gradiente em x e gradiente em y, de forma numérica e visual;
- selecionar de forma interativa as coordenadas do melhor resultado de correspondência para os pontos;
- selecionar interativamente na janela de busca, a posição referente a uma janela de referência para um determinado ponto;
- confirmar ou descartar cada um dos pontos;
- filtrar os resultados de acordo com um limiar para o coeficiente de correlação cruzada normalizada;
- exportar as informações desses pontos utilizando o formato xls do Microsoft Excel.

9.9. CONTROLE DE QUALIDADE

Esse processo utiliza uma interface (Figura 9.16) para a visualização das discrepâncias entre as coordenadas estimadas com os parâmetros de orientação da imagem orbital e as coordenadas localizadas pelo processo de correspondência, sendo possível navegar entre os pontos selecionados.

Nessa interface são apresentados dados de cada um dos pontos, como também informações estatísticas das discrepâncias.

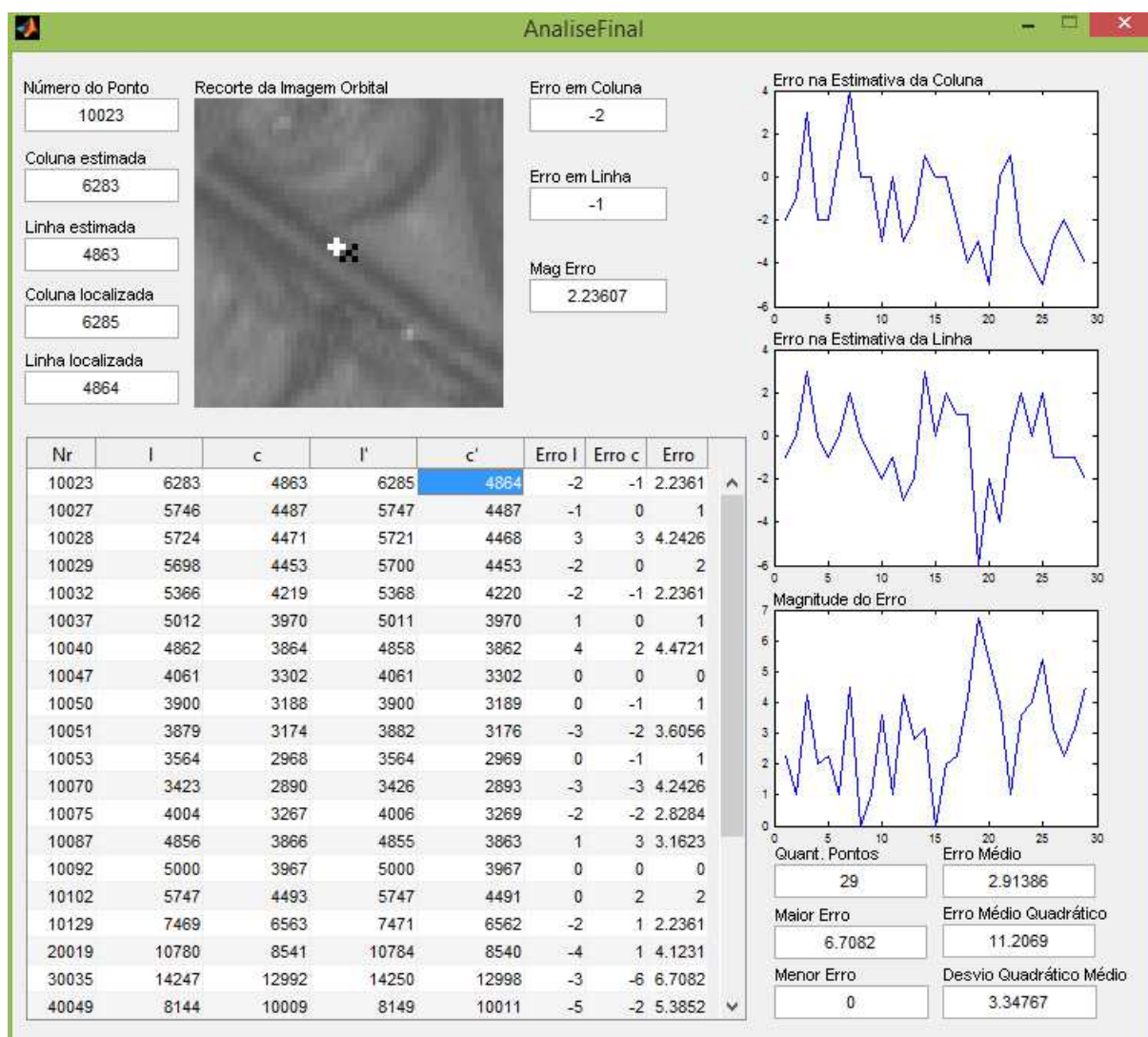


Figura 9.16 - Interface para a análise das discrepâncias.

10. CONCLUSÕES

10.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto envolveu a construção física do sistema da aquisição de imagens omnidirecionais georreferenciadas, a implementação de uma aplicação que fornece suporte para a metodologia proposta, a modelagem empírica de um sensor não convencional e ajustes radiométricos e geométricos nas imagens para a correspondência entre as imagens omnidirecionais e orbitais com escalas diferentes, como também a realização de trabalho em campo para validar a proposta.

A construção física do sensor e sua utilização em ambientes reais e não controlados envolvem eventos que não são possíveis prever ou mensurar com antecedência. Os ambientes controlados e simulações, apesar de servirem como base do estudo, permitem minimizar os problemas dos ambientes reais de trabalho. Devido a esses eventos, o desenvolvimento do projeto envolve a realimentação e revisão de algumas fases para seguir uma nova abordagem ou refazer coletas de dados e experimentos.

Verificou-se experimentalmente que a utilização de imagens omnidirecionais georreferenciadas como controle de campo para a orientação, controle de qualidade e correção geométrica de imagens orbitais é uma alternativa que permite automatizar o processo de medição e localização dos pontos de controle na imagem orbital.

Devido ao uso de tecnologia móvel, o processo de levantamento dos pontos de controle na rodovia tem o tempo substancialmente reduzido com a utilização da abordagem proposta, sendo possível em um período do dia levantar centenas de pontos de uma cena da imagem orbital, e a quantidade de pessoas envolvidas no processo pode ser reduzida a um operador, quando o método de aquisição das imagens for automático através da definição do intervalo entre os disparos. A localização dos pontos correspondentes na imagem pode ser realizada de forma automática.

A metodologia proposta pode automatizar grande parte do processo de orientação de imagens orbitais, onde a etapa que envolve o operador é a determinação dos pontos de controle do campo de calibração para a retificação das imagens orbitais e a indicação das imagens a serem utilizadas no processo.

A utilização de uma modelagem matemática empírica (não rigorosa) pode ser uma alternativa para relacionar o espaço imagem e espaço objeto, principalmente quando não há informações referentes ao relevo da área a ser imageada ou duas imagens dessa área para estimar as coordenadas tridimensionais. É uma alternativa simples e rápida para a retificação das imagens omnidirecionais.

As imagens omnidirecionais geradas a partir de uma simulação foram importantes para verificar a viabilidade do projeto, porém somente as imagens e dados gerados com um experimento em campo foram capazes de confirmar que determinados métodos podem ser utilizados para a

resolução do problema. Na imagem simulada, o modelo que melhor se ajustava aos dados foi o modelo com distâncias polares. Porém, quando esse modelo foi utilizado em uma imagem real de campo com o sistema em funcionamento, verificou-se que essa abordagem não alcança resultados satisfatórios, principalmente porque não há o alinhamento perfeito entre o eixo do cone e o eixo óptico da câmara.

O alinhamento entre o eixo óptico da câmara e o eixo do cone é uma tarefa mecânica não trivial, pois esses eixos não são fisicamente visíveis. Devido ao desalinhamento entre os eixos, a modelagem matemática que relaciona as distâncias polares do espaço objeto e imagem não é eficaz, sendo necessário um modelo que compense este desalinhamento, como o modelo RFM, ou que faça correções nas distâncias de acordo com o ângulo horizontal, como o modelo de coordenadas polares com correções adicionais.

A utilização de modelos não rigorosos não será eficiente quando a área imageada possui grandes desníveis, pois os parâmetros desses modelos são estimados em uma área plana. Grandes ângulos de rolagem e arfagem também causam diferenças de escala na imagem reamostrada, mas estes poderiam ser corrigidos com as atitudes fornecidas pelo sistema de orientação direta.

Os resultados obtidos no processo de correspondência com eliminação dos falsos-positivos (40% das imagens com coeficiente de correlação maior ou igual a 50%), mesmo com as grandes diferenças geométricas e radiométricas entre as imagens, mostraram que a utilização de um modelo polinomial para o ajuste dos níveis de cinza com base nas componentes do modelo de composição de cores HSI é eficiente em imagens com pequeno contraste.

Foi desenvolvida uma aplicação que fornece suporte total à metodologia proposta, tornando todo o processo de orientação e controle de qualidade centralizado em um único software de simples utilização.

10.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento do projeto, verificou-se a existência de alguns assuntos não abordados por esse trabalho, que poderiam melhorar a metodologia proposta, como também contribuir para a verificação e aumento da precisão dos resultados obtidos.

- Avaliar a utilização de outros formatos de espelho, como espelhos esféricos e hiperbólicos, nos quais a modelagem rigorosa se aproxima à modelagem de uma câmara fisheye e espelhos planos;
- Realizar a orientação de imagens orbitais ALOS/PRISM com a utilização de um modelo rigoroso com dados de órbita, visando a validação da metodologia proposta em uma imagem orbital bruta apenas com correções radiométricas;
- Desenvolver um algoritmo de pré-análise das cenas retificadas com o objetivo de detectar e descartar automaticamente *templates* que não são distinguíveis, como

aqueles que apresentam apenas bordas em uma mesma direção, comum em imagens de rodovias;

- Como opção, ao invés de descartar os *templates* que possuam apenas bordas, utilizar feições retas na orientação e correção de imagens orbitais, considerando a existência de grande quantidade de correspondências onde não se pode afirmar com exatidão a posição do ponto na rodovia, devido à falta de características na janela de busca para identificar o ponto;
- Fazer a correlação entre as imagens através de perfis radiométricos extraídos das imagens omnidirecionais;
- Utilizar 2 ou mais sistemas omnidirecionais embarcados em um mesmo veículo, com o objetivo de se extrair coordenadas tridimensionais, formando um modelo digital das áreas imageadas.
- Avaliar a metodologia proposta com imagens orbitais de maior resolução espacial e com imagens multiespectrais, visando sua utilização em produtos de maior escala;
- Adequar o modelo de ajuste dos níveis de cinza para a correspondência entre imagens coloridas e imagens infravermelhas;
- Implementar um sistema de imageamento de baixo custo construído com a utilização de receptores GPS e unidades inerciais mais simples e de menor precisão, e avaliar sua utilização na resolução do problema proposto por esse trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AZZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Symposium on Close-range Photogrammetry, 1971. *Anais...*, p.1–18, 1971.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba - PR: SBEE, 1998.

BAKER, S.; NAYAR S. K. A Theory of Single-Viewpoint Catadioptric Image Formation. *International Journal of Computer Vision*, v. 35, n. 2, p. 175-196, 1999.

BARBOSA, R. L.; GALLIS, R. B. A.; SILVA, J. F. C.; MENEGUETTE JÚNIOR, M. A computação do fluxo óptico em imagens obtidas por um sistema móvel de mapeamento terrestre. *RBC - Revista Brasileira de Cartografia*, No 57/02, 2005.

BARDSLEY, D.; LI, B. *3D Reconstruction Using the Direct Linear Transform with a Gabor Wavelet Based Correspondence Measure*. Technical Report. Cambridge. United Kingdom, 2007.

BERVEGLIERI, A.; TOMMASELLI, A. M. G. Localização automática de pontos de controle utilizando correspondência por mínimos quadrados. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p.1945–1952.

BRASIL. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. *Normas Técnicas da Cartografia Nacional*. Brasília, Diário Oficial da União, 1984.

BRASSART, E.; DELAHOCHÉ, L.; CAUCHOIS, C.; DROCOURT, C.; PEGARD, C.; MOUADDIB, E. M. Experimental Results got with the Omnidirectional Vision Sensor: Syclop. In: IEEE Workshop on Omnidirectional Vision 2000, Hilton Head Island, South Carolina. *Proceedings...* Hilton Head Island: IEEE, 2000. p. 145-152.

BURBRIDGE, C.; NEHMZOW, U.; CONDELL, J. Omnidirectional Projections with Cone Mirror and Single Mirror Stereo. In: The 8th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras, 2008, Marseille. *Proceedings...*, Marseille, France, 2008.

CAUCHOIS, C.; BRASSART, E.; DROCOURT, C.; VASSEUR, P. Calibration of the Omnidirectional Vision Sensor: SYCLOP. In: IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1999, Detroit. *Proceedings...* Detroit: IEEE, 1999. p. 1287-1292.

COELHO, A. L.; BARROS, R. S. DE; OLIVEIRA, L. F. DE; MELO, M. F.; CORREIA, J. D. Avaliação geométrica de imagens ALOS/PRISM níveis 1B2G e 1B2R ortorretificada - estudo de caso: Itaguaí-RJ. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, Brasil. *Anais...* Natal: INPE, 2009, v. 2, p.1731–1738.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. In: ISPRS, 2000, Amsterdam. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam: ISPRS, 2000. v. XXXIII, n. B3, p. 198-205.

DAL POZ, A. P.; SCALCO, J. C. Orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. *Boletim em Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 295 – 313, 2006.

DAL POZ, A. P.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação absoluta automática usando feições retas como controle de campo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 5, p. 27-40, 1999.

DREWNIOK, C.; ROHR, K. Automatic exterior orientation of aerial images in urban environments. In: ISPRS, 1996. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Cidade: ISPRS, 1996. v. 31, n. B3, p.146-152.

GALO, M. *Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo*. 2003. 262 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

GALO, M.; CAMARGO, P. D. O. Utilização do gps no controle de qualidade de cartas. In: COBRAC – 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 1994, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 1994. p. 41–48.

GAUGLITZ, S.; HÖLLERER, T.; TURK, M. Evaluation of Interest Point Detectors and Feature Descriptors for Visual Tracking. *International Journal of Computer Vision*, v. 94, n. 3, p. 335–360, 2011.

GIANINETTO, M.; SCAIONI, M. Automated geometric correction of high-resolution pushbroom satellite data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 74, n. 1, p. 107–116, 2008.

GONZALEZ, R. G.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 3 ed. Prentice Hall, 2007.

GRASSI Jr, V.; OKAMOTO Jr, J. Development of an omnidirectional vision system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 28, n. 1, p. 58-68, Mar. 2006.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

GROVES, P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Boston: Artech House, 2008.

GÜLCH, E. Automatic control point measurement. *Photogrammetric Week '95*. Fritsch, D.; Hobbie D. (eds), Heidelberg: Wichmann Verlag, 1995, p. 185-196.

GUPTILL, S. C.; MORRISON, J. L. (Ed.). *Elements of Spatial Data Quality*. International Cartographic Association. Oxford: Elsevier Science, 1997.

HAGGRÉN, H.; HYYPPÄ H.; JOKINEN, O.; KUKKO, A.; NUIKKA M.; PITKÄNEN, T.; PÖNTINEN, P.; RÖNNHOLM, P. Photogrammetric application of spherical imaging. In: Panoramic Photogrammetry Workshop, 2004, Dresden. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Dresden: ISPRS, 2004. v. XXXIV, n. 5/W16.

HU, Y.; TAO, V.; CROITORU, A. Understanding the Rational Function Model: Methods and Applications. In: ISPRS, 2004, Istanbul. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Istanbul: ISPRS, 2004. v. XXXV, n. B4, p. 663–668.

JAXA - JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. *Calibration Result of JAXA standard products* (As of Sep. 6, 2011). Sep. 2011. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/en/hatoyama/satellite/data_tekyo_setsume/alos_hyouka_e.html>. Acesso em: 23/1/2013.

JEKELI, C. *Geometric reference systems in geodesy*. Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences. Ohio State University, July, 2006.

KANNALA, J.; BRANDT S. A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-Angle, and FishEye Lenses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 28, n. 8, p. 1335-1340, 2006.

KIM, T.; DOWMAN, I. Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. *The Photogrammetric Record*, v. 21, n. 114, p. 110–123, 2006.

KRAUS, K. *Photogrammetry: geometry from images and lasers scans*. 2nd ed. Berlin: de Gruyter, 2007.

LANGLEY, R. B. RTK GPS. *GPS World*, v. 9, n. 9, p. 70-76, Sep. 1998

LIN, S; BAJCSY, R. Single-viewpoint, catadioptric cone mirror omnidirectional imaging theory and analysis. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science & Vision*, v. 23, n. 12, p. 2997-3015, 2006.

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

LUBER, A., AND REULKE, R. A unified calibration approach for generic cameras. In: ISPRS, 2010, Newcastle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Newcastle: ISPRS, 2010. v. XXXVIII, n. B5, p. 399-404.

MALMSTRÖM, H. Measuring ground control points for satellite image rectification. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Proceedings...* v. 11, p.127–135, 1986.

MARCATO JR, J. *Fototriangulação em bloco de imagens orbitais com modelos rigorosos baseados em pontos e retas*. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MARCATO JR., J. *Modelagem fotogramétrica e calibração de um sistema de visão omnidirecional*. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MARCATO JR, J.; HASEGAWA, J. K.; TOMMASELLI, A. M. G. Análise comparativa entre modelos rigorosos e empíricos na orientação de imagens orbitais. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2011, Curitiba. *Anais...*, Curitiba: INPE, 2011. p. 2360–2367.

MARCATO JR, J.; TOMMASELLI, A. M. G.; OLIVEIRA, R. A.; MEDEIROS, N. G.; MARCATO, V. J. Orientação de imagens CBERS-2B usando o modelo rigoroso de colinearidade com dados orbitais. *Boletim de Ciências Geodésicas, seção de Artigos*, v. 17, p. 401–416, 2011.

MARQUES, O. *Practical Image and Video Processing Using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2011, 696p.

MEDEIROS, N. G.; TOMMASELLI, A. M. G. Um modelo para a orientação de imagens orbitais baseado em feições retas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.12, n. 2, p. 175-194, 2006.

- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.
- MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P. Digital Image Georeferencing from a Multiple Camera System by GPS/INS. *ISPRS – Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 56, n. 1, jun. 2001.
- NALWA, V. A *True Omnidirectional Viewer*. Technical Report. Bell Laboratories. Homdel, 1996.
- REIS, T. T. *Estudo e Implementação de Técnicas de Sincronismo de Dispositivos para o Georreferenciamento de Imagens Digitais*. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- RICHARDS, J. A. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- RODEHORST, V.; KOSCHAN, A. Comparison and Evaluation of Feature Point Detectors. In: 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days. *Anais...*, . Berlin: University of Berlin, 2006.
- RODRIGUES, T. L.; ANTUNES, M. A. H.; FOSSE, J. M. Avaliação da ortorectificação da imagem do sensor HRC do CBERS 2B utilizando modelo de funções racionais. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. *Anais...* Natal: INPE, 2009. p. 2139–2146.
- RUY, R. S. *Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmeras digitais de médio formato*. 2008. 239p. Tese (doutorado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; MARCATO JUNIOR, J.; REIS, T. T. Fototriangulação com parâmetros adicionais de um bloco de imagens coletadas com uma câmara digital de médio formato e dados de georreferenciamento direto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. *Anais...* Natal: INPE, 2009.
- SANTOS FILHO, R. B.; GIN, R. B. B.; BIANCHI, R. A. C. Sistema de visão omnidirecional para o monitoramento de descargas atmosféricas. Em: VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2005, São Luís. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente / II Latin American Robotics Symposium*. São Luís: UFMA, 2005.
- SAWHNEY, H.S.; KUMAR, R. True multi-image alignment and its application to mosaicing and lens distortion correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 21, n. 3, p. 235–246, 1999.
- SCHENK, T. *Digital Photogrammetry - Volume I*. TerraScience, Laurelville, Ohio, 1999, 428p.
- SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P. O.; GUARDIA, M. C.; REISS, M. L. L.; SILVA, R. A. C.; GALLIS, R. B. A.; OLIVEIRA, R. A. Mapeamento de ruas com um sistema móvel de mapeamento digital. *Revista Brasileira de Cartografia*, No 53, pp. 82-91, Dez. 2001.
- SILVEIRA, M. T.; FEITOSA, R. Q.; BRITO, J. L. N. E S.; JACOBSEN, K. Correspondência eficiente de descritores SIFT para construção de mapas densos de pontos homólogos em imagens de sensoriamento remoto. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.17, n.1, p. 130–160, 2011. Curitiba, PR, Brasil.
- SOUZA, J. M. DE; LOCH, R. E. N. Como melhorar a qualidade geométrica do modelo digital de elevação da Shuttle Radar Topography Mission, SRTM-3. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: INPE, 2007. p.1369–1376

SPACEK, L. A Catadioptric Sensor with Multiple Viewpoints. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, v. 51, n. 1, p. 3-15, 2005.

STURM, P., RAMALINGAM, S., TARDIF, J., GASPARINI, S., AND BARRETO, J. Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision. *Computer Graphics and Vision*, v. 6, n. 1-2, p. 1-183, 2010.

SWAMINATHAN, R.; NAYAR, S.K. *Polycameras: Camera Clusters for Wide Angle Imaging*. Technical Report, Department of Computer Science, Columbia University, 1999.

TAO, V.; HU, Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 67, n. 12, p. 1347–1357, 2001.

TOMMASELLI, A. M. G.; BERVEGLIERI, A.; MARCATO JUNIOR, J.; OLIVETE, A. L. On the generation of ground control scenes with mobile platforms. In: The 8th International Symposium on Mobile Mapping Technology, 2013, Tainan. *Proceedings of ISPRS*. Tainan , 2013.

TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S.; REIS, T. T.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. O.; MAGNA JUNIOR, J. P. Sistema aerotransportado leve de aquisição de imagens digitais – SAAP. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, abr. 2007.

YAGI, Y. Omnidirectional sensing and its applications. *IEICE Transactions on Information and Systems*. v. E82-D, n. 3, p. 568-579, 1999.