


ROBERTO DA SILVA RUY



**GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE
ESTEREOMODELOS A PARTIR DE
IMAGENS DIGITAIS
GEORREFERENCIADAS**

Presidente Prudente

2004

ROBERTO DA SILVA RUY

**GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE
ESTEREOMODELOS A PARTIR DE
IMAGENS DIGITAIS
GEORREFERENCIADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Presidente Prudente

2004

R951g

Ruy, Roberto da Silva.

Geração automática de estereomodelos a partir de imagens digitais georreferenciadas / Roberto da Silva Ruy.

– Presidente Prudente : [s.n.], 2004

133 f. : il.

Dissertação (mestrado). - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

1. Fotogrametria digital. 2. Georreferenciadas direto. 3. Integração de sensores. 4. Coplanaridade. I. Ruy, Roberto da Silva. II. Título.

CDD (18.ed.) 623.72

DADOS CURRICULARES

Roberto da Silva Ruy

Nascimento: 20/01/1980 – Rio de Janeiro – RJ

Filiação: Claudinei Ruy
Ana Maria Pimentel da Silva Ruy

1997-01 Curso de Graduação
Bacharelado em Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

2002-04 Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

DEDICATÓRIA

*Á meus pais, Claudinei e Ana Maria, ao
meu irmão Eduardo e a minha noiva
Vivian.*

AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar os sinceros agradecimentos a todos que colaboraram à concretização desta pesquisa, e em particular:

Ao professor Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela orientação precisa e atenciosa e, acima de tudo, pela amizade, confiança e respeito que nos une nestes anos de convivência.

Ao professor João Fernando Custódio da Silva, pelo incentivo e por interceder de forma atenciosa na disponibilização de imagens e dados de orientação direta (GPS+INS); ao Dr. Charles K. Toth, do *Center for Mapping* (Ohio State University), que forneceu tais imagens georreferenciadas; aos professores Mauricio Galo e Aluir Porfírio Dal Poz, pelas discussões teóricas que enriqueceram o conteúdo deste trabalho.

Aos meus “irmãos” André Tadashi Matsuoka, Christiane Nogueira de Carvalho Kokubum e Mário Luiz Lopes Reiss, pelas consideráveis colaborações ao trabalho e, principalmente, pelo companheirismo e eterna amizade.

Ao amigo Laysson Guillen Albuquerque, pelos auxílios prestados à realização dos experimentos, e a Daniel Rodrigues dos Santos e Elaine Reis Costa, que contribuíram atenciosamente com implementações computacionais na área de correlação de imagens.

Aos amigos e colegas da sala de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, em particular a Giovane Maia do Vale e Edinéia Aparecida dos Santos, pelas conversas e debates.

Aos funcionários da Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, especialmente à Graça, Ítalo e Geraldo, pelos auxílios prestados.

A CAPES, pela concessão de uma bolsa de estudo; a FAPESP pelos equipamentos e softwares financiados.

EPÍGRAFE

*"Sonho que se sonha só, é só um
sonho que se sonha só, mas sonho
que se sonha junto é realidade..."*

Raul Seixas

RESUMO

Com a disponibilidade de câmaras digitais, dados de posicionamento por satélites (GPS) e sistemas inerciais (INS), tornaram-se possíveis novas aplicações que envolvem a obtenção de produtos cartográficos em quase tempo real (após o processamento dos dados coletados em vôo), como o monitoramento de desastres ambientais. Tais aplicações necessitam de informações georreferenciadas com características de rapidez e confiabilidade, que podem ser obtidas pela técnica fotogramétrica digital, apoiada pelos sensores que fornecem a orientação direta da câmara. Em geral, os parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação utilizados para mapeamento não possuem a acurácia necessária para eliminar totalmente a paralaxe vertical do modelo e, por conseguinte, a visualização estereoscópica da cena fica prejudicada. Para resolver este problema, propôs-se uma metodologia que é baseada na compatibilização dos parâmetros de orientação direta (GPS + INS), mediante um modelo de coplanaridade modificado, num ajustamento pelo método dos Mínimos Quadrados. Os valores observados correspondem a pontos homólogos medidos automaticamente no modelo por técnicas de correlação por área. Após o refinamento dos parâmetros de orientação exterior (OE), as imagens são normalizadas por meio de uma reamostragem epipolar, com intuito de proporcionar uma melhor visualização estereoscópica da cena e auxiliar o processo de geração automática de Modelos Digitais de Terreno. Neste sentido, módulos computacionais foram desenvolvidos em linguagem C++ para a geração totalmente automática de estereomodelos em quase tempo real. Experimentos com dados simulados e reais foram conduzidos, na ordem de verificar a eficácia da metodologia com respeito a eliminação da paralaxe vertical do modelo e a acurácia das coordenadas no espaço objeto calculadas por intersecção. Estes experimentos seguem apresentados e discutidos neste trabalho, mostrando que a metodologia desenvolvida é eficaz para a geração automática de estereomodelos.

Palavras chave: Fotogrametria Digital, Georreferenciamento Direto, Restrição de Coplanaridade.

ABSTRACT

With the availability of digital cameras, satellite positioning systems (GPS) and inertial navigation systems (INS), new applications such as fast cartography and real time environmental monitoring became feasible. Such applications require georeferenced information with characteristics of speed and reliability that can be obtained by digital photogrammetry, using additional data from sensors of direct orientation. Generally, the parameters supplied by the sensors are under the required accuracy to eliminate the vertical parallax in the model. To solve this problem, the methodology proposed in this project is based on the reprocessing of the parameters of orientation supplied by the sensors, using a modified coplanarity model. The observations are the images coordinates automatically measured in each image using an area-based correspondence method. After the EO parameters refinement, using the modified coplanarity model, the images are normalized through an epipolar resampling, in order to provide a comfortable stereoscopic visualization of the model, since vertical parallax is eliminated, and to facilitate the process of automatic Digital Terrain Model generation. In order to test the proposed approach, computational programs were developed in C++ language, enabling the full automatic generation of estereomodelos in almost real time. Experiments with simulated and real data were performed, in order to verify the performance of the method with respect to y-parallax elimination and accuracy of reconstructed object space coordinates. These experiments are presented and discussed showing the effectiveness of the proposed approach for automatic generation of stereo models.

Key words: Digital Photogrammetry, Direct-Georeferencing , Coplanarity Constrains.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 19 |
| 1.2 OBJETIVOS | 21 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 21 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 21 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 22 |

CAPÍTULO II

| | |
|---|-----------|
| IMAGENS DIGITAIS E CORRESPONDÊNCIA DE ENTIDADES CONJUGADAS | 24 |
| 2.1 IMAGENS DIGITAIS | 24 |
| 2.1.1 Conceito | 24 |
| 2.1.2 Sistema de Coordenadas de uma Imagem Digital | 26 |
| 2.1.3 Câmaras Digitais | 27 |
| 2.2 CORRESPONDÊNCIA DE ENTIDADES | 32 |
| 2.2.1 Considerações Iniciais | 32 |
| 2.2.2 Distorções Geométricas das Entidades Correspondentes | 33 |
| 2.2.3 Soluções para os Problemas Fundamentais na Correspondência de Imagens | 33 |
| 2.2.3.1 Redução do espaço de busca | 33 |
| 2.2.3.1.1 Linhas epipolares | 34 |
| 2.2.3.2 Unicidade da entidade conjugada | 38 |
| 2.2.4 Método de Correspondência de entidades baseado em Área | 41 |
| 2.2.4.1 Método de Correspondência por Correlação | 43 |
| 2.2.4.2 Correspondência pelo Método dos Mínimos Quadrados | 44 |
| 2.2.4.2.1 Modelo Matemático | 44 |
| 2.2.5 Outros Métodos de Correspondência de Imagens | 48 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|-----------|
| ORIENTAÇÃO DE IMAGENS | 49 |
| 3.1 ORIENTAÇÃO DIRETA DO SENSOR | 49 |
| 3.1.1 Características Gerais | 49 |
| TABELA 1: Tabela comparativa entre os sistemas GPS e INS. | 53 |
| Princípio de observação | 53 |
| Observações | 53 |
| 3.1.2 Georreferenciamento do Sensor de Imageamento | 53 |
| 3.1.3 Acurácia dos Parâmetros de Orientação Direta | 58 |
| 3.1.4 Considerações Finais | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2 ORIENTAÇÃO INDIRETA DO SENSOR | 60 |
| 3.2.1 Considerações Iniciais | 60 |
| 3.2.2 Orientação Interior | 61 |
| 3.2.3 Efeitos Sistemáticos | 61 |
| 3.2.3.1 Deslocamento do Ponto Principal | 62 |
| 3.2.3.2 Distorção das lentes | 63 |
| 3.2.3.2.1 Distorção Radial Simétrica | 63 |
| 3.2.3.2.2 Distorção Descentrada | 65 |
| 3.2.3.3 Refração Fotogramétrica | 66 |
| 3.2.3 Orientação Exterior | 68 |
| 3.2.3.1 Modelo de Coplanaridade | 69 |

CAPÍTULO IV

| | |
|--|-----------|
| REAMOSTRAGEM EPIPOLAR | 72 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 72 |
| 4.2 CÁLCULO DAS IMAGENS NORMALIZADAS | 73 |
| 4.2.1 Transformação das imagens originais para suas posições verticais | 74 |
| 4.2.2 Transformação das imagens verticais para as imagens normalizadas | 75 |
| 4.3 INTERPOLAÇÃO BILINEAR | 77 |

CAPÍTULO V

| | |
|--|-----------|
| MATERIAIS E MÉTODOS | 79 |
| 5.1 MATERIAIS | 79 |
| 5.2 MÉTODOS E DESENVOLVIMENTOS | 80 |
| 5.2.1 Considerações Iniciais | 80 |
| 5.2.2 Identificação Automática de pontos homólogos | 82 |
| 5.2.2.1 Definição da Janela de Referência | 84 |
| 5.2.2.2 Redução do Espaço de Busca | 87 |
| 5.2.2.3 Métodos para a Correspondência de Imagens | 87 |
| 5.2.3 Compatibilização dos parâmetros de orientação exterior | 88 |
| 5.2.4 Testes Estatísticos dos Resultados do Ajustamento | 92 |
| 5.2.5 Cálculo das Imagens Normalizadas | 94 |
| 5.2.6 Desenvolvimentos | 96 |

CAPÍTULO VI

| | |
|---|-----------|
| EXPERIMENTOS E RESULTADOS | 98 |
| 6.1 EXPERIMENTOS COM DADOS SIMULADOS | 98 |

| | |
|--|------------|
| 6.2 EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS | 111 |
| 6.2.1 Experimentos com dados reais: dados simulados a partir da fototriangulação de imagens digitais | 112 |
| 6.2.1.1 Experimentos com a câmara digital KODAK DCS420 | 112 |
| 6.2.1.2 Experimentos com a câmara digital KODAK PROFESSIONAL PRO 14n | 118 |
| 6.2.2 Experimentos com dados reais: dados provenientes dos sensores de orientação direta (GPS+INS) | 123 |

CAPÍTULO VII

| | |
|--|------------|
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 127 |
| 7.1 CONCLUSÕES | 127 |
| 7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 129 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 131 |

APÊNDICES

APÊNDICE A

| | |
|--|------------|
| DADOS ESTATÍSTICOS PARA A PRÉ-ANÁLISE DA JANELA DE REFERÊNCIA | 133 |
|--|------------|

APÊNDICE B

| | |
|--|------------|
| DERIVADAS PARCIAIS NO AJUSTAMENTO | 134 |
| B.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 134 |
| B.2 DERIVADAS PARCIAIS DA FUNÇÃO EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS | 135 |
| B.3 DERIVADAS PARCIAIS DA FUNÇÃO EM RELAÇÃO AS OBSERVAÇÕES | 137 |

APÊNDICE C

| | |
|--|------------|
| ESTRUTURAS DOS ARQUIVOS DE ENTRADA PARA OS MÓDULOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS | 138 |
| C.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 138 |
| C.2 ARQUIVO DE DADOS <i>ParamOl.dat</i> | 139 |
| C.3 ARQUIVO DE DADOS <i>Imagem.dat</i> | 139 |
| C.4 ARQUIVO DE DADOS <i>correlacao.dat</i> | 140 |
| C.5 ARQUIVO DE DADOS <i>Obs.dat</i> | 140 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| FIGURA 1: Representação de uma imagem digital no formato matricial - região da UNESP em Presidente Prudente-SP. _____ | 25 |
| FIGURA 2: Definição do sistema de coordenadas de uma imagem digital. _____ | 26 |
| FIGURA 3: Processo de formação da imagem digital. _____ | 28 |
| FIGURA 4: Conceito básico das câmaras digitais tri-lineares. _____ | 30 |
| FIGURA 5: Aquisição das cenas pelo sensor digital tri-linear. (a) cena registrada na visada a vante, (b) cena amostrada pela visada nadir e, (c) cena formada a partir da visada ré. ____ | 30 |
| FIGURA 6: DMC (Digital Modular Camera) – (a) disposição das câmaras: quatro câmaras pancromáticas inclinadas (C1, C2, C3, C4) e três multiespectrais (C5, C6, C7) posicionadas no centro; (b) cobertura no terreno produzida pelas quatro câmaras pancromáticas. ____ | 31 |
| FIGURA 7: Plano epipolar e as correspondentes linhas epipolares. _____ | 34 |
| FIGURA 8: Estimativa da localização correlacionada usando a redução do espaço de busca em linhas epipolares. _____ | 36 |
| FIGURA 9: Método de correspondência baseado em área. _____ | 42 |
| FIGURA 10: Elementos do georreferenciamento direto. _____ | 55 |
| FIGURA 11: Sistemas de Referência usados na navegação inercial. _____ | 56 |
| FIGURA 12: Curva de distorção radial. _____ | 64 |
| FIGURA 13: Distorção radial negativa (a) e positiva (b). _____ | 64 |
| FIGURA 14: Refração dos raios de luz oblíquos que atravessam a atmosfera. _____ | 67 |
| FIGURA 15: Geometria para a condição de Coplanaridade. _____ | 69 |
| FIGURA 16: Relação entre as imagens originais e normalizadas. _____ | 74 |
| FIGURA 17: Representação do pixel reamostrado em relação à vizinhança na imagem original. _____ | 78 |
| FIGURA 18: Processos envolvidos na geração automática de estereomodelos com imagens digitais georreferenciadas. _____ | 80 |
| FIGURA 19: Etapas do processo de identificação automática de pontos homólogos. ____ | 83 |
| FIGURA 20: Definição da área de superposição do modelo. _____ | 85 |
| FIGURA 21: Distribuição dos pontos de correlação sobre o modelo. _____ | 86 |
| FIGURA 22: Etapas do processo de Reamostragem Epipolar. _____ | 95 |
| FIGURA 23: Experimentos com a câmara DCS420 - Comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação no modelo: (a) componentes planimétricas, (b) componente altimétrica. _____ | 115 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 24: Experimento com a câmara digital KODAK DCS420 - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e normalização do par de imagens. _____ | 117 |
| FIGURA 25: Experimentos com a câmara PROFESSIONAL PRO 14n: Comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação no modelo: (a) componentes planimétricas, (b) componente altimétrica. _____ | 121 |
| FIGURA 26: Experimento com a câmara digital KODAK PROFESSIONAL PRO 14n - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e normalização do par de imagens. _____ | 122 |
| FIGURA 27: Experimento com as imagens apoiadas pelos parâmetros de orientação direta - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e normalização do par de imagens. _____ | 126 |

APÊNDICES

| | |
|---|-----|
| FIGURA 28: Exemplo do arquivo ParamOI.dat. _____ | 139 |
| FIGURA 29: Exemplo do arquivo Imagem.dat. _____ | 139 |
| FIGURA 30: Exemplo do arquivo correlacao.dat. _____ | 140 |
| FIGURA 31: Estrutura do arquivo Obs.dat. _____ | 141 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1: Tabela comparativa entre os sistemas GPS e INS. _____ | 53 |
| TABELA 2: Parâmetros de orientação exterior definidos como verdadeiros nos experimentos simulados. _____ | 99 |
| TABELA 3: Coordenadas de imagem ideais e degradadas para os pontos observados. ____ | 99 |
| TABELA 4: Experimento 1 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 101 |
| TABELA 5: Experimento 2 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 102 |
| TABELA 6: Experimento 3 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 103 |
| TABELA 7: Experimento 4 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 105 |
| TABELA 8: Experimento 5 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 106 |
| TABELA 9: Experimento 6 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 108 |
| TABELA 10: Teste de distribuição χ^2 para os experimentos simulados. _____ | 109 |
| TABELA 11. Erro Médio Quadrático das coordenadas no espaço objeto, para os experimentos simulados. _____ | 110 |
| TABELA 12. Erro Médio Quadrático (EMQ) dos pontos de verificação e valores da paralaxe vertical do modelo para os experimentos realizados com as imagens coletadas pela câmara digital KODAK DCS420. _____ | 113 |
| TABELA 13: Teste de distribuição χ^2 para o conjunto de experimentos realizados com as imagens obtidas pela câmara digital KODAK DCS420. _____ | 116 |
| TABELA 14. Erro Médio Quadrático (EMQ) dos pontos de verificação e valores da paralaxe vertical do modelo para os experimentos realizados com as imagens coletadas pela câmara digital PROFESSIONAL KODAK PRO14n. _____ | 120 |
| TABELA 15: Teste Qui-quadrado para o conjunto de experimentos realizados com as imagens obtidas pela câmara digital KODAK PROFESSIONAL PRO 14n. _____ | 122 |
| TABELA 16: Experimento com imagens digitais apoiadas pelos sensores de orientação direta: Parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. _____ | 124 |

TABELA 17: Teste Qui-quadrado para o experimento realizado com as imagens suportadas pelos parâmetros de orientação direta do sensor. _____ 125

APÊNDICES

TABELA 18: Experimentos com a janela de referência: valores estatísticos para a pré-análise das áreas de correlação. _____ 133

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ADS | Airborne Digital Sensors – Sensores Aéreos Digitais |
| CCD | Charge Coupled Device – Dispositivo de Carga Acoplada |
| CID | Charge Injection Device – Dispositivo de Carga Injetada |
| CP | Centro Perspectivo |
| DGPS | Differential GPS |
| DLR | Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Centro Aeroespacial da Alemanha |
| DoD | Department of Defense – Departamento de Defesa |
| DOT | Department of Transportation - Departamento de Transportes |
| EMQ | Erro Médio Quadrático |
| FCT | Faculdade de Ciências e Tecnologia |
| GPS | Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global |
| HRSC-A | High Resolution Stereo Camera Airborne – Estereocâmara Aérea de Alta Resolução |
| INS | Inertial Navigation System – Sistema de Navegação Inercial |
| IMU | Inertial Measurement Unit - Unidade de Medida Inercial |
| JPEG | Joint Photographic Experts Group – Formato de compressão de imagens |
| MMQ | Método dos Mínimos Quadrados |
| MVC | Matriz Variância-Covariância |
| OE | Orientação Exterior |
| OI | Orientação Interior |
| RBMC | Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo |

| | |
|--------|---|
| SEIRA | Sistema de Exploração de Imagens Rápido Aerotransportáveis |
| UNESP | Universidade Estadual Paulista |
| UPTK | Unesp Photogrammetry Tool Kit |
| WGS-84 | World Geodetic System 1984 – Sistema Geodésico Global de 1984 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com os avanços da Fotogrametria digital, os aplicativos de processamento e análise de dados tornam-se cada vez mais eficientes do ponto de vista econômico, visto que grande parte das etapas envolvidas no processo pode ser automatizada. A total automação dos processos de orientação de imagens está relacionada neste contexto, no qual se reduz consideravelmente o tempo gasto no processo de mapeamento, além de evitar erros provenientes de operadores humanos.

Além disso, com o advento das câmaras digitais, do posicionamento por satélite e por sistemas inerciais, tornou-se possível a realização de mapeamento com maior agilidade e rapidez, e dessa forma, surgiram novas aplicações a partir da disponibilidade destas tecnologias. A análise de desastres naturais e antrópicos, além do monitoramento do meio ambiente necessitam de produtos cartográficos gerados com maior eficiência, uma vez que estas situações requerem informações cartográficas periódicas.

Dentro deste contexto, foi proposto um projeto denominado SEIRA (Sistema de Exploração de Imagens Rápido Aerotransportável), o qual integra esforços espanhóis (Instituto de Geomática da Universidade de Barcelona), e brasileiros (UNESP e empresas privadas), para o desenvolvimento de um sistema

de coleta e processamento de informações cartográficas com características de flexibilidade e rapidez, visando a obtenção de produtos cartográficos em quase tempo real, ou seja, após o processamento dos dados coletados durante o vôo. Pode-se verificar que o processo de geração automática de estereomodelos se torna importante, visto a crescente utilização dos sensores de posicionamento e atitude em mapeamento aéreo.

A geração automática de estereomodelos se baseia na automatização do processo de orientação de imagens digitais, apoiadas por dados de vôo e parâmetros de posição e atitude, fornecidos pelos sensores de posicionamento por satélites (GPS) e de navegação inercial (INS). Conforme apresenta a literatura (MOSTAFA e SCHWARZ, 2001; COLOMINA, 1999 e BRZEZINSKA, 1999), os parâmetros provenientes destes sensores de orientação direta, utilizados para mapeamento, não possuem acurácia necessária para a total eliminação da paralaxe vertical (p_y) do modelo formado.

Neste sentido, foi desenvolvida uma metodologia para eliminar a paralaxe (p_y) do modelo, que é baseada no ajustamento dos parâmetros de orientação exterior por meio de um modelo de coplanaridade modificado, uma vez que tais parâmetros são determinados previamente pelos sensores de bordo (GPS+INS). Com o objetivo de ajustar os parâmetros de orientação exterior, alguns pontos de passagem são medidos no modelo, a partir de métodos de correlação baseados em área. O processo de correlação de imagens é precedido por uma análise das áreas de correlação, para aumentar a robustez do processo, evitando regiões homogêneas. Após o “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior é aplicado o processo de reamostragem epipolar, com o intuito de eliminar a paralaxe vertical remanescente do modelo, proporcionando uma visualização estereoscópica

melhor da cena e facilitando o processo de correlação, no qual o espaço de busca pode ser reduzido as linhas epipolares.

Diversos experimentos com dados simulados e reais foram realizados, sendo que os mais significativos estão apresentados neste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Com a crescente utilização das câmaras digitais e sistemas embarcados para orientação direta do sensor em Fotogrametria, o presente trabalho teve como objetivos gerais o estabelecimento de uma metodologia e o desenvolvimento de módulos computacionais para a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior fornecidos pelos sensores de orientação direta, com características de confiabilidade e mínima intervenção do operador.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar os sensores usados na orientação direta de imagens, a fim de verificar as principais características e a acurácia dos dados fornecidos por estas tecnologias;

- Verificar e adaptar os métodos de correlação de imagens existentes, além de desenvolver uma metodologia para a identificação de pontos homólogos totalmente automática;
- Estabelecer um modelo de coplanaridade modificado, com intuito de compatibilizar os parâmetros de orientação provenientes dos sensores de bordo, de tal forma a eliminar a paralaxe vertical do modelo;
- Implementar os módulos computacionais para o processamento automático das imagens digitais georreferenciadas e “refinamento” dos parâmetros de orientação direta.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentado um panorama do problema envolvido, procurando-se mostrar as justificativas e as vantagens do emprego da metodologia proposta.

O Capítulo II mostra uma revisão sobre imagens digitais (Princípios básicos de aquisição, formação das imagens digitais e câmaras digitais), bem como o processo de correspondência de imagens, com os métodos de correlação baseado em área, a técnica de redução do espaço de busca em linhas epipolares, e a abordagem de pré-análise das áreas de correlação.

No Capítulo III são revisados os processos de orientação de imagens, com as abordagens de orientação direta (GPS+INS) e orientação indireta de imagens digitais.

No capítulo IV é feita uma revisão sobre o processo de reamostragem epipolar, apresentando sua definição e as equações envolvidas.

O Capítulo V traz os materiais usados neste trabalho, a metodologia desenvolvida para a geração automática de estereomodelos, assim como uma síntese sobre os módulos computacionais desenvolvidos.

No capítulo VI são apresentados os experimentos realizados com dados simulados e reais, além das discussões dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo VII traz as considerações finais e as sugestões para os futuros trabalhos nesta área de pesquisa.

CAPÍTULO II

IMAGENS DIGITAIS E CORRESPONDÊNCIA DE ENTIDADES CONJUGADAS

2.1 IMAGENS DIGITAIS

2.1.1 Conceito

Uma imagem digital matricial (*raster*), apresentada na Figura 1, consiste de um conjunto de elementos de imagem (pixel - “*picture elements*”) espacialmente ordenados (linha e coluna) em uma matriz bidimensional, sendo que a cada pixel da imagem é associado um tom de cinza (valor de brilho) ou cor. Além disso, as imagens digitais podem ser armazenadas no formato vetorial (*vector*), como uma lista que descreve coordenadas e atributos de entidades que a compõem (pontos, linhas, etc).

Neste trabalho foram utilizadas apenas imagens no formato matricial. Qualquer referência genérica deverá ser interpretada como tal.

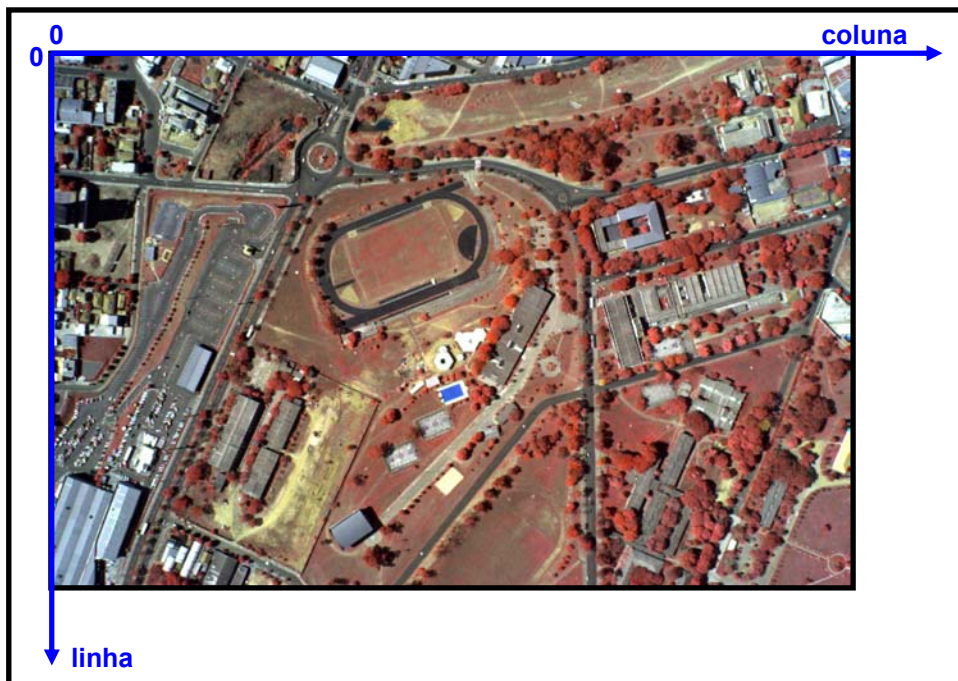


FIGURA 1: Representação de uma imagem digital no formato matricial - região da UNESP em Presidente Prudente-SP.

Há duas componentes que definem a qualidade de uma imagem matricial: *resolução espacial*, relacionada à dimensão do pixel, sendo freqüentemente expressa em pontos por polegada (ppp ou dpi – “*dots per inch*”) e; *resolução radiométrica*, que depende dos níveis de quantização adotados (2^n , sendo n o número de bits a ser armazenado. Ex: para uma imagem de 8 bits, é possível armazenar 256 níveis de cinza).

Quando se trata de imagem digital, o detector responsável pela coleta da imagem é um sensor de estado sólido, que pode ser do tipo CCD (*Charge Coupled Device* – Dispositivo de Carga Acoplada), CID (*Charge Injection Device* – Dispositivo de Carga Injetada) ou CMOS (Ex: KODAK PROFESSIONAL DCS PRO 14n) que são compostos de elementos sensores pontuais de silício, nos quais a tensão de saída é proporcional à intensidade de luz incidente.

Nos sensores matriciais (presentes na maioria das câmaras digitais) os pixels são criados por milhares destas fotocélulas microscópicas. Como, em geral, as câmaras possuem apenas um sensor de estado sólido, a coleta de imagens coloridas é feita utilizando-se uma matriz de filtros RGB (*Red – Green - Blue*), colocada na frente do CCD. Em seguida, as cores são compostas computacionalmente por interpolação (TOMMASELLI et al, 2000).

2.1.2 Sistema de Coordenadas de uma Imagem Digital

O sistema de coordenadas de uma imagem digital tem origem no canto superior esquerdo da imagem, sendo a contagem das colunas na direção horizontal a partir da origem e o eixo de contagem das linhas rotacionado de 90° em relação ao eixo de contagem das colunas, conforme ilustra a Figura 2.

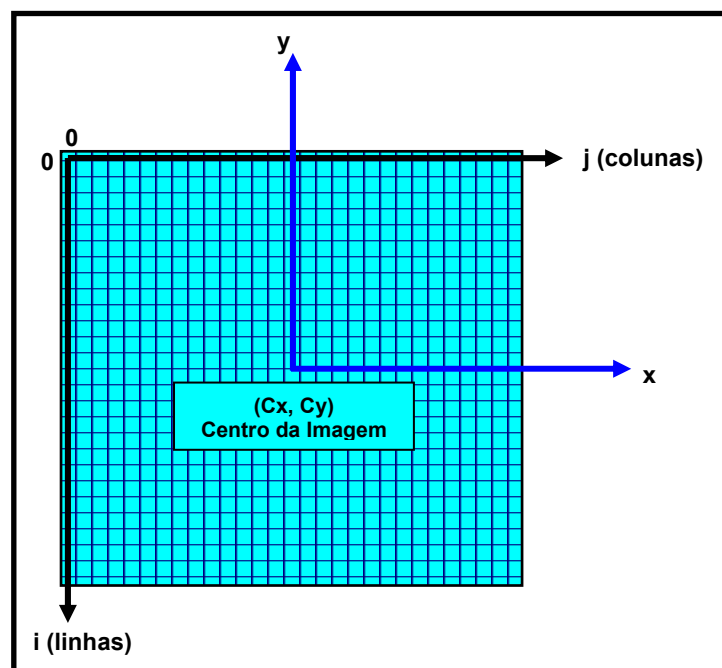


FIGURA 2: Definição do sistema de coordenadas de uma imagem digital.

Contudo, em processamentos fotogramétricos se utiliza um sistema intermediário (x,y) , com origem definida no centro da imagem, conforme apresentado na Figura 2. Para transformar as coordenadas do sistema de imagem para o sistema intermediário são necessárias uma translação entre as origens dos sistemas, uma reflexão no eixo de ordenadas e um fator de escala equivalente ao tamanho do pixel, a fim de estabelecer as coordenadas num sistema métrico.

$$\begin{aligned}x &= (j - c_x) * p_x \\ y &= -(i - c_y) * p_y\end{aligned}\tag{1}$$

com

$$\begin{aligned}c_x &= \frac{\text{número de colunas} - 1}{2} \\ c_y &= \frac{\text{número de linhas} - 1}{2}\end{aligned}\tag{2}$$

sendo:

(x, y) : coordenadas referidas ao sistema intermediário;

(i, j) : coordenadas referidas ao sistema da imagem;

(c_x, c_y) : coordenadas do centro da imagem no sistema de imagem;

p_x e p_y : dimensões do pixel nas componentes x e y , respectivamente;

2.1.3 Câmaras Digitais

De acordo com Tommaselli et al (2000), os principais componentes de uma câmara digital genérica são:

- ✓ Sistemas de lentes;

- ✓ Matriz de elementos sensores (dispositivo que transforma a energia luminosa em energia elétrica);
- ✓ Conversor Analógico/Digital (A/D);
- ✓ Processadores;
- ✓ Memória para armazenamento das imagens.

De uma forma geral, o processo de formação de uma imagem digital pode ser representado pela Figura 3.

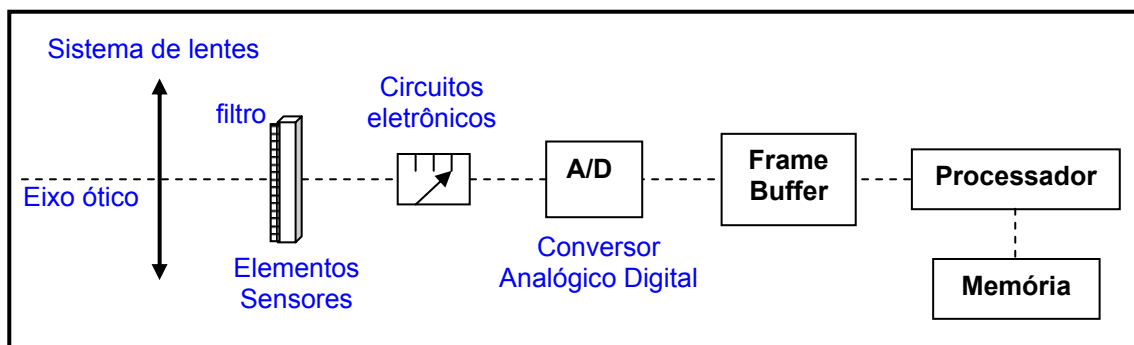


FIGURA 3: Processo de formação da imagem digital (Adaptado de GALO, 1993).

Os raios de luz provenientes de um objeto que atingem o sistema de lentes da câmara são focalizados nos elementos sensores, os quais são transformados em voltagens. Estes impulsos percorrem os circuitos eletrônicos, onde atravessam o conversor A/D, que transforma o sinal elétrico analógico em sinal digital, até atingirem a unidade de armazenamento temporária, denominada de *Frame-Buffer*. A imagem é então processada para a composição de cores e compactação, geralmente no formato *JPEG*. Dependendo do modelo da câmara, esta imagem pode ser armazenada em cartões de memória ou em discos rígidos específicos. As imagens armazenadas são, em geral, transferidas ao computador por meio de cabos seriais.

As câmaras digitais oferecem vantagens consideráveis sobre as câmaras baseadas em filme, como: acesso rápido e direto aos dados digitais; reutilização da mídia de gravação; maior resolução radiométrica e; controle da qualidade da imagem durante a coleta;

De acordo com Hinz (1999), o usuário somente estará preparado para aceitar a tecnologia digital se esta oferecer vantagens sobre as outras existentes, de um ponto de vista econômico e produtivo. Em relação às câmaras baseadas em filme, as câmaras digitais possibilitam gravação direta dos dados, em formato digital, eliminando o tempo gasto para a preparação do filme e custos adicionais com laboratório.

Uma das maiores limitações das câmaras digitais é a pequena dimensão dos sensores CCD disponíveis. Os maiores sistemas disponíveis no mercado, para solucionar os problemas envolvidos na dimensão do recobrimento aerofotogramétrico, se baseiam em dois tipos de tecnologias: as câmaras baseadas nos sensores tri-linear e a configuração modular de câmaras matriciais.

A abordagem tri-linear caracteriza-se por integrar três ou mais sensores CCD lineares com configuração de varredura “pushbroom” para amostrar de forma contínua o terreno. O sistema consiste de três sensores lineares posicionados no plano focal (vante, nadir e ré) que garantem a geometria e a cobertura estéreo da superfície, além de sensores multiespectrais adicionais localizados próximos ao nadir, com a sensibilidade controlada por filtros (vermelho, verde e azul), como mostra a Figura 4. As imagens de cada linha formam faixas contínuas nas três visadas de amostragem, possibilitando tripla cobertura do terreno (Figura 5).

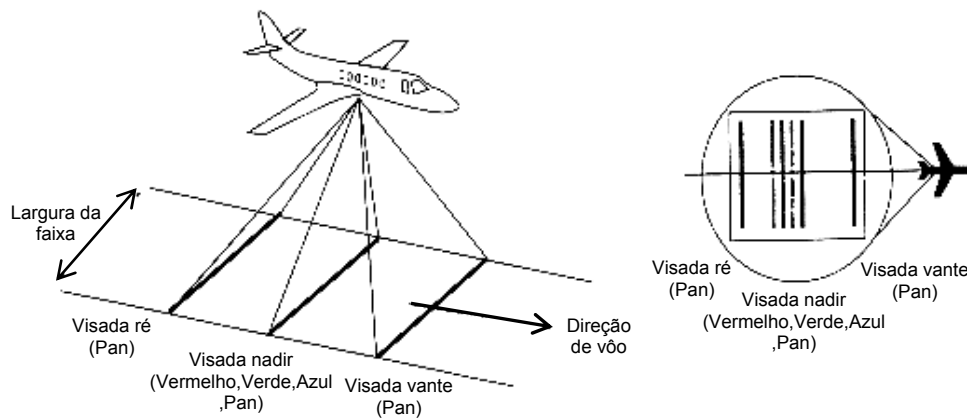


FIGURA 4: Conceito básico das câmaras digitais tri-lineares (Adaptado de PETRIE, 2000).

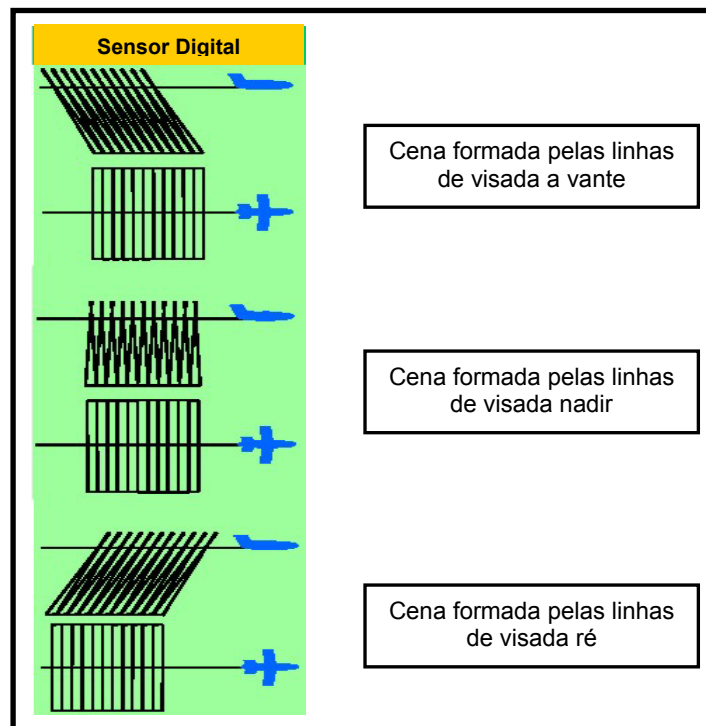


FIGURA 5: Aquisição das cenas pelo sensor digital tri-linear. (a) cena registrada na visada a vante, (b) cena amostrada pela visada nadir e, (c) cena formada a partir da visada ré (Extraído de FRICKER et al, 1999).

Dois exemplos de câmaras digitais baseadas no arranjo trilinear disponíveis no mercado são: *ADS40*, da *LHSystem* (SANDAU et al, 2000; FRICKER et al, 2000) e a *HRSCA*, do *DLR* (LEHMANN et al, 2000).

O sistema modular de câmaras matriciais consiste em uma configuração de câmaras integradas sobre uma plataforma estabilizada, de tal forma que seja possível ter uma cobertura fotográfica mais extensa do terreno a partir da integração das imagens capturadas por várias câmaras digitais matriciais. A abordagem proposta pela empresa *Z/I Imaging*, a DMC (*Digital Modular Camera*), consiste de quatro câmaras digitais inclinadas (C_1 , C_2 , C_3 , C_4) que produzem imagens pancromáticas. Outras três câmaras posicionadas verticalmente próximas ao nadir (C_5 , C_6 , C_7) produzem imagens multiespectrais (vermelho, azul e verde) com metade da resolução das imagens pancromáticas, cobrindo a área equivalente às quatro câmaras. O sistema pode ser estendido para canais espectrais adicionais (Infravermelho, por exemplo), em aplicações na área de Sensoriamento Remoto. A Figura 6 mostra a disposição das câmaras e a cobertura no terreno obtida com as câmaras pancromáticas.

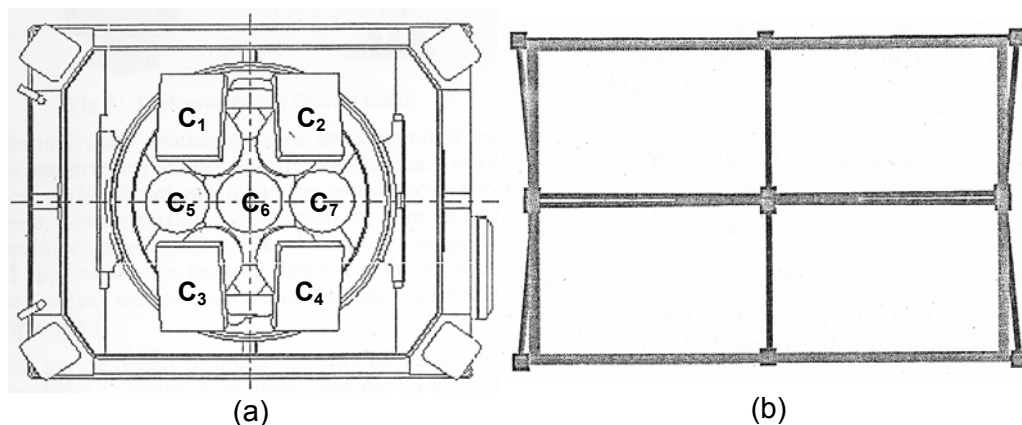


FIGURA 6: DMC (Digital Modular Camera) – (a) disposição das câmaras: quatro câmaras pancromáticas inclinadas (C_1 , C_2 , C_3 , C_4) e três multiespectrais (C_5 , C_6 , C_7) posicionadas no centro; (b) cobertura no terreno produzida pelas quatro câmaras pancromáticas. (Extraído de PETRIE, 2000).

Outro tipo de sistema modular de câmaras digitais matriciais é a *Vexcel Ultracam*, da *Vexcel*¹. Existe ainda no mercado câmaras digitais matriciais de médio formato, como a *Emerge*, de resolução 4K x 4K pixels², ou ainda de alta resolução, como a *Ultra High Resolution Framing Camera*, da LMFS (*Lockheed Martin FairChild Systems*), que possui um CCD de 9K x 9K pixels. Contudo, esta última foi desenvolvida fundamentalmente para os serviços militares na área de inteligência.

2.2 CORRESPONDÊNCIA DE ENTIDADES

2.2.1 Considerações Iniciais

Um dos processos mais importantes em Fotogrametria é a identificação e medição de entidades conjugadas em duas ou mais imagens. Em Fotogrametria digital este procedimento deve ser automático e recebe o nome de correspondência de imagens.

A correspondência de imagens está envolvida em praticamente todos os processos fotogramétricos digitais, como a orientação de imagens, geração de modelos digitais de terrenos e extração automática de feições. Mesmo assim, este assunto ainda é objeto de estudo de várias pesquisas, visto que o processo de correspondência de imagens pode apresentar falhas em algumas situações, devido a uma série de fatores que serão abordados no decorrer deste capítulo.

¹ Disponível em: <<http://www.vexcel.com/products/ultracam.html>>. Acesso em 20/11/2003.

² Disponível em: <<http://www.emergeweb.com>>. Acesso em 20/11/2003.

2.2.2 Distorções Geométricas das Entidades Correspondentes

Na correspondência de imagens a medida de similaridade é máxima se os níveis de cinza de todos os pixels comparados são idênticos. Esta é uma situação ideal, mas que nunca ocorre na realidade. Isso porque ruídos, mudanças de iluminação e propriedades refletivas entre as imagens proporcionam diferenças nos níveis de cinza. Outro fator que deve ser considerado são as distorções geométricas devidas à projeção central, aos parâmetros de orientação e ao relevo. Maiores detalhes podem ser encontrados em Schenk (1999).

2.2.3 Soluções para os Problemas Fundamentais na Correspondência de Imagens

2.2.3.1 Redução do espaço de busca

Um grande problema da correspondência de imagens é a definição do espaço de busca. Se a região de busca para as feições correlatas não for restrita, o custo computacional será elevado e o risco de falsa correlação aumentará. Existem diversos meios para reduzir o espaço de busca na correspondência, como a busca em linhas epipolares. Este método foi adotado em virtude do conhecimento prévio dos parâmetros de orientação exterior das imagens.

2.2.3.1.1 Linhas epipolares

A Figura 7 mostra um estereopar com o ponto A no espaço objeto e os correspondentes pontos a_1 e a_2 nas imagens. As imagens, em geral, não são exatamente verticais e as posições dos centros perspectivos C_1 e C_2 têm alturas diferentes. O plano definido pelos pontos C_1 , C_2 e A é conhecido como *plano epipolar*. As interseções do plano epipolar com os planos das imagens produzem as *linhas epipolares*, sendo estas conjugadas. Como se pode notar, há um número infinito de linhas epipolares correspondentes ao conjunto de planos que cortam as imagens e contêm a linha de base $\overline{C_1C_2}$ (MIKHAIL et al, 2001).

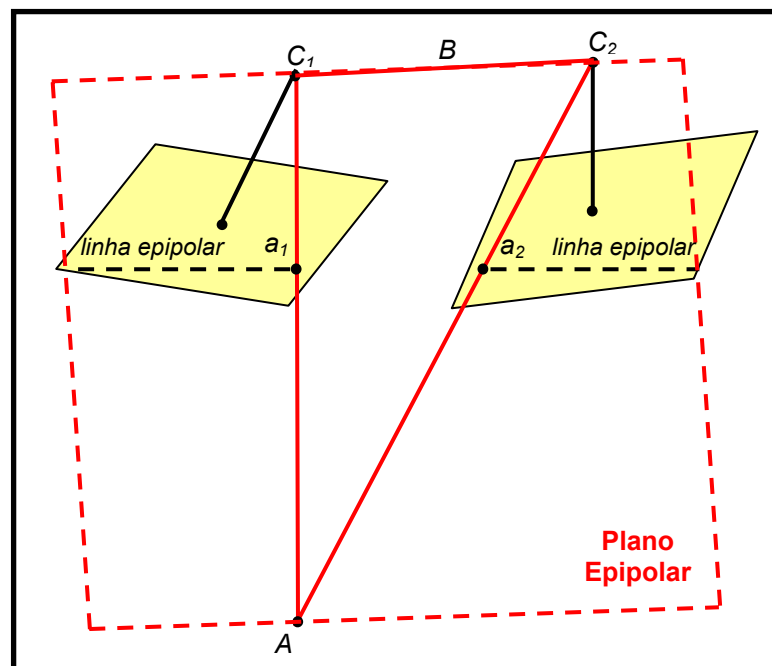


FIGURA 7: Plano epipolar e as correspondentes linhas epipolares.

As linhas epipolares reduzem o espaço de busca na correlação de imagens. Se uma feição em uma imagem é selecionada, então a linha epipolar na outra imagem pode ser calculada, desde que o estereopar esteja orientado.

Em geral, as linhas epipolares não são paralelas ao eixo de coordenadas x . Porém, se os parâmetros de orientação forem conhecidos, as imagens podem ser transformadas para suas posições normalizadas, a fim de tornar as linhas epipolares paralelas nas imagens. Este processo é denominado *Reamostragem Epipolar* ou *Normalização de Imagens* (Capítulo VI). Mas, para o propósito deste trabalho optou-se por normalizar as imagens após a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior, para melhorar a visualização estereoscópica do modelo e facilitar o processo de correspondência de feições conjugadas em processos fotogramétricos subseqüentes (Ex: Geração de Modelos Digitais de Terreno).

Mesmo com os parâmetros de orientação fornecidos pelos sensores de bordo e as imagens fora de suas posições normalizadas é possível usar a estratégia de busca em linhas epipolares. A diferença é que a busca não será apenas em uma parte da linha epipolar e sim em uma janela que será gerada em torno da região. Para entender melhor o processo toma-se como base a Figura 8, que mostra o raio $C'P'$, com P sendo a feição no espaço objeto com elevação estimada Z_P , que pode ser uma altitude média da região.

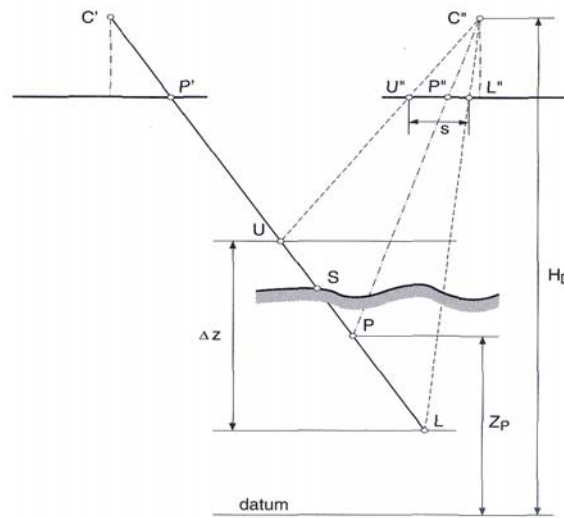


FIGURA 8: Estimativa da localização correlacionada usando a redução do espaço de busca em linhas epipolares (Fonte: Schenk, 1999).

Na verdade, o raio $C'P'$ intercepta o terreno no ponto S . Com a elevação estimada (Z_P) e os parâmetros de orientação da imagem da esquerda é possível projetar o ponto na imagem P' (no sistema fotogramétrico) para o sistema de terreno (P), a partir da equação de colinearidade inversa:

$$X = X_0^E + (Z - Z_0^E) \frac{m_{11}^E x_P + m_{21}^E y_P - m_{31}^E f}{m_{13}^E x_P + m_{23}^E y_P - m_{33}^E f} \quad (3)$$

$$Y = Y_0^E + (Z - Z_0^E) \frac{m_{12}^E x_P + m_{22}^E y_P - m_{32}^E f}{m_{13}^E x_P + m_{23}^E y_P - m_{33}^E f}$$

sendo:

(x_P, y_P) : coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico;

m_{ij}^E : elementos da matriz de rotação R para a imagem da esquerda;

$$R = \begin{bmatrix} \cos k \cdot \cos \varphi & \sin k \cdot \cos \omega + \cos k \cdot \sin \varphi \cdot \sin \omega & \sin k \cdot \sin \omega - \cos k \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega \\ -\sin k \cdot \cos \omega & \cos k \cdot \cos \omega - \sin k \cdot \sin \varphi \cdot \sin \omega & \cos k \cdot \sin \omega + \sin k \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \cdot \sin \omega & \cos \varphi \cdot \cos \omega \end{bmatrix}$$

sendo ω, φ, κ os ângulos de rotação.

f : distância focal da câmara;

(X_0^E, Y_0^E, Z_0^E) : coordenadas do centro perspectivo (CP) da câmara para a imagem da esquerda no sistema de terreno;

(X, Y, Z) : coordenadas do ponto no sistema de terreno.

Como a altitude Z_P foi estimada, uma incerteza (Δz) deve ser atribuída a ela. Este intervalo de incerteza (U e L) é estabelecido com base num conhecimento aproximado da altimetria da região. Atualmente, existem Modelos Digitais de Terreno (MDT) globais disponíveis, que podem ser utilizados como boas aproximações.

No passo seguinte, o ponto no sistema de terreno, assim como os extremos do intervalo de incerteza (U e L), são projetados à imagem da direita a fim de gerar uma região de busca (U'' , L''). Esta projeção é realizada pela equação de colinearidade direta, utilizando os parâmetros de orientação exterior da imagem da direita:

$$x_P = -f \frac{m_{11}^D(X - X_0^D) + m_{12}^D(Y - Y_0^D) + m_{13}^D(Z - Z_0^D)}{m_{31}^D(X - X_0^D) + m_{32}^D(Y - Y_0^D) + m_{33}^D(Z - Z_0^D)} \quad (4)$$
$$y_P = -f \frac{m_{21}^D(X - X_0^D) + m_{22}^D(Y - Y_0^D) + m_{23}^D(Z - Z_0^D)}{m_{31}^D(X - X_0^D) + m_{32}^D(Y - Y_0^D) + m_{33}^D(Z - Z_0^D)}$$

com:

m_{ij}^D : elementos da matriz de rotação para a imagem da direita;

(X_0^D, Y_0^D, Z_0^D) : coordenadas do centro perspectivo (CP) da câmara para a imagem da direita no sistema de terreno;

2.2.3.2 Unicidade da entidade conjugada

Mesmo com o espaço de busca reduzido para algumas centenas de pixels, ainda há o problema de múltiplas correspondências. Para evitar isso, a entidade conjugada deve ser única, pelo menos dentro do espaço de busca. Alguns métodos podem ser usados para verificar a homogeneidade da porção da imagem e avaliar se esta região é indicada para o processo. Dentre estes métodos, destacam-se a análise de variância (medida de como os níveis de cinza diferentes se apresentam) e a entropia (medida de randomicidade da imagem).

Com o intuito de aumentar a robustez do processo, evitando regiões problemáticas (homogêneas), foi utilizada uma abordagem de pré-análise da área amostrada pela janela de referência. Esta análise *a priori* é realizada pelo cálculo da matriz variância-covariância (MVC) das componentes de translação radiométrica das áreas de correlação da imagem de referência, a partir de uma medida de correlação teoricamente correta. Este processo é basicamente realizado em três etapas (HARALICK e SHAPIRO, 1993 *apud* COSTA et al, 2003):

1) Cálculo da variância do ruído (σ_n^2) em função da variância da janela de referência (σ_r^2) e do máximo coeficiente de correlação (ρ_{12}):

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_r^2(1 - \rho_{12})}{\rho_{12}} \quad (5)$$

com

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (r_i - \mu)^2}{m - 1} \quad (6)$$

sendo:

m : número de elementos da janela de referência;

r_i : nível de cinza da janela de referência para a posição i ;

μ : nível de cinza médio para a janela de referência.

O máximo coeficiente de correlação (ρ_{12}) consiste numa medida de correlação teoricamente correta entre as imagens do estereopar. Como a metodologia desenvolvida trata a correlação de imagens de forma totalmente automática, este coeficiente foi empiricamente definido como 0,8.

2) *Cálculo da matriz de equações normais (N) em função dos gradientes nas linhas e colunas da janela de referência:*

O modelo linearizado para a correlação de imagens é dado pela equação 7, sendo os parâmetros de translação (Δx , Δy) estimados no ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados.

$$\Delta g = -f_l(\Delta x) - f_c(\Delta y) + n \quad (7)$$

sendo:

n : ruído;

f_l e f_c : gradientes nas direções das linhas (l) e colunas (c), respectivamente:

$$\begin{cases} f_l = \frac{\partial f(c, l)}{\partial l} \\ f_c = \frac{\partial f(c, l)}{\partial c} \end{cases} \quad (8)$$

A partir do modelo apresentado na equação 7, a matriz das equações normais N é dada por:

$$N = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m f_{l_i}^2 & \sum_{i=1}^m f_{l_i} f_{c_i} \\ \sum_{i=1}^m f_{l_i} f_{c_i} & \sum_{i=1}^m f_{c_i}^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

3) Cálculo da precisão dos parâmetros de translação entre as imagens em função da variância do ruído (σ_n^2) e da matriz de equações normais (N):

A precisão dos parâmetros ($\Delta x, \Delta y$) é dada por:

$$\Sigma_{\Delta x, \Delta y} = \hat{\sigma}_n^2 \cdot N^{-1} \quad (10)$$

$$\Sigma_{\Delta x, \Delta y} = \hat{\sigma}_n^2 \cdot \frac{1}{n_{11}n_{22} - n_{12}^2} \begin{pmatrix} n_{22} & -n_{12} \\ -n_{21} & n_{11} \end{pmatrix} \quad (11)$$

sendo:

$\hat{\sigma}_n^2$: variância do ruído estimada, considerada equivalente a variância do ruído calculada (σ_n^2);

n_{11}, \dots, n_{22} : elementos da matriz de equações normais N.

Assim, pela equação (11), tem-se:

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_{\Delta x} = \hat{\sigma}_n \cdot \sqrt{\frac{n_{22}}{n_{11}n_{22} - n_{12}^2}} \\ \hat{\sigma}_{\Delta y} = \hat{\sigma}_n \cdot \sqrt{\frac{n_{11}}{n_{11}n_{22} - n_{12}^2}} \end{cases} \quad (12)$$

De acordo com Costa et al (2003), a matriz variância-covariância das componentes de translação, e conseqüentemente, os desvios-padrão das translações, dependem dos seguintes fatores:

- *Variância do ruído*, calculado a partir da variância da janela de referência (σ_r^2) e do máximo coeficiente de correlação (ρ_{12});
- *O número m de pixels*: o tamanho da janela de referência é importante, uma vez que o desvio-padrão diminui linearmente com o aumento da janela;
- *O gradiente médio quadrático na janela*, que indica a presença de bordas, σ que é decisivo para a precisão da correlação.

Dessa forma, assumindo-se a variância do ruído constante em toda a imagem, é possível determinar os lugares onde se pode esperar alta precisão na correlação. Isto é possível porque as equações dependem somente do conteúdo da janela de referência.

Maiores detalhes sobre esta abordagem para a pré-análise da janela de referência no processo de correlação de imagens podem ser encontrados em Costa et al (2003) e Haralick e Shapiro (1993).

2.2.4 Método de Correspondência de entidades baseado em Área

A idéia fundamental do método de correspondência baseado em área é a comparação da distribuição dos níveis de cinza de uma matriz de referência (*template*) com janelas de pesquisa, dentro de uma área de busca na imagem correlacionada (Figura 9). Esta comparação é realizada a partir de diferentes métodos. Dentre estes, Schenk (1999) destaca que os dois melhores métodos são: *correlação cruzada e mínimos quadrados*.

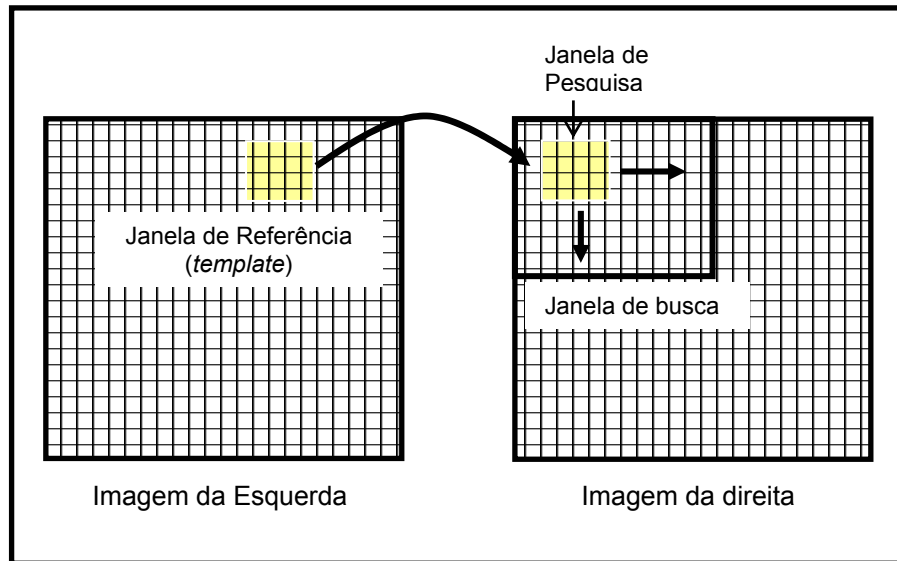


FIGURA 9: Método de correspondência baseado em área.

No método de correspondência de imagens baseado em área alguns aspectos devem ser discutidos (SCHENK, 1999):

- ✓ *Localização da janela de referência (template):* a escolha da localização da janela de referência deve ser a melhor possível, de tal forma que não ocorram falhas na correspondência entre as entidades. Tais falhas podem ocorrer devido a homogeneidade da região, oclusão da área selecionada na outra imagem, repetição de padrões, entre outros;
- ✓ *Dimensão da Janela de referência:* este ponto deve ser levado em consideração, pois a medida em que a dimensão da janela é incrementada, a unicidade da função dos níveis de cinza aumenta, porém o problema das distorções geométricas é mais marcante;
- ✓ *Localização e dimensão da janela de pesquisa:* o método de correspondência baseado em área requer boas aproximações, e com isso, métodos de redução do espaço de busca devem ser usados;

- ✓ *Critério de similaridade*: os valores obtidos nas medidas de similaridade entre a janela de referência e as janelas de pesquisa devem ser analisados. Para isso, limiares ou outros critérios podem ser usados.

2.2.4.1 Método de Correspondência por Correlação

A técnica de correlação baseia-se na medida de similaridade entre a janela de referência e a janela de pesquisa, calculada por um fator de correlação normalizado (ρ), definido em Kraus (1993) como:

$$\rho = \frac{\sigma_{RP}}{\sigma_R \sigma_P} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)(g_P(x_i, y_j) - \bar{g}_P))}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)^2 * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_P(x_i, y_j) - \bar{g}_P)^2}} \quad (13)$$

sendo:

σ_{RP} - covariância entre as janelas de referência e de pesquisa;

σ_R - desvio-padrão da janela de referência (*template*).

σ_P - desvio-padrão da janela de pesquisa;

(n, m) : dimensão das janelas de referência e pesquisa;

$g_R(x_i, y_j)$: nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de referência;

$g_P(x_i, y_j)$: nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de pesquisa;

\bar{g}_R : média dos níveis de cinza da janela de referência;

\bar{g}_P : média dos níveis de cinza da janela de pesquisa.

Este fator de correlação é determinado para cada posição da janela de pesquisa na área de busca. O fator de correlação varia de -1 a 1 . O valor 1 corresponde a medida de similaridade máxima, o valor 0 indica que não há correlação entre as janelas e o valor -1 indica correlação inversa.

2.2.4.2 Correspondência pelo Método dos Mínimos Quadrados

O princípio fundamental do processo de correspondência pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é a minimização das diferenças dos níveis de cinza entre as janelas de referência e de pesquisa, sendo as diferenças geométricas e radiométricas os parâmetros a serem determinados num processo de ajustamento. Neste sentido, tais parâmetros são ajustados de tal forma que a diferença dos níveis de cinza entre as janelas seja mínima.

2.2.4.2.1 Modelo Matemático

Na Seção 2.2.3.2 foi apresentado um modelo de correlação para estimar as componentes de translação radiométrica para a janela de referência. Nesta seção serão considerados, além das componentes radiométricas, parâmetros geométricos para correlacionar a janela de referência na imagem de pesquisa a um nível subpixel.

Sejam $f(x, y)$ e $g(x, y)$ as funções bidimensionais discretas que representam respectivamente as janelas de referência (*template*) e de pesquisa, a

equação fundamental para o processo de correspondência de imagens é dado como (GRUEN, 1996):

$$f(x, y) - e(x, y) = g(x, y) \quad (14)$$

sendo $e(x, y)$ os ruídos.

No contexto do Método dos Mínimos Quadrados, a equação 14 pode ser considerada como não linear, sendo as observações $f(x, y)$ expressas em função de $g(x, y)$, cuja localização na imagem da direita necessita ser estimada.

A função $g(x, y)$ na equação 14 deve ser linearizada:

$$f(x, y) - e(x, y) = g^0(x, y) + \frac{\partial g^0(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial g^0(x, y)}{\partial y} dy \quad (15)$$

com:

$g^0(x, y)$: valores iniciais para a janela de pesquisa;

$$dx = \frac{\partial x}{\partial p_i} dp_i;$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial p_i} dp_i.$$

sendo p_i os parâmetros de transformação que serão definidos adiante.

Com intuito de obter a melhor solução, parâmetros que modelam a forma e deslocamentos posicionais, assim como correções radiométricas, devem ser introduzidos ao modelo. Tais parâmetros devem ser considerados devido a uma variedade de fatores, como: diferenças de iluminação e reflectância entre as imagens; imperfeições da câmara; digitalização das fotografias e; distorções geométricas nas imagens. Neste sentido, uma transformação geométrica deve ser aplicada. Para isso, supõe-se que o terreno amostrado pelas janelas de

correspondência seja aproximadamente plano e, por conseguinte, a correspondente imagem pode ser descrita por uma transformação projetiva (oito parâmetros) entre os espaços imagem e objeto. Como a área amostrada pelas janelas de correspondência é muito pequena em relação a área total da imagem, a transformação projetiva pode ser aproximada por uma transformação afim (seis parâmetros). Com os parâmetros da transformação afim e os parâmetros radiométricos r_s (deslocamento) e r_t (escala), a equação 15 resulta em (GRUEN, 1996):

$$f(x, y) - e(x, y) = g^0(x, y) + g_x da_1 + g_x x_0 da_2 + g_x y_0 da_3 + g_y da_4 + g_y x_0 da_5 + g_y y_0 da_6 + r_s + g^0(x, y) r_t \quad (16)$$

sendo:

(da_1, \dots, da_6) : parâmetros da transformação afim;

g_x : gradiente na direção x:

$$g_x = \frac{\partial g^0(x, y)}{\partial x} \quad (17)$$

g_y : gradiente na direção y:

$$g_y = \frac{\partial g^0(x, y)}{\partial y} \quad (18)$$

Os parâmetros são estimados pelo Método dos Mínimos Quadrados baseado no Método Paramétrico. O modelo matemático do tipo explícito, apresentado na equação (16), podendo ser tratado pelo Método Paramétrico (GEMAEL, 1994):

$$L_a = F(X_a) \quad (19)$$

Com n observações e u parâmetros, o vetor solução dos Mínimos Quadrados para o Método Paramétrico é dado como:

$${}_u X_1 = -\left({}_u A_{n n}^T P_{n n} A_u\right)^{-1} {}_u A_{n n}^T P_{n n} L_1 \quad (20)$$

com: $P = I \rightarrow$ observações não-correlacionadas e de mesma precisão.

A : matriz das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0}$$

$$L = L_0 - L_b \quad (21)$$

$L_0 = F(X_0)$: vetor dos valores aproximados;

L_b : vetor dos valores observados – níveis de cinza da janela de referência;

Após a estimação dos parâmetros, a transformação é aplicada e a janela de correlação é reamostrada (Em geral, usando a interpolação bilinear – ver Seção 4.3) para os novos valores de coordenadas, e o processo iterativo é iniciado. As iterações finalizam quando o critério de convergência adotado é atingido.

2.2.5 Outros Métodos de Correspondência de Imagens

Além dos métodos de correspondência baseados em área abordados neste trabalho, existem os métodos baseados em feições e nas relações entre as entidades correlacionadas.

O método de correspondência por feições emprega como entidades conjugadas feições extraídas das imagens. Estas feições incluem pontos (cantos e feições circulares), bordas e regiões.

O processo de correspondência estrutural (*matching relational*) é baseado nas relações de similaridade entre as entidades correlacionadas. Este método é basicamente composto de três etapas: extração das feições, estabelecimento das descrições relacionais e definição da estratégia de correspondência.

Maiores detalhes sobre os métodos de correspondência de imagens baseado em feições e nas relações estruturais podem ser encontrados em Schenk (1999).

CAPÍTULO III

ORIENTAÇÃO DE IMAGENS

3.1 ORIENTAÇÃO DIRETA DO SENSOR

3.1.1 Características Gerais

O georreferenciamento direto, ou orientação direta do sensor, consiste na determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara no instante de cada exposição fotográfica, durante a trajetória de voo. Isso é possível por meio da integração entre os sistemas de posicionamento por satélites (GPS – “*Global Positioning System*”) e os sistemas de navegação inercial (INS – “*Inertial Navigation System*”). Fundamentalmente, o GPS é usado a bordo da aeronave para a determinação das coordenadas dos CP’s (Centros Perspectivos) da câmara durante as exposições fotográficas. Os sistemas inerciais são responsáveis por fornecer continuamente a atitude do sensor ao longo da trajetória de voo.

O GPS é um sistema de posicionamento por rádio-navegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD – Department of Defense*), para fins de navegação, posicionamento geodésico e topográfico. O sistema é composto por vinte e quatro satélites operacionais distribuídos em seis planos orbitais com um ângulo de cinquenta e cinco graus em relação ao Equador. Seu período de passagem é de doze horas siderais. Esta configuração permite que a qualquer hora e em qualquer lugar da superfície terrestre

o usuário tenha à disposição no mínimo quatro satélites (número mínimo de satélites necessário para realizar o posicionamento) para serem utilizados. Em relação aos levantamentos geodésicos convencionais (Poligonação, Irradiação, entre outros), o GPS apresenta a vantagem de não necessitar da intervisibilidade entre as estações, além de poder ser utilizado sob quaisquer condições climáticas (MONICO, 2000).

O princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medição de distâncias entre o receptor e os satélites. Conhecendo-se as coordenadas dos satélites num dado sistema de referência, é possível obter as coordenadas da antena do receptor no mesmo referencial.

De acordo com Monico (2000), há diferentes técnicas para se determinar a posição de um ponto sobre a superfície terrestre, dentre as quais pode-se citar o posicionamento por ponto (a posição do ponto é determinada no sistema de referência WGS – 84 (World Geodetic System – 1984), através das efemérides transmitidas pelos satélites), o posicionamento relativo (a posição do ponto é determinada em relação a outro, cujas coordenadas são conhecidas) e a técnica *DGPS* (“*Differential GPS*”, na qual as coordenadas de um ponto são determinadas a partir de correções e variações enviadas por rádio de um outro ponto de posição conhecida).

No caso da orientação direta do sensor, são empregadas as técnicas de posicionamento relativo e DGPS:

Posicionamento relativo: deve-se dispor de no mínimo dois receptores GPS, ou então utilizar uma das estações de referência (Ex: RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) como estação base. Os métodos de posicionamento relativo podem ser: posicionamento estático, estático rápido, semicinemático ou cinemático. No posicionamento cinemático, adotado na

orientação direta do sensor, um dos receptores ocupa uma estação de coordenadas conhecidas (base) e o outro rastreia as posições de interesse. Neste método, os dados são obtidos após a coleta (processados em escritório) ou durante a própria coleta (tempo real), a partir do qual deve ser utilizado um link de rádio para transmitir os dados simultaneamente.

DGPS: baseia-se na utilização de um receptor estacionário (base) em uma estação com coordenadas conhecidas, rastreando todos os satélites possíveis. 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. Tais correções são possíveis de serem obtidas, pois as coordenadas da estação base são conhecidas. Se a estação base estiver localizada nas proximidades da região de levantamento, há uma forte correlação entre os erros calculados na estação base e os erros da estação móvel. Sendo assim, as correções podem ser enviadas à estação móvel por meio de link de rádio para corrigir suas posições ou observações coletadas.

O sistema inercial é composto fundamentalmente por uma unidade de medida inercial (IMU) e um processador de navegação. A unidade inercial é composta por três acelerômetros que medem acelerações lineares com respeito a um referencial inercial, três giroscópios (ou giros) que medem razões angulares sofridas pela IMU, além de sensores auxiliares para a calibração. Os principais sensores responsáveis pela determinação da atitude são os giros, que medem as inclinações da plataforma ao longo do tempo. Para isso, valores iniciais devem ser atribuídos. Isso é realizado no terreno antes da realização do vôo, quando a plataforma ainda se encontra estável. Nestas condições, os giros e os acelerômetros são calibrados para determinar suas inclinações e desvios (BURMAN, 1999).

Neste contexto, a integração GPS/INS pode ser uma ferramenta poderosa. O sistema inercial pode complementar o GPS fornecendo as informações de posição inicial e de velocidade após a perda de sinal do receptor. Mesmo quando a visibilidade dos satélites é insuficiente, o INS pode fornecer informações contínuas de trajetória. Por outro lado, o bom desempenho do sistema GPS pode suplementar o sistema de navegação inercial por meio da estimação acurada do comportamento de seus erros ao longo do tempo. Estes erros estão relacionados ao problema de deriva das informações de trajetória inerente aos sistemas inerciais. Os erros internos do INS são modelados como desvios nos giros e deslocamentos nos acelerômetros, e são corrigidos pelo método de filtragem Kalman, a partir das informações de posição provenientes do GPS. (CRAMER e STALLMANN, 2002).

O principal objetivo do georreferenciamento direto, ou seja, determinação direta dos parâmetros de orientação exterior, é o de minimizar, ou mesmo eliminar a necessidade de pontos de controle para orientar as imagens. Em outras palavras, os parâmetros de orientação exterior serão estimados diretamente por sensores de bordo, e não indiretamente, por meio dos pontos de controle disponíveis. O fato é que o método, que independe da disponibilidade de pontos de controle, tem vantagens econômicas, principalmente em áreas de acesso restrito.

Para melhor caracterizar os sistemas GPS e INS, a Tabela 1 mostra as principais características de cada um deles.

TABELA 1: Tabela comparativa entre os sistemas GPS e INS.

| | GPS | INS |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| Princípio de observação | Rádio-freqüência | Leis físicas |
| Observações | Intervalos (atrasos de tempo) | Acelerações e variações angulares |
| Parâmetros de saída | Tempo-posição-velocidade | Posição-velocidade-atitude |
| Erros (comprimento de onda largo) | Baixo | Alto |
| Erros (comprimento de onda curto) | Alto | Baixo |
| Amostragem de freqüência | 1 Hz – 10 Hz | ≥ 50 Hz |
| Operação | Depende de serviço externo | Autônomo |
| Disponibilidade | Visibilidade dos satélites | Todo tempo |

3.1.2 Georreferenciamento do Sensor de Imageamento

A orientação fornecida pelo módulo GPS/INS é fisicamente separada da câmara, sendo que translações e rotações estão presentes e devem ser consideradas. Em geral, o deslocamento entre a antena GPS, o centro da unidade de medida inercial e o centro perspectivo da câmara são medidos *a priori* e as correspondentes translações são consideradas durante os processamentos dos dados. Dessa forma, a informação de posição final fornecida pelo GPS/INS refere-se diretamente ao centro perspectivo da câmara. Com base na Figura 10, a equação geral para o georreferenciamento direto o qual transforma as coordenadas de pontos referenciados ao sistema fotogramétrico (P) para o correspondente sistema cartesiano terrestre local (L) é dada por (CRAMER e STALLMANN, 2002):

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_L + \lambda * R_B^L(\omega, \varphi, \kappa) * \Delta R_P^B(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa) * \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix}_P \quad (22)$$

com:

$r_i^L = (X_P, Y_P, Z_P)_L$: vetor com as coordenadas de pontos referenciados ao sistema cartesiano terrestre local;

$r_i^P = (x_p, y_p, -f)_P$: vetor com as coordenadas de pontos no sistema fotogramétrico;

$r_L^P = (X_0, Y_0, Z_0)_L$: vetor correspondente à translação entre o sistema fotogramétrico (P) e o sistema cartesiano terrestre local (L);

λ : fator de escala;

R_B^L : matriz de rotação entre o sistema definido pelo sensor inercial (B - *body-frame*) e o sistema cartesiano terrestre local (L);

ΔR_P^B : função de não alinhamento (matriz de rotação) entre o sistema fotogramétrico (P) e o sistema definido pelo sensor inercial (B). Esta rotação é necessária visto que as medidas dos ângulos de rotação referem-se ao sistema definido pelo sistema inercial (B) e não ao sistema fotogramétrico (P). Apesar de um primeiro alinhamento entre os sistemas ser realizado durante a instalação dos sensores, pequenos desvios permanecem e tem de ser compensados numericamente.

Na equação 22, os ângulos de rotação (ω, φ, κ) e as componentes posicionais (X_0, Y_0, Z_0) são determinados pelos sensores de orientação direta (GPS+INS), enquanto que as correções ($\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa$) são estimadas em processos de calibração.

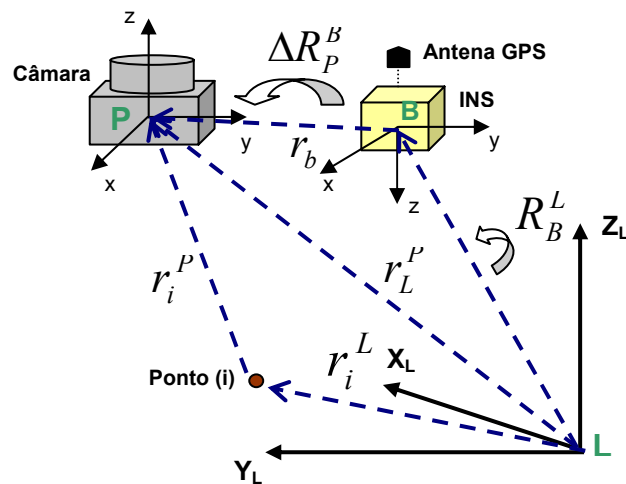


FIGURA 10: Elementos do georreferenciamento direto.

Segundo Cramer e Stallmann (2002), há um fator que deve ser considerado: os ângulos de orientação fornecidos pela integração GPS/INS não são comparáveis com os ângulos fotogramétricos (ω, φ, κ) e então não podem ser usados diretamente para construir a matriz de rotação R_B^L . Os sensores de orientação foram inicialmente desenvolvidos para propósitos de navegação e as atitudes calculadas são interpretadas como ângulos de navegação r (roll), p (pitch) e y (yaw). Estes ângulos de rotação são obtidos da matriz $R_B^{N(t_i)}$ no tempo t_i , que relaciona o sistema da unidade inercial (B) com o sistema de navegação (N), o qual consiste num sistema local cuja origem está no centro do eixo de coordenadas do sensor inercial, como mostra a Figura 11. Como o INS move-se de forma solidária com a superfície da Terra, este sistema não é constante ao longo do tempo. O eixo x do sistema local de navegação (N) aponta para a direção Norte local, o eixo z segue na direção vertical e o eixo y deixa o sistema dextrógiro. Por outro lado, os ângulos fotogramétricos relacionam o sistema fotogramétrico (P) com o sistema cartesiano terrestre local (L).

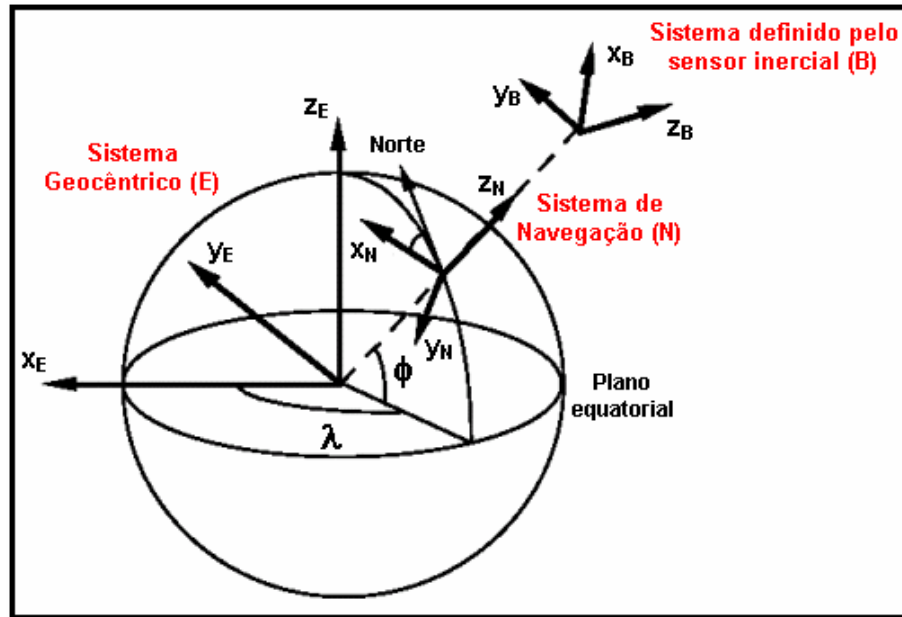


FIGURA 11: Sistemas de Referência usados na navegação inercial (adaptado de MOSTAFA e HUTTON (2001)).

Uma possível solução para transformar os ângulos de navegação para os ângulos fotogramétricos é utilizar um sistema de coordenadas cartesiano geocêntrico fixo (E), para conectar o tempo variável do sistema local de navegação $N(t_i)$, de acordo com a variação das coordenadas geográficas (λ_i, ϕ_i) , e o sistema cartesiano terrestre local (L):

$$R_B^L(\omega, \varphi, \kappa) = R_{N(t_0)}^L(\phi + 90^\circ, \lambda) * R_E^{N(t_0)}(\lambda_0, \phi_0) * R_{N(t_i)}^E(\lambda_i, \phi_i) * R_B^{N(t_i)}(r, p, y) \quad (23)$$

sendo:

$R_B^L(\omega, \varphi, \kappa)$: matriz de rotação para os ângulos fotogramétricos;

$R_{N(t_0)}^L = R_y(\phi + 90^\circ) * R(\lambda)$: matriz de rotação para alinhar as diferentes direções dos eixos entre o sistema de navegação local (N) e o sistema cartesiano terrestre local (L);

$R_E^{N(t_0)}$: matriz de rotação entre o sistema cartesiano geocêntrico (E) e o sistema de navegação local (N) para o instante t_0 ;

$R_{N(t_i)}^E$: matriz de rotação entre o sistema de navegação local (N) e o sistema cartesiano geocêntrico (E) para o instante t_i ;

$R_B^{N(t_i)}(r, p, y)$: matriz de rotação para os ângulos de navegação no instante t_i .

Um dos grandes problemas na orientação de imagens é o sistema de calibração, pois discrepâncias entre o modelo matemático adotado e a realidade física durante a formação da imagem causam erros na determinação dos pontos no espaço objeto. No caso do georreferenciamento direto, o modelo de geometria interna da câmara é fundamental, visto que o sistema GPS/INS fornece medidas diretas da posição e orientação física da câmara durante a exposição. Além destes parâmetros para calibração e alinhamento dos sensores, parâmetros adicionais para subseqüentes correções nas medidas diretas de posição e atitude são consideradas (CRAMER e STALLMANN, 2002):

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{bmatrix} + \sum_{i=0}^n \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} * t^i \qquad \begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega' \\ \varphi' \\ \kappa' \end{bmatrix} + \sum_{i=0}^n \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} * t^i \quad (24)$$

sendo:

(X_0, Y_0, Z_0) : coordenadas do centro perspectivo da câmara referenciadas ao sistema cartesiano terrestre local, corrigidas das correções adicionais variantes com o tempo;

(X'_0, Y'_0, Z'_0) : coordenadas do centro perspectivo da câmara referenciadas ao sistema cartesiano terrestre local, obtidas pelo GPS;

$(\omega, \varphi, \kappa)$: ângulos de rotação da câmara referenciados ao sistema cartesiano terrestre local (L), corrigidos das correções adicionais variantes com o tempo;

$(\omega', \varphi', \kappa')$: ângulos de rotação da câmara referenciados ao sistema cartesiano terrestre local (L), obtidos pelo GPS/INS;

t^i : tempo;

(a_i, b_i, c_i) : termos de correção para posição;

(u_i, v_i, w_i) : termos de correção para atitude;

n : ordem da correção polinomial.

Os termos de deslocamentos e correções lineares são introduzidos para eliminar as influências dos deslocamentos de posição e atitude remanescentes. Apesar de tais erros não serem esperados em sensores de alta qualidade, alguns fatores como geometria desfavorável dos satélites, linhas de bases extensas, erros nas coordenadas da estação de referência ou no centro de fase da antena, podem causar erros nas posições calculadas pelos sensores integrados. Além disso, se a qualidade dos dados fornecidos pelo GPS não forem suficientes para eliminar completamente os erros sistemáticos dos sistemas inerciais, a qualidade na determinação da atitude será afetada. Isto mostra a importância dos termos de correções apresentados na equação 24.

3.1.3 Acurácia dos Parâmetros de Orientação Direta

De acordo com Seara (2002), o modelo 310 GPS/INS, da APPLANIX, fornece dados com acurácia aproximada de: 0,1-0,3m para as coordenadas do CP e 1-2' para os ângulos de atitude do sensor.

Experimentos realizados por Cramer e Schade (1995) com o sensor inercial de baixo custo (Aproximadamente 33 mil reais) *Motionpak*, fabricado pela empresa *BEI/Systron Donner*, integrado a um receptor GPS *Ashtech 3DF*, resultaram em dados com qualidade de: 20' para o ângulo ω , 3' para φ e 2' para κ .

Cramer et al (1999) mostraram experimentos realizados com o sistema *APPLANIX POS/DG310*, que é composto por um GPS de dupla frequência *Novatel Millennium* e um sistema inercial *IMU Litton LR 86*, além de um software para processamento dos dados baseado na filtragem *Kalman*. Com este equipamento, os parâmetros de orientação exterior obtidos apresentaram acurácia na ordem de 0,1-0,2m para posição (X_0, Y_0, Z_0), 7"-12" para os ângulos ω e φ e, 15" para o ângulo κ ;

Segundo Mostafa e Hutton (2001), o sistema de navegação *POS/ACTM*, da *APPLANIX*, proporciona dados com qualidade em torno de 0,3m para posição (CP) e 2-4' para os parâmetros de atitude da câmara.

A acurácia dos parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação direta (GPS+INS) depende dos sistemas utilizados. Em geral, os sistemas usados para orientação de imagens fornecem parâmetros com qualidade em torno de 0,1-0,3m para as coordenadas do CP (X_0, Y_0, Z_0), e 30"- 60" para os ângulos de rotação (ω, φ, κ), de acordo com Colomina (1999).

3.1.4 Considerações Finais

Embora os sistemas GPS e INS tenham custos elevados para as empresas de mapeamento, diversas são as vantagens oferecidas por esta integração durante a realização do voo (TOMMASELLI, 2001):

- Permitem a determinação mais rápida dos parâmetros de orientação exterior, pois a etapa de aerotriangulação pode ser eliminada ou inteiramente automatizada;
- Eliminam as limitações de trajetória do voo, não sendo obrigatória a montagem de um bloco, o que permite aplicações como monitoramento de linhas de transmissão, projetos de estradas e outros;
- Mesmo no caso de ser realizada a Aerotriangulação, os algoritmos de correlação funcionarão com melhor rendimento;

3.2 ORIENTAÇÃO INDIRETA DO SENSOR

3.2.1 Considerações Iniciais

Para formar um modelo estereoscópico com um par de imagens, e nele realizar medidas de qualidade, torna-se necessário orientar as imagens, por meio dos processos de orientação interior e orientação exterior.

3.2.2 Orientação Interior

A orientação interior (OI) de uma câmara fotogramétrica tem como objetivo a reconstrução dos feixes de raios internos da câmara no momento de tomada das fotografias. Isto é realizado a partir de dados presentes no certificado de calibração da câmara e parâmetros que definem os efeitos sistemáticos.

Em geral é usada uma transformação geométrica para transformar as coordenadas do sistema intermediário (Ex: comparador) para o sistema definido pelas marcas fiduciais, e por sua vez corrigir as deformações do filme.

Quando se trata de câmaras digitais, não há a necessidade de transformações geométricas, pois o sensor é um dispositivo com deformações desprezíveis e o sistema de coordenadas das imagens digitais é considerado sem deformações. Neste caso é necessário realizar uma translação entre os sistemas da imagem e o sistema intermediário de centro da imagem, uma reflexão do eixo de coordenadas vertical e aplicado um fator de escala equivalente ao tamanho do pixel (Ver seção 2.1.2).

3.2.3 Efeitos Sistemáticos

No processo de formação das imagens há fatores que causam desvios na trajetória original do feixe de raios luminosos. Em virtude destes efeitos, as imagens apresentam distorções e, por conseguinte, as coordenadas das entidades medidas não são fidedignas.

Estes efeitos são sistemáticos e com causas conhecidas e, sendo assim, podem ser modelados matematicamente a fim de minimizar suas influências nas medidas realizadas nas imagens.

Em câmaras digitais, os principais efeitos sistemáticos a serem considerados são:

- ✓ Deslocamento do ponto principal;
- ✓ Distorções das lentes;
- ✓ Refração fotogramétrica.

3.2.3.1 Deslocamento do Ponto Principal

Este deslocamento ocorre porque o ponto principal (pp) raramente coincide com o centro fiducial ou centro do sensor.

De acordo com Wolf e Dewitt (2000), as equações fotogramétricas que utilizam fotocoordenadas são baseadas na geometria projetiva e assumem como origem das fotocoordenadas o ponto principal. Com isso, é teoricamente correto corrigir as fotocoordenadas para o sistema definido pelo ponto principal. A correção é aplicada após uma translação aplicada sobre as coordenadas:

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

sendo:

(x_i, y_i) : coordenadas no referencial de centro da imagem;

(x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal no referencial de centro da imagem (obtidas no processo de calibração da câmara);

(x_f, y_f) : coordenadas no referencial fotogramétrico;

3.2.3.2 Distorção das lentes

A distorção das lentes é a aberração mais relevante em trabalhos fotogramétricos. Enquanto as outras aberrações afetam a qualidade da imagem e devem ser removidas na fabricação das lentes, as distorções óticas afetam diretamente a acurácia métrica da imagem.

As equações matemáticas que são usadas para modelar as distorções óticas são basicamente formadas de duas componentes: distorção radial e distorção descentrada (WOLF e DEWITT, 2000).

3.2.3.2.1 Distorção Radial Simétrica

Segundo Mikhail et al (2001), a *distorção radial* é o deslocamento radial de um ponto na imagem de sua posição teoricamente correta, ou melhor, uma mudança no ângulo entre o raio de luz e o eixo ótico. A distorção radial é determinada no processo de calibração da câmara. Uma curva de distorção radial é mostrada na Figura 12, sendo as distorções (em mm) apresentadas em função da distância radial do ponto principal.

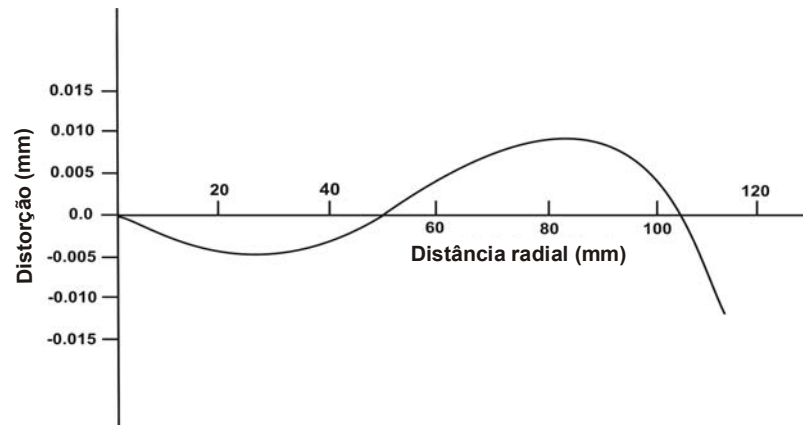


FIGURA 12: Curva de distorção radial.

A distorção radial pode ter valores positivos e negativos. Os valores positivos proporcionarão à uma imagem quadrada bordas arredondadas externamente em relação ao centro (convexa), e os valores de distorção negativos bordas curvadas para o interior em relação aos cantos (côncava), como mostra a Figura 13.

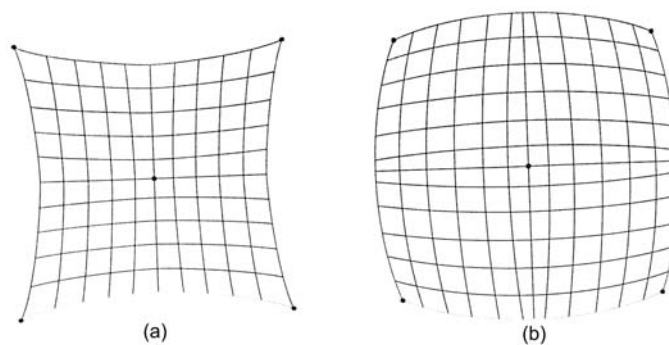


FIGURA 13: Distorção radial negativa (a) e positiva (b).

Um modo de expressar a distorção radial (δ_r) é por meio do modelo de Conrady-Brown (FRYER, 1996):

$$\delta r = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + \dots \quad (26)$$

sendo:

k_1, k_2, k_3 : coeficientes do polinômio obtidos a partir da curva de distorção radial.

$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$: raio distante do ponto principal, sendo:

(x, y) : coordenadas do ponto referidas ao centro da imagem;

(x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal referidas ao centro da imagem.

A distorção radial δr é expressa em duas componentes, de acordo com os eixos coordenados x e y:

$$\begin{aligned} \delta r_x &= \frac{\delta r (x - x_0)}{r} \\ \delta r_y &= \frac{\delta r (y - y_0)}{r} \end{aligned} \quad (27)$$

Para corrigir as coordenadas de um ponto, é necessário subtrair as coordenadas observadas (x, y) pelas componentes da distorção radial simétrica neste ponto $(\delta r_x, \delta r_y)$.

3.2.3.2.2 Distorção Descentrada

De acordo com Andrade (1998), a distorção descentrada é causada pela impossibilidade de alinhamento entre os eixos óticos que compõem a objetiva,

causando um deslocamento na imagem. Este erro é composto pelas componentes tangencial e radial assimétrica.

Para simplificar os cálculos, estas componentes foram transformadas em componentes δx , δy , referenciadas a um sistema de coordenadas cartesiano (BROWN, 1966 *apud* ANDRADE, 1998).

Dessa forma, o modelo matemático que expressa esta distorção é dado por:

$$\begin{aligned}\delta x &= P_1 \left[r^2 + 2(x - x_0)^2 \right] + 2P_2 (x - x_0)(y - y_0) \\ \delta y &= P_2 \left[r^2 + 2(y - y_0)^2 \right] + 2P_1 (x - x_0)(y - y_0)\end{aligned}\quad (28)$$

sendo:

P_1, P_2 : coeficientes cujos valores são determinados no processo de calibração da câmara.

A correção das coordenadas (x, y) é realizada por meio da subtração das componentes da distorção descentrada $(\delta x, \delta y)$.

Vale a pena ressaltar que a influência dos parâmetros de distorção descentrada não é muito significativa, quando comparado com os demais efeitos sistemáticos (GALO et al, 1999).

3.2.3.3 Refração Fotogramétrica

A Figura 14 mostra como um raio de luz é refratado pela atmosfera. De acordo com a Lei de Snell, um raio de luz é refratado quando atravessa ambientes de índices de refração distintos. O índice de refração do ar decresce a medida que o ar torna-se menos denso com o aumento da altitude. Dessa forma, as

densidades diferentes na atmosfera proporcionam refrações nos raios de luz que atravessam estes meios. Estas refrações causam um deslocamento radial (dr) no ponto na imagem, que pode ser calculado com base num modelo de atmosfera, dado por (SCHENK, 1999):

$$dr = k \left(r + \frac{r^3}{f^2} \right) \quad (29)$$

sendo:

$$k = \left(\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h^2}{(h^2 - 6h + 250) * H} \right) * 10^{-6} \quad (30)$$

sendo:

r : distância do ponto imageado para o ponto principal;

f : distância focal da câmara;

H : altitude de vôo em Km;

h : elevação do terreno em Km.

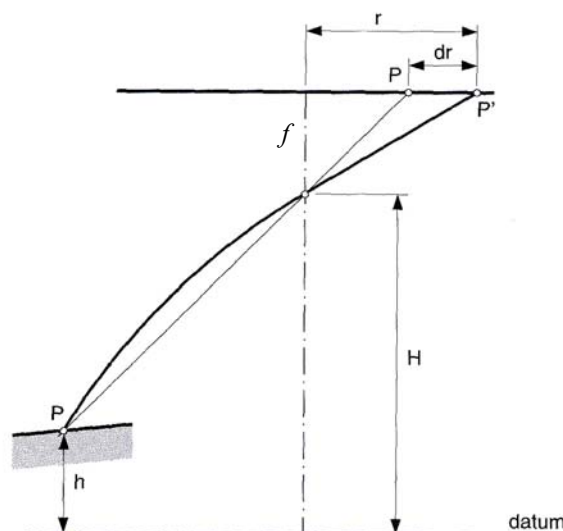


FIGURA 14: Refração dos raios de luz oblíquos que atravessam a atmosfera.

Os deslocamentos nas coordenadas (x, y) do ponto imageado são dados por:

$$\begin{aligned} dr_x &= \frac{x}{r} dr \\ dr_y &= \frac{y}{r} dr \end{aligned} \tag{31}$$

3.2.3 Orientação Exterior

A orientação exterior tem como objetivo a recuperação da posição e atitude de cada fotografia segundo o referencial do espaço objeto. Pode-se dizer que uma imagem está externamente orientada quando são conhecidas as coordenadas do centro perspectivo (X_0, Y_0, Z_0) e os ângulos de atitude da câmara $(\omega, \varphi, \kappa)$.

Dessa forma, em um estereomodelo a orientação externa consiste na determinação de doze parâmetros, calculados através da triangulação das duas imagens. Existe ainda a opção de determinar tais parâmetros em cada foto isoladamente, quando se dispõe de no mínimo três pontos de controle (Resseção Espacial).

No caso particular deste trabalho, os parâmetros de orientação externa da câmara já foram determinados após o processamento dos dados de orientação fornecidos pelos sensores de bordo, e sendo assim, a metodologia abordada não tratou explicitamente da orientação exterior, mas sim de um “refinamento” da solução com base na restrição de coplanaridade, a fim de eliminar a paralaxe vertical do modelo.

3.2.3.1 Modelo de Coplanaridade

A restrição de coplanaridade implica que os dois centros perspectivos (CPs) das imagens que formam o par estereoscópico, um ponto no terreno e seus homólogos nas imagens pertençam ao mesmo plano, conforme mostra a Figura 15.

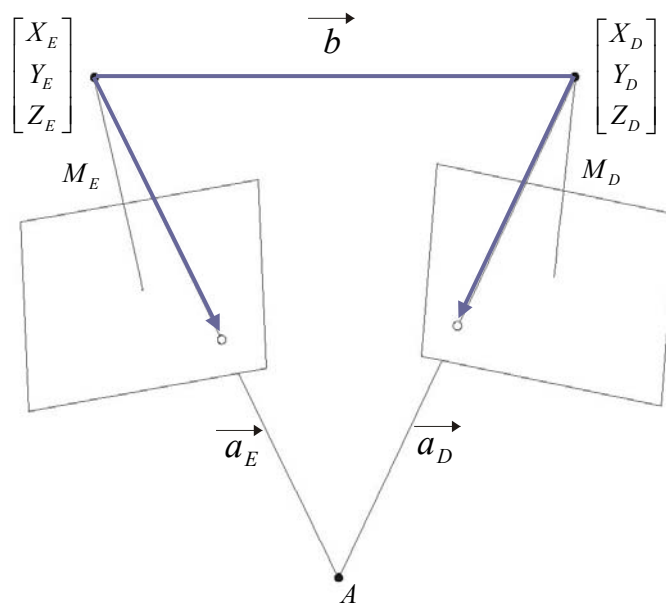


FIGURA 15: Geometria para a condição de Coplanaridade.

Pela condição de coplanaridade tem-se que:

$$\vec{b}(\vec{a}_E \times \vec{a}_D) = 0 \quad (32)$$

Como ilustrado na Figura 15, o vetor \vec{b} representa a aerobase (deslocamento entre os centros perspectivos), \vec{a}_E o vetor espaço objeto do ponto na imagem da esquerda e \vec{a}_D representa o vetor espaço objeto do ponto na imagem

da direita. As componentes desses três vetores são expressas por (MIKHAIL et al, 2001):

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_D - X_E \\ Y_D - Y_E \\ Z_D - Z_E \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\vec{a}_E = \begin{bmatrix} u_E \\ v_E \\ w_E \end{bmatrix} = M_E^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_E \quad (34)$$

$$\vec{a}_D = \begin{bmatrix} u_D \\ v_D \\ w_D \end{bmatrix} = M_D^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}_D \quad (35)$$

sendo:

(X_E, Y_E, Z_E) : coordenadas do centro perspectivo da foto da esquerda no referencial do espaço objeto;

(X_D, Y_D, Z_D) : coordenadas do centro perspectivo da foto da direita no referencial do espaço objeto;

M_E : matriz de rotação da foto da esquerda;

M_D : matriz de rotação da foto da direita;

$(x, y, -f)_E$: coordenadas do ponto da foto da esquerda no sistema fotogramétrico;

$(x, y, -f)_D$: coordenadas do ponto da foto da direita no sistema fotogramétrico;

Com base no produto vetorial mostrado na equação 32, tem-se que:

$$\begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u_E & v_E & w_E \\ u_D & v_D & w_D \end{vmatrix} = 0 \quad (36)$$

$$b_x \cdot (v_E \cdot w_D - v_D \cdot w_E) + b_y \cdot (u_D \cdot w_E - u_E \cdot w_D) + b_z \cdot (u_E \cdot v_D - u_D \cdot v_E) = 0 \quad (37)$$

A equação de coplanaridade é usada para o cálculo da orientação relativa entre as imagens que compõem o estereopar. Isso é geralmente realizado fixando sete dos doze parâmetros de orientação exterior e calculando os outros cinco. O modelo de coplanaridade independe de pontos de apoio, uma vez que as coordenadas referenciadas ao espaço objeto não aparecem na equação (MIKHAIL et al, 2001).

Contudo, para o propósito deste trabalho, o modelo de coplanaridade foi adaptado, de tal forma que todos os parâmetros de orientação exterior $(X_E, Y_E, Z_E, \omega_E, \varphi_E, \kappa_E, X_D, Y_D, Z_D, \omega_D, \varphi_D, \kappa_D)$ sejam tratados como injunções de peso num ajustamento pelos Mínimos Quadrados, baseado no método combinado. Esta abordagem segue discutida na Seção 5.2.3 (Capítulo V).

CAPÍTULO IV

REAMOSTRAGEM EPIPOLAR

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Grande parte dos algoritmos de visão estereoscópica em Fotogrametria digital são baseados na amostragem de estereopares digitais em geometria epipolar. Isso expressa o fato de que as entidades conjugadas estão presentes na mesma linha nas imagens. Pode-se usar o termo *imagens normalizadas* para estereopares que satisfaçam esta condição e *Reamostragem Epipolar* ou *Normalização de Imagens* para o processo de geração das imagens normalizadas.

Para calcular as imagens normalizadas requer-se que as orientações interior e exterior das imagens sejam conhecidas. Então, estes parâmetros de orientação devem ser determinados inicialmente, exceto se uma câmara digital com orientação interior conhecida e uma plataforma com sistema de orientação direta (GPS/INS) tenham sido usadas. Contudo, como os parâmetros de orientação fornecidos pelos sensores de bordo não têm qualidade necessária para eliminar completamente a paralaxe vertical do modelo, torna-se necessário “refinar” tais parâmetros antes de normalizar o estereopar.

A vantagem das imagens normalizadas está relacionada à visualização do estereopar em sistemas fotogramétricos digitais, no sentido que o operador tem uma melhor visualização estereoscópica da cena. Além disso, a

utilização de imagens normalizadas simplifica o processo de correlação de imagens, pois as feições correlatas são confinadas na mesma linha nas imagens.

Para obter imagens normalizadas de suas posições originais, devem ser conduzidas algumas transformações, de tal forma que os eixos óticos das câmaras tornem-se perpendiculares à linha de base.

4.2 CÁLCULO DAS IMAGENS NORMALIZADAS

Com base na Figura 16, O' e O'' são as imagens da esquerda e da direita que compõem o estereopar, respectivamente. Da mesma forma, N' e N'' correspondem às imagens normalizadas. A transformação das imagens originais para as imagens normalizadas pode ser conduzida em duas etapas (SCHENK, 1999):

- As imagens são transformadas para suas posições verticais;
- A partir das imagens verticais, conduz-se a transformação para a posição normalizada.

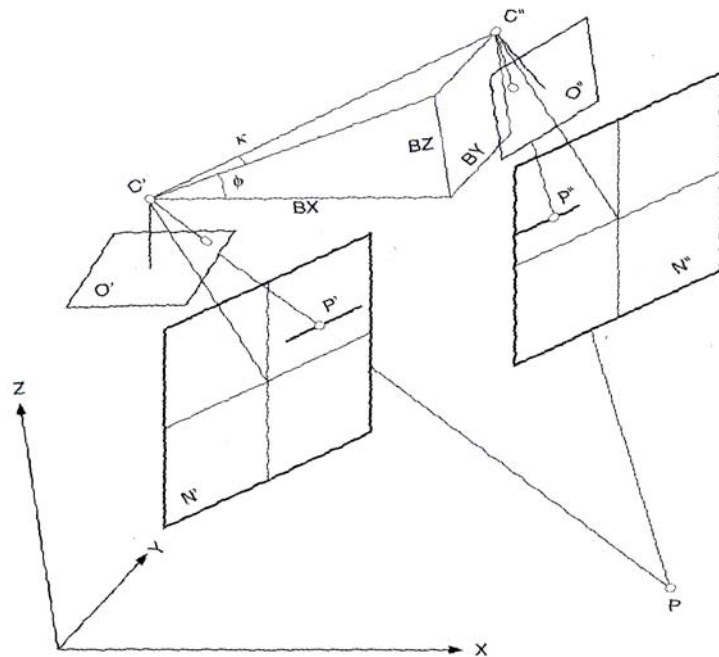


FIGURA 16: Relação entre as imagens originais e normalizadas (Fonte: Schenk, 1999).

4.2.1 Transformação das imagens originais para suas posições verticais

Esta transformação envolve a rotação com a matriz inversa da orientação exterior (R^T):

$$R = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} \quad (38)$$

com:

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}, \quad R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \text{ e } R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

sendo:

ω , φ , κ : parâmetros de orientação exterior da imagem.

Estas matrizes de rotação são calculadas para as duas imagens que compõem o estereopar, de acordo com seus parâmetros de orientação exterior.

4.2.2 Transformação das imagens verticais para as imagens normalizadas

A transformação para as posições normalizadas envolve rotações das imagens verticais em relação a base (B). A matriz de rotação da base R_b é determinada pelas direções espaciais da base no espaço objeto (MIKHAIL, 2001):

$$R_b = R_{\theta_x} R_{\theta_y} R_{\theta_z} \quad (40)$$

com:

$$\begin{aligned} \theta_z &= \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) \\ \theta_y &= \arctan\left(\frac{-B_z}{\sqrt{(B_x^2 + B_y^2)}}\right) \\ \theta_x &= \frac{\omega_E + \omega_D}{2} \end{aligned} \quad (41)$$

com:

$$\begin{aligned} B_x &= X_C'' - X_C' \\ B_y &= Y_C'' - Y_C' \\ B_z &= Z_C'' - Z_C' \end{aligned} \quad (42)$$

sendo:

(X'_C, Y'_C, Z'_C) : Coordenadas do centro perspectivo da imagem da esquerda no referencial do espaço objeto;

(X''_C, Y''_C, Z''_C) : Coordenadas do centro perspectivo da imagem da direita no referencial do espaço objeto;

A matriz de rotação normalizada R_n é obtida pelo produto entre a matriz de rotação da base (R_b) e a inversa da matriz de rotação da imagem para sua posição vertical (R^T):

$$R_n = R_b R^T \quad (43)$$

A matriz de rotação normalizada (R_n) deve ser determinada para ambas as imagens do estereopar, cada qual com sua matriz de rotação de orientação exterior (R).

As coordenadas referidas às imagens originais no sistema fotogramétrico (x_p, y_p) são transformadas para suas posições normalizadas (x_N, y_N) com base nas equações de colinearidade:

$$\begin{aligned} x_N &= -f \frac{m_{N_{11}} x_p + m_{N_{12}} y_p + m_{N_{13}} (-f)}{m_{N_{31}} x_p + m_{N_{32}} y_p + m_{N_{33}} (-f)} \\ y_N &= -f \frac{m_{N_{21}} x_p + m_{N_{22}} y_p + m_{N_{23}} (-f)}{m_{N_{31}} x_p + m_{N_{32}} y_p + m_{N_{33}} (-f)} \end{aligned} \quad (44)$$

sendo:

f : distância focal da câmara;

$m_{N_{11}} \dots m_{N_{33}}$: elementos da matriz de rotação normalizada R_n .

As coordenadas nas imagens normalizadas são transformadas para suas posições correlatas nas imagens originais por meio da transformação inversa, que é dada por:

$$\begin{aligned}x_P &= -f \frac{m_{N_{11}} x_N + m_{N_{21}} y_N + m_{N_{31}} (-f)}{m_{N_{13}} x_N + m_{N_{23}} y_N + m_{N_{33}} (-f)} \\y_P &= -f \frac{m_{N_{12}} x_N + m_{N_{22}} y_N + m_{N_{32}} (-f)}{m_{N_{13}} x_N + m_{N_{23}} y_N + m_{N_{33}} (-f)}\end{aligned}\tag{45}$$

As equações 44 são usadas para calcular os limites de cobertura das imagens normalizadas. Um *grid* é então definido com espaçamento relativo ao tamanho do pixel, e o processo de reamostragem é então conduzido pelas equações 45, a fim de definir as imagens normalizadas. Valores fracionais de x_P e y_P necessitarão de interpolações nas imagens originais, para obter os níveis de cinza correspondentes. Neste trabalho foi utilizado o método de interpolação bilinear, por proporcionar bons resultados a um custo computacional relativamente baixo.

4.3 INTERPOLAÇÃO BILINEAR

O conceito básico da interpolação bilinear é realizar a interpolação linear nas direções das linhas e colunas. Com base na Figura 17, pode-se estabelecer o modelo matemático para a interpolação bilinear.

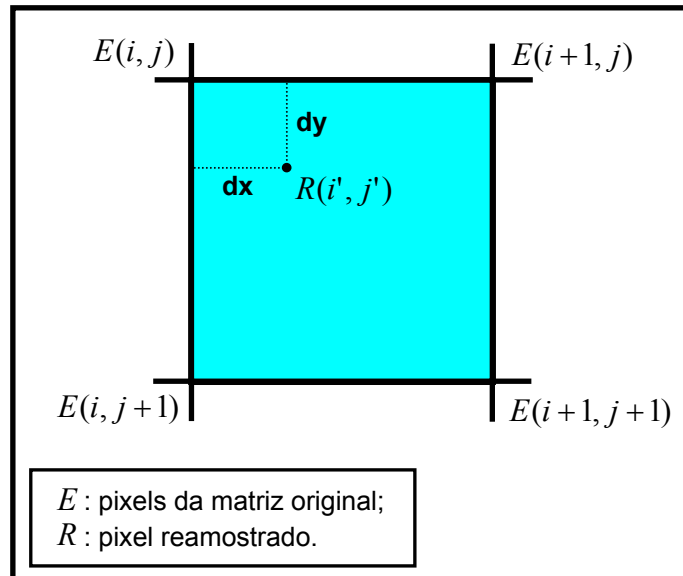


FIGURA 17: Representação do pixel reamostrado em relação à vizinhança na imagem original.

$$R(i', j') = (1 - dx) * (1 - dy) * E(i, j) + dx * (1 - dy) * E(i + 1, j) + dy * (1 - dx) * E(i, j + 1) + dx * dy * E(i + 1, j + 1) \quad (46)$$

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Nesta seção estão listados os equipamentos e programas computacionais que foram necessários à realização deste trabalho de pesquisa:

- Computador Pentium III, 600 MHz, 128 MB de memória RAM e 10GB de espaço em disco;
- Imagens digitais coletadas com as câmaras KODAK DCS420 e KODAK PROFESSIONAL PRO 14n (fonte: www.kodak.com.br);
- Imagens digitais (Câmara digital fabricada pela *Lockheed Martin Fairchild Semiconductors*) com dados de orientação direta, obtidos pela integração entre os sensores GPS *Trimble 4000SSI* e INS *Litton LN - 100*;
- Receptor GPS TRIMBLE 4600LS de dupla-frequência;
- Compilador *Borland C++ Builder 5*;
- Microsoft Office 2000 Standard;
- Paint Shop Pro 4;
- Sistema Fotogramétrico Digital *Socet Set* – LHSsystem.

5.2 MÉTODOS E DESENVOLVIMENTOS

5.2.1 Considerações Iniciais

De uma forma geral, os processos envolvidos na geração automática de estereomodelos com imagens digitais e dados de orientação direta do sensor estão apresentados no fluxograma a seguir (Figura 18).

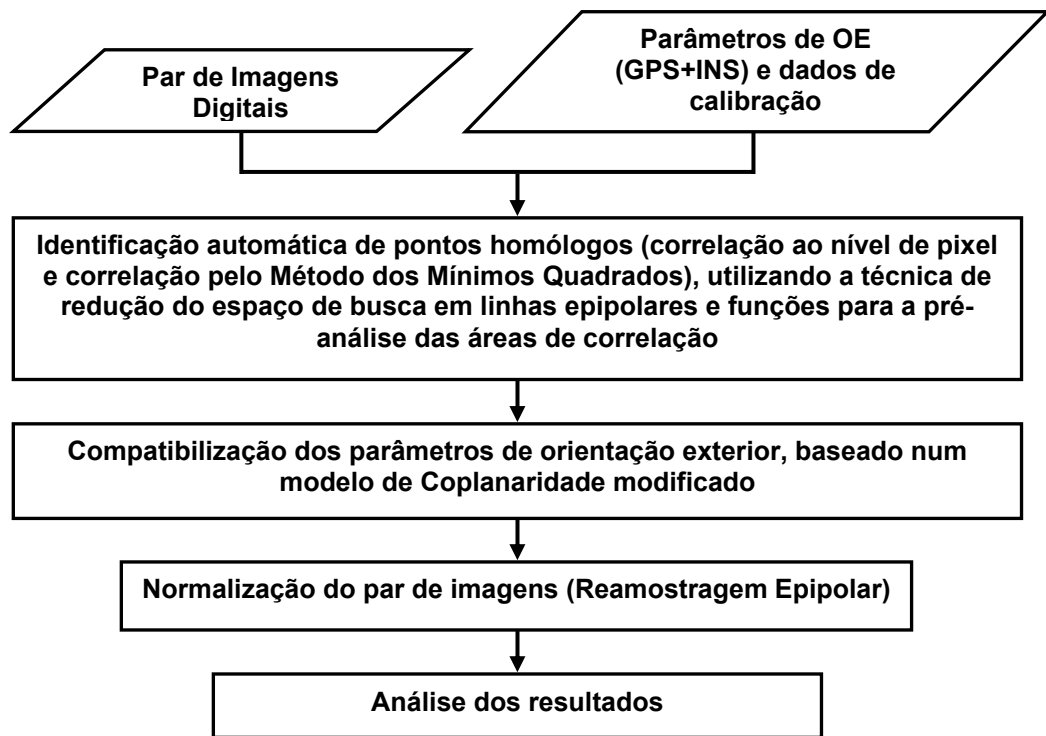


FIGURA 18: Processos envolvidos na geração automática de estereomodelos com imagens digitais georreferenciadas.

Este trabalho de pesquisa se baseia no estabelecimento de uma metodologia com conseqüente implementação de algoritmos computacionais para “refinar” os parâmetros de orientação exterior do estereopar, fornecidos pelos sensores integrados GPS/INS, a fim de eliminar a paralaxe vertical remanescente do

modelo. Tal paralaxe permanece porque os parâmetros de orientação direta não têm a acurácia necessária à total orientação do modelo (sem paralaxe vertical - p_y), conforme mostram Mostafa e Schwarz (2001); Colomina (1999) e Brzezinska (1999).

Para garantir a formação efetiva de um estereomodelo, foi desenvolvida uma metodologia baseada num modelo de coplanaridade modificado. Este modelo torna-se modificado no sentido em que os parâmetros de orientação exterior foram previamente determinados pelos sensores de bordo e, portanto, podem ser tratados como injunções de peso relativo à qualidade de sua determinação. No modelo de coplanaridade original as fotos são orientadas uma em relação a outra num referencial arbitrário da foto da esquerda. Neste caso, o modelo é tratado de forma diferente, sendo que os parâmetros de orientação exterior são normalizados pela restrição de coplanaridade num sistema de referência terrestre, no qual estes parâmetros foram determinados em vôo.

Neste sentido, os parâmetros de orientação direta são compatibilizados no ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, baseado no Método Combinado iterativo. Os valores observados correspondem a pontos identificados automaticamente no modelo pelas técnicas de correlação baseado em área. Vale ressaltar que foi desenvolvida uma metodologia na qual os pontos homólogos são identificados de forma totalmente automática, conforme já descrito na Seção 2.2.

Após a compatibilização dos parâmetros de orientação exterior é aplicado o processo de normalização do estereopar (Reamostragem Epipolar), no qual as imagens são reamostradas com base na geometria epipolar, a partir dos parâmetros de orientação ajustados. Este processo visa eliminar a paralaxe vertical no modelo e, por conseguinte, proporcionar uma melhor visualização estereoscópica

da cena e melhorar o processo de correlação (Espaço de busca reduzido em linhas epipolares) para uma subsequente geração de Modelos Digitais de Terreno.

5.2.2 Identificação Automática de pontos homólogos

Para compatibilizar os parâmetros de orientação exterior no ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, alguns pontos homólogos devem ser medidos no modelo. Conforme será visto mais adiante é necessário apenas um ponto medido no modelo para ajustar os parâmetros, uma vez que os doze parâmetros de orientação exterior são tratados como injunções de peso. Todavia, um número mais significativo de pontos traz mais confiabilidade ao processo, uma vez que pontos identificados incorretamente podem ser eliminados por meio de uma análise dos resíduos das observações ao final do ajustamento.

Neste trabalho, o que caracteriza a identificação dos pontos homólogos é a automação do processo. Os pontos são medidos de forma totalmente automática e, sendo assim, não há intervenção do operador. Neste sentido, foi desenvolvida uma metodologia para a definição da janela de referência, foi adaptada a técnica de redução do espaço de busca em linhas epipolares e utilizadas as técnicas de correlação por área para estimar as posições dos pontos homólogos. Para estabelecer de uma forma mais clara o processo de identificação automática de pontos homólogos, o fluxograma a seguir (Figura 19) mostra as etapas envolvidas.

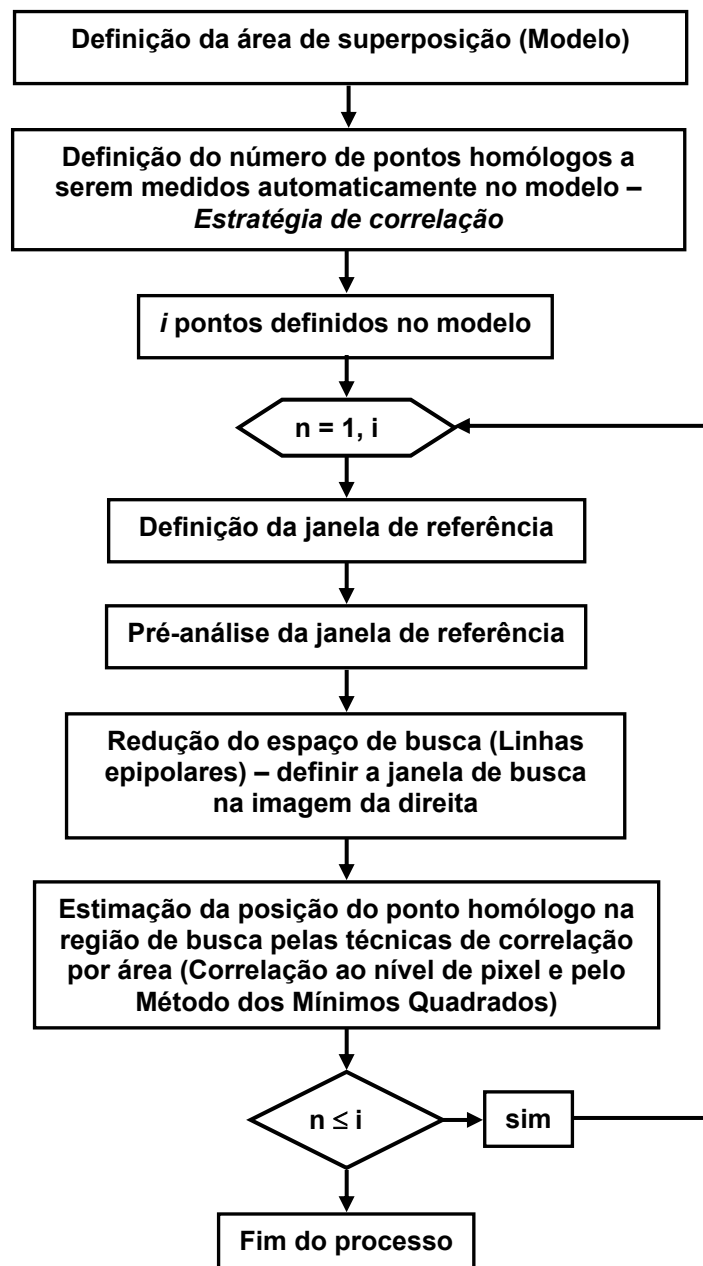


FIGURA 19: Etapas do processo de identificação automática de pontos homólogos.

Nos tópicos seguintes, as etapas mostradas na Figura 19 serão mais bem detalhadas.

5.2.2.1 Definição da Janela de Referência

Nesta fase, a janela de referência é definida de forma automática e, com isso, alguns fatores são levados em conta, como: área de superposição do modelo, na qual as janelas de referência podem ser definidas; número de pontos homólogos definidos no modelo e; pré-análise da área amostrada pela janela de referência.

Para determinar a área de superposição do modelo, as extremidades da imagem da direita E_1 e E_2 (Ver Figura 20) são projetadas à imagem da esquerda, usando os parâmetros de orientação exterior das imagens, provenientes dos sensores de orientação direta. O processo é auxiliado pela técnica de Busca em Linhas Epipolares, (Seção 2.2.3.1.1) que limita a área de busca na imagem da esquerda. Com a janela de busca definida, é aplicada a função de correlação por área (eq. 13) para determinar as posições dos pontos homólogos na imagem da esquerda (E'_1 e E'_2). Com estas posições determinadas é definida a área de superposição do modelo. Testes são realizados para verificar se o ponto correlacionado se encontra nas dimensões da imagem da esquerda. Caso o ponto esteja fora das dimensões da imagem da esquerda, sua posição é deslocada para o limite da imagem.

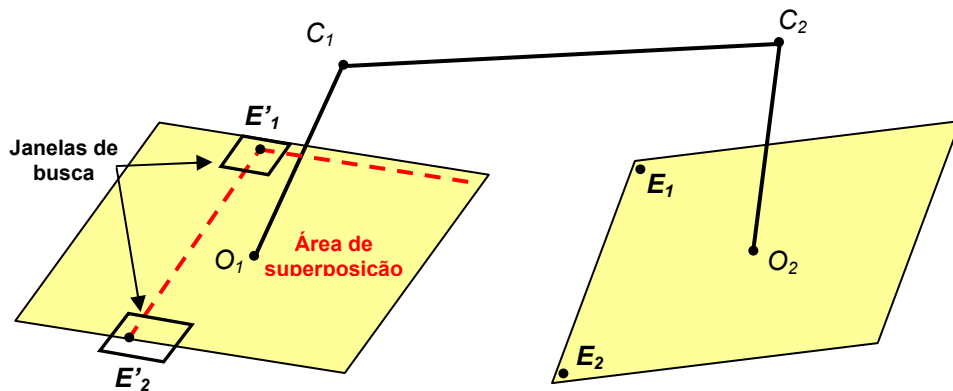


FIGURA 20: Definição da área de superposição do modelo.

Com a área de superposição determinada, as janelas de referência podem ser definidas. O tamanho da janela de referência é determinado a priori por um arquivo de configuração. Neste arquivo, é definida ainda a estratégia de geração das janelas de referência, estratégia pela qual determina o número de pontos homólogos a serem medidos automaticamente no modelo. São dispostas duas opções. Se o usuário optar pela estratégia 1, nove pontos distribuídos no modelo serão medidos. Caso defina a estratégia 2, serão medidos 15 pontos, de forma que todo o modelo seja coberto. A Figura 21 ilustra a distribuição dos pontos de correlação (centros das janelas de referência) sobre o modelo para as duas estratégias estabelecidas.

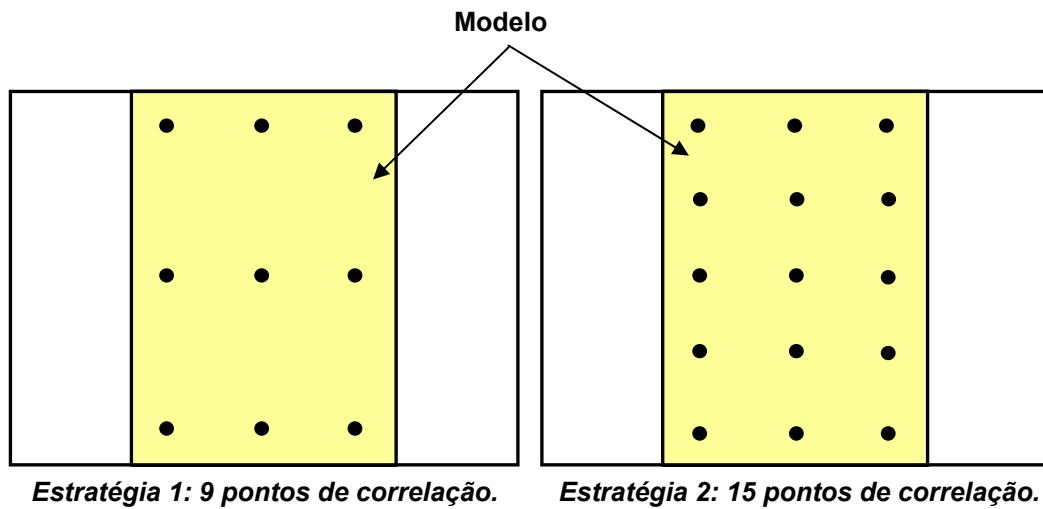


FIGURA 21: Distribuição dos pontos de correlação sobre o modelo.

Uma importante consideração a ser feita neste processo é que para cada posição do centro da janela de referência definida, de acordo com a estratégia estabelecida, é realizada a pré-análise da área amostrada pela janela de referência, a partir do cálculo da matriz variância-covariância das componentes de translação radiométrica das áreas de correlação da imagem de referência (Seção 2.2.3.2). Isso visa aumentar a robustez do processo de correlação de imagens, evitando regiões consideradas problemáticas (homogêneas).

Os critérios para rejeitar as regiões problemáticas foram estabelecidos por meio de experimentos práticos. Estes experimentos foram realizados com janelas de referência de características diversas, desde áreas homogêneas até áreas com alto índice de variância. A partir dos valores estatísticos obtidos com estes testes, apresentados no Apêndice A, verificou-se que a janela de referência deve ser rejeitada se:

$$\text{Variância do sinal} < 400 \text{ ou Traço da MVC} > 0.05$$

Caso a região amostrada pela janela de referência seja considerada problemática, a janela é deslocada em três pixels na direção horizontal. Este

processo é repetido até que a área relacionada à janela de referência seja considerada apropriada para a correlação, conforme os limiares definidos anteriormente. Este processo minimiza a ocorrência de falsas correlações ou de correlações redundantes.

5.2.2.2 Redução do Espaço de Busca

Para a realização da correspondência de imagens foi adotada a técnica de redução do espaço de busca em linhas epipolares (Ver Seção 2.2.3.1.1), pois os parâmetros de OE são conhecidos a priori. Esta estratégia evita que a correlação seja calculada em toda a imagem, reduzindo o tempo de processamento e a ocorrência de falsas correlações.

5.2.2.3 Métodos para a Correspondência de Imagens

Para os pontos de correlação definidos no modelo, de acordo com a estratégia estabelecida, são estimadas as suas posições correspondentes na imagem da direita, a partir dos algoritmos de correlação ao nível de pixel e Mínimos Quadrados, auxiliados pela técnica de busca em linhas epipolares. Na correlação ao nível de pixel o fator de correlação (eq. 13) é calculado para todas as posições da janela de pesquisa na região de busca, a fim de obter a posição de melhor correlação do centro da janela de referência na imagem da direita.

A correspondência de imagens pelo Método dos Mínimos Quadrados visa estimar a posição da janela de pesquisa a uma precisão subpixel. Os parâmetros que definem esta posição são estimados no ajustamento baseado no Método Paramétrico, já definido na Seção 2.2.4.2.1.

De acordo com o modelo matemático apresentado na equação 16, tem-se o número de parâmetros u igual a oito e n observações, que está relacionado com o número de pixels da janela de correlação. Como exemplo, se for tomada uma janela de referência de dimensão 3 (3 x 3), serão nove observações.

5.2.3 Compatibilização dos parâmetros de orientação exterior

Como no modelo de coplanaridade apresentado anteriormente (eq. 37) tanto os parâmetros como os valores observados são ligados por uma função não explícita e não linear, o método usado para refinar os parâmetros de orientação externa foi o Método Combinado iterativo com injunções, tendo em vista que os parâmetros de orientação são conhecidos a priori por meio dos sensores de bordo.

O modelo matemático, do tipo apresentado na equação (37), é não explícito, podendo ser tratado pelo Método Combinado:

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (47)$$

Tendo n valores observados, u parâmetros e r equações, o modelo linearizado para o modelo implícito é dado por:

$${}_r A_{uu} X_1 + {}_r B_{nn} V_1 + {}_r W_1 = 0 \quad (48)$$

com:

$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0}$: matriz das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros;

$B = \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b}$: matriz das derivadas parciais da função em relação aos valores

observados ajustados;

$$W = [F(L^0, X^0) + B * (L_b - L^0)], \quad (49)$$

sendo L^0 e X^0 os vetores aproximados para as observações e parâmetros, respectivamente.

Segundo Mikhail (1976), a solução para o Método dos Mínimos Quadrados com u restrições sobre os parâmetros é da forma:

$$X = (N + P_{xx})^{-1} (U - P_{xx} f_x) \quad (50)$$

com:

$$N = A^T M^{-1} A \quad (51)$$

$$U = A^T M^{-1} W \quad (52)$$

$$M = (B P^{-1} B^T) \quad (53)$$

$P = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2}$: Matriz de peso das observações, com desvio-padrão das observações (σ)

podendo ser considerado equivalente a metade do tamanho do pixel;

$P_{xx} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{xx}^2}$: Matriz de peso dos parâmetros, com desvio-padrão (σ_{xx}) correspondente

à qualidade dos dados fornecidos pelos sensores de orientação;

σ_0^2 : variância da unidade de peso *a priori*;

A função f_x é igual a zero na primeira iteração, pois assume-se que as aproximações aos parâmetros são iguais à seus valores estimados a priori ($X^0 = X$). Após a primeira iteração, o vetor X_1 é calculado, o qual é adicionado ao vetor dos valores aproximados X^0 , a fim de obter os parâmetros ajustados (X_a). Conseqüentemente, na segunda iteração o valor de f_x não é mais zero, e sim equivalente a $X^0 + X_1 - X = X_1$, desde que $X_0 = X$. Na iteração seguinte, $f_x = X_1 + X_2$, e assim sucessivamente até que o processo iterativo atinja o ponto de convergência estabelecido (MIKHAIL, 1976). Sendo assim, tem-se que:

$$f_x = \sum_i X_{(i)} \quad (54)$$

sendo i o número de iterações no ajustamento.

O vetor para os parâmetros ajustados (X_a) é dado por:

$$X_a = X^0 + X \quad (55)$$

As observações ajustadas são estimadas por:

$$L_a = L^0 + V \quad (56)$$

com:

V : vetor dos resíduos das observações:

$$V = P^{-1}B^T M^{-1}(W - AX) \quad (57)$$

A matriz variância-covariância (MVC) dos parâmetros é calculada como segue:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 (N + P_{xx})^{-1} \quad (58)$$

com:

$\hat{\sigma}_0^2$: variância da unidade de peso *a posteriori*:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + V_x^T P_{xx} V_x}{S} \quad (59)$$

com:

V_x : vetor dos resíduos dos parâmetros:

$$V_x = f_x + X \quad (60)$$

$S = r + s - u$: graus de liberdade no ajustamento;

Como o modelo de coplanaridade é não linear, surge a necessidade de iterações no ajustamento. As matrizes A e B são calculadas em função dos parâmetros e dos valores observados e, com isso, valores iniciais aproximados

devem ser adotados. Neste caso, a obtenção destes parâmetros é imediata, pois todos foram medidos previamente.

Para a estimação dos parâmetros de orientação exterior das imagens que compõem o estereopar, tem-se o modelo matemático baseado na restrição de coplanaridade, apresentado na equação 37. Sendo o modelo representado por uma equação para cada ponto medido nas imagens, tem-se:

$$\begin{cases} r = n_p \\ n = 4 * n_p \\ s = u = 12 \end{cases}$$

sendo n_p o número de pontos medidos nas imagens e s as injunções nos parâmetros de orientação exterior das imagens.

Tendo $S = r + s - u$ graus de liberdade, é necessária uma equação para a estimação pelo Método dos Mínimos Quadrados, tendo em vista que os doze parâmetros de orientação exterior são tratados como injunções de peso.

As derivadas parciais relacionadas às matrizes A e B se encontram no Apêndice B.

5.2.4 Testes Estatísticos dos Resultados do Ajustamento

Após o processo de ajustamento, há a necessidade de confirmar a qualidade dos dados e parâmetros refinados, por meio de análises estatísticas. Como indicador da qualidade do ajustamento, toma-se como base a distribuição Qui-Quadrado (χ^2), para verificar a discrepância entre o σ_0^2 (*a priori*) e $\hat{\sigma}_0^2$ (*a posteriori*), a fim de constatar se esta diferença é significativa a um certo nível de confiança (GEMAEL, 1994).

Neste contexto são avaliadas as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \Rightarrow \text{Hipótese básica ou nula} \\ H_1 : \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \Rightarrow \text{Hipótese alternativa} \end{cases}$$

Em seguida é calculado o valor do Qui-Quadrado amostral ($\bar{\chi}^2$):

$$\bar{\chi}^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} * S \quad (61)$$

sendo:

σ_0^2 : variância da observação de peso unitário *a priori*;

$\hat{\sigma}_0^2$: variância da observação de peso unitário *a posteriori*;

S : número de graus de liberdade no ajustamento;

Com o valor do Qui-Quadrado amostral ($\bar{\chi}^2$) é possível testar a hipótese básica a fim de concluir sobre a sua aceitação ou não. Com um nível de significância α (probabilidade máxima admitida para correr o risco de rejeitar a hipótese verdadeira) e S graus de liberdade, a hipótese básica é rejeitada se:

$$\bar{\chi} \leq \chi_{S, \frac{\alpha}{2}}^2 \quad \text{ou} \quad \bar{\chi} \geq \chi_{S, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$$

sendo $\chi_{S, \frac{\alpha}{2}}^2$ e $\chi_{S, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$ os valores do Qui-Quadrado tabelados.

Se a hipótese nula for rejeitada, o ajustamento apresenta problemas que pode ser atribuído a várias causas, como (GEMAEL, 1994):

- Presença de erros grosseiros, que podem ser verificados por meio de análises dos resíduos;

- Modelo matemático inadequado;
- Sistema mal condicionado;
- Ponderação inadequada às observações.

5.2.5 Cálculo das Imagens Normalizadas

A normalização do par de imagens, ou Reamostragem Epipolar, visa reamostrar as imagens de acordo com a geometria epipolar, de tal forma que os eixos óticos se tornem paralelos e as feições correlatas confinadas na mesma linha. Para isso, os parâmetros de orientação exterior das imagens devem ser conhecidos. Como os parâmetros de orientação foram “refinados” no processo de ajustamento, a partir do modelo de coplanaridade modificado, a etapa seguinte consiste em calcular as imagens normalizadas, para eliminar o efeito da paralaxe vertical do modelo.

Para sintetizar o processo de reamostragem epipolar, a Figura 22 apresenta um fluxograma com as etapas envolvidas, de acordo com a modelagem matemática apresentada no Capítulo 4.

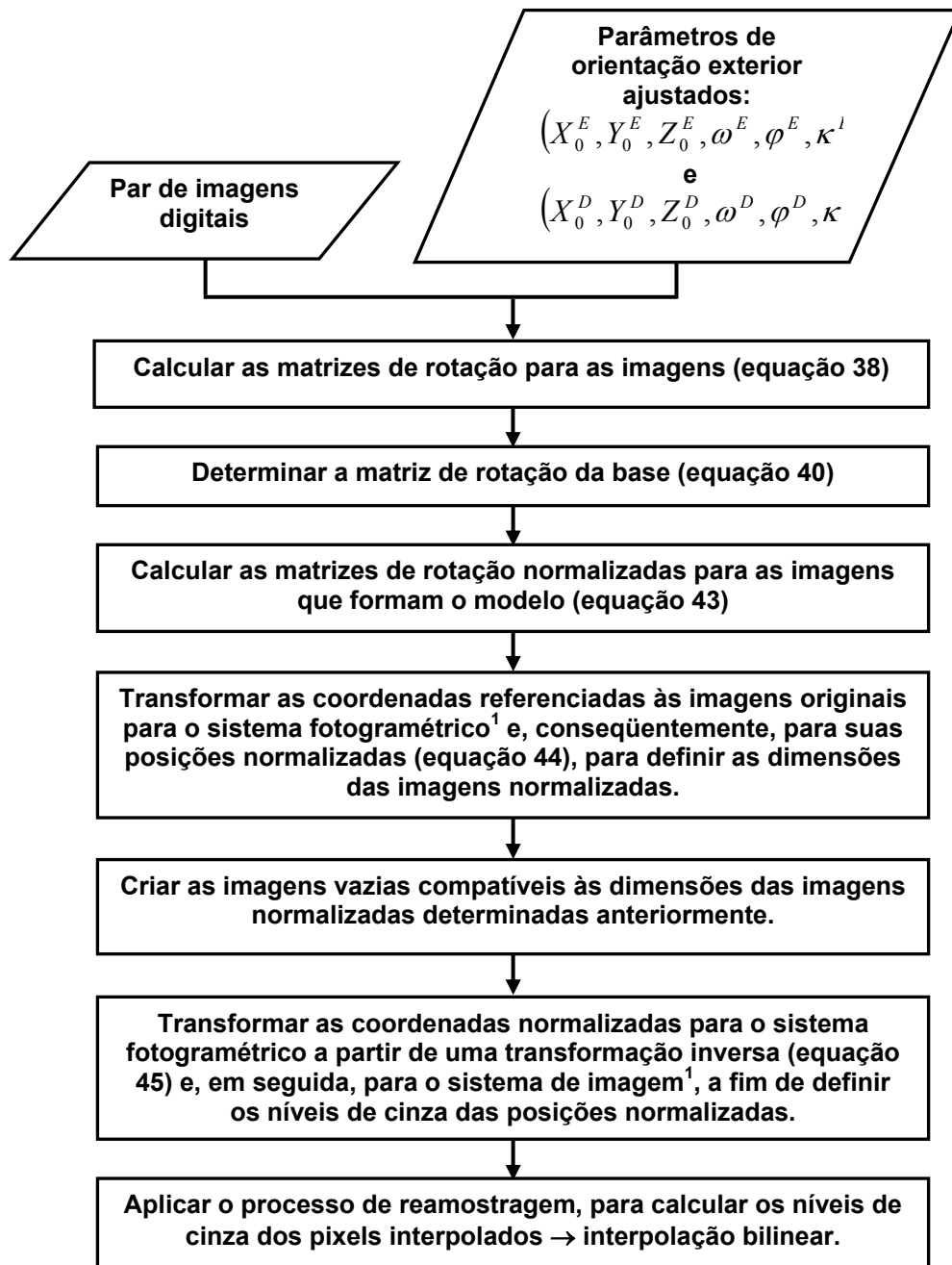


FIGURA 22: Etapas do processo de Reamostragem Epipolar.

5.2.6 Desenvolvimentos

Com base na abordagem estabelecida foram desenvolvidos módulos computacionais em linguagem C/C++, que proporcionam a geração automática dos estereomodelos. Os programas computacionais implementados foram:

- ***OilmDig***: classe para a orientação interior de imagens digitais, contendo métodos de correção dos erros sistemáticos;
- ***Correlacao***: classe desenvolvida para a identificação automática de pontos homólogos por correspondência de feições ao nível de pixel e pelo Método dos Mínimos Quadrados. Esta classe contém métodos para a pré-análise das janelas de referência e redução do espaço de busca em linhas epipolares;
- ***Coplanaridade***: classe gerada para o “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior do estereopar baseado num modelo de coplanaridade modificado, por meio de um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (Método Combinado com injunções);
- ***ReamEpipolar***: classe desenvolvida para o cálculo das imagens normalizadas (Reamostragem Epipolar).

Vale ressaltar que a classe ***Correlacao*** contou com implementações desenvolvidas por Daniel Rodrigues dos Santos, Christiane Nogueira de Carvalho Kokubum e Elaine Reis Costa.

Os programas desenvolvidos foram integrados ao projeto UPTK (“*Unesp Photogrammetric ToolKit*”), do Departamento de Cartografia da UNESP, que visa o desenvolvimento de uma biblioteca de classes e funções para Fotogrametria.

Além dos programas, foram integradas ao projeto as documentações dos códigos de programação, geradas a partir do software *Doxygen*³. Este software extrai informações específicas do código para gerar a documentação. Estas informações consistem em palavras-chave adicionadas ao corpo do programa.

Como os programas desenvolvidos foram integrados ao projeto UPTK, as documentações geradas poderão ser encontradas no site do projeto⁴, a partir de 2004.

Os protótipos dos arquivos de entrada para as classes e funções desenvolvidas seguem definidos no Apêndice C.

³ Disponível em: <<http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>>. Acesso em 07/02/2003.

⁴ Disponível em: <www.prudente.unesp.br/dcartog/uptk>. Acesso em 11/12/2003.

CAPÍTULO VI

EXPERIMENTOS E RESULTADOS

6.1 EXPERIMENTOS COM DADOS SIMULADOS

Os experimentos com dados simulados foram realizados com o intuito de verificar o comportamento dos parâmetros de orientação exterior com o processo de ajustamento e as variações das paralaxes verticais do modelo antes e depois de tal processo. Foram realizados diversos experimentos, dentre os quais foram selecionados alguns para serem apresentados neste trabalho.

Os parâmetros de orientação direta foram simulados a partir de valores definidos teoricamente como verdadeiros (Tabela 2), introduzindo erros randômicos com desvios-padrão específicos, de acordo com os experimentos realizados.

TABELA 2: Parâmetros de orientação exterior definidos como verdadeiros nos experimentos simulados.

| | |
|--------------------------|------|
| $X_0^{Esq} (m)$ | 0 |
| $Y_0^{Esq} (m)$ | 0 |
| $Z_0^{Esq} (m)$ | 1175 |
| $\omega^{Esq} (^\circ)$ | 0 |
| $\varphi^{Esq} (^\circ)$ | 0 |
| $\kappa^{Esq} (^\circ)$ | 0 |
| $X_0^{Dir} (m)$ | 350 |
| $Y_0^{Dir} (m)$ | 0 |
| $Z_0^{Dir} (m)$ | 1175 |
| $\omega^{Dir} (^\circ)$ | 0 |
| $\varphi^{Dir} (^\circ)$ | 0 |
| $\kappa^{Dir} (^\circ)$ | 0 |

Neste mesmo contexto foram simulados os valores observados (fotocoordenadas), gerados a partir da equação de colinearidade, introduzindo-se erros randômicos com distribuição normal e desvio padrão de um pixel. Foram considerados 6 pontos como valores observados, posicionados de forma similar aos pontos de Grubber. A Tabela 3 traz as fotocoordenadas consideradas verdadeiras e as fotocoordenadas degradadas para os pontos observados.

TABELA 3: Coordenadas de imagem ideais e degradadas para os pontos observados.

| | Fotocoordenadas verdadeiras | | | | Fotocoordenadas degradadas | | | |
|-------|-----------------------------|----------|-------------------|----------|----------------------------|----------|-------------------|----------|
| | Imagem da esquerda | | Imagem da direita | | Imagem da esquerda | | Imagem da direita | |
| Ponto | x(mm) | y(mm) | x(mm) | y(mm) | x(mm) | y(mm) | x(mm) | y(mm) |
| 1 | 0,0000 | 0,0000 | -14,0000 | 0,0000 | 0,0267 | -0,0020 | -13,9778 | -0,0006 |
| 2 | 14,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 14,0000 | 0,0005 | 0,0396 | 0,0323 |
| 3 | 0,0000 | 14,0000 | -14,0000 | 14,0000 | 0,0091 | 14,0557 | -13,9866 | 14,0339 |
| 4 | 14,0000 | 14,0000 | 0,0000 | 14,0000 | 13,9948 | 13,9996 | 0,0123 | 14,0089 |
| 5 | 0,0000 | -14,0000 | -14,0000 | -14,0000 | 0,0267 | -14,0111 | -13,9916 | -13,9670 |
| 6 | 14,0000 | -14,0000 | 0,0000 | -14,0000 | 13,9749 | -14,0122 | -0,0248 | -13,9983 |

Para a realização dos experimentos simulados foi considerada uma altura de vôo de 1175m, escala da imagem 1:25000, distância focal de 47mm e tamanho do pixel de 0,023mm, o que equivale a uma câmara com formato de 35mm.

A seguir estão apresentados alguns experimentos simulados realizados, mostrando nas tabelas os Erros Verdadeiros (ε_v) e o Erro Médio Quadrático (EMQ) destes erros nos parâmetros de orientação exterior, além das paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento. Para estimar as paralaxes verticais do modelo são calculadas as coordenadas (Y) no espaço objeto dos pontos medidos nas imagens, por meio da equação de colinearidade inversa e dos parâmetros de orientação exterior de cada imagem. Considerando a escala da foto, a paralaxe do modelo é obtida pela discrepância entre as coordenadas (Y) calculadas a partir das duas imagens.

Experimento 1

Neste experimento foi realizada uma orientação relativa do modelo, fixando-se sete parâmetros de orientação exterior $(X_0^{Esq}, Y_0^{Esq}, Z_0^{Esq}, \omega^{Esq}, \varphi^{Esq}, \kappa^{Esq} \text{ e } X_0^{Dir})$ com seus valores definidos como verdadeiros (conforme apresentado na Tabela 2) e deixando os outros parâmetros degradados com desvios-padrão elevados (20m para as coordenadas do CP e 5° para os ângulos de rotação). A Tabela 4 mostra os resultados obtidos com a realização do experimento 1.

TABELA 4: Experimento 1 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | ε_v (antes) | ε_v (depois) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| X_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| Y_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| Z_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| ω^{Esq} (°) | 0,0000 | 0,0000 |
| φ^{Esq} (°) | 0,0000 | 0,0000 |
| κ^{Esq} (°) | 0,0000 | 0,0000 |
| X_0^{Dir} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| Y_0^{Dir} (m) | 3,9348 | -1,2652 |
| Z_0^{Dir} (m) | 9,9347 | 0,2011 |
| ω^{Dir} (°) | 2,0145 | 0,0387 |
| φ^{Dir} (°) | 1,9923 | 0,4182 |
| κ^{Dir} (°) | 2,0211 | -0,0419 |
| EMQ_{CP} (m) | 4,3624 | 0,5230 |
| EMQ_{Ang} (°) | 1,4208 | 0,1723 |
| <i>Paralaxe vertical antes (mm)</i> | | 1,6300 |
| <i>Paralaxe vertical depois (mm)</i> | | 0,0069 |

O Experimento 1 mostrou que os parâmetros que foram tratados como “livres” e com desvios-padrão elevados (20m para as coordenadas do CP e 5° para os ângulos de rotação), convergiram, após o ajustamento, para valores próximos dos parâmetros definidos como verdadeiros, como mostram os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) apresentados na Tabela 4. Além disso, a paralaxe vertical do modelo que era de 1,63mm (71 pixels) foi minimizada para 0,0069mm, que equivale a aproximadamente 0,3 pixel.

Experimento 2

O experimento 2 foi realizado do mesmo modo que o experimento 1, alterando apenas a magnitude de degradação dos parâmetros da imagem da direita (1,5m para as coordenadas do C.P. e 1° para os ângulos de rotação). Na Tabela 5 seguem apresentados os resultados obtidos a partir deste experimento.

TABELA 5: Experimento 2 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | ε_v (antes) | ε_v (depois) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| X_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| Y_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| Z_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| ω^{Esq} (°) | 0,0000 | 0,0000 |
| φ^{Esq} (°) | 0,0000 | 0,0000 |
| κ^{Esq} (°) | 0,0000 | 0,0000 |
| X_0^{Dir} (m) | 0,0000 | 0,0000 |
| Y_0^{Dir} (m) | 0,7348 | 0,6121 |
| Z_0^{Dir} (m) | -0,6653 | -0,0565 |
| ω^{Dir} (°) | 0,3300 | -0,0477 |
| φ^{Dir} (°) | -0,9000 | 0,3364 |
| κ^{Dir} (°) | 0,8641 | -0,0297 |
| EMQ_{CP} (m) | 0,4046 | 0,2509 |
| EMQ_{Âng} (°) | 0,5268 | 0,1392 |
| <i>Paralaxe vertical antes (mm)</i> | | 0,2200 |
| <i>Paralaxe vertical depois (mm)</i> | | 0,0005 |

Como se pôde verificar nos erros verdadeiros e nos valores do Erro Médio Quadrático apresentados na Tabela 5, os parâmetros de orientação exterior também convergiram para valores próximos dos definidos como verdadeiros, quando comparados aos valores obtidos antes do ajustamento. Além disso, verifica-se que a

paralaxe vertical do modelo foi reduzida de 0,22mm (10 pixels) para 0,0005 (0,021 pixel), que pode ser considerada praticamente nula.

Experimento 3

No experimento 3 todos os parâmetros de orientação exterior são tratados como “livres”, dentro dos desvios-padrão estabelecidos: 1,5m para as coordenadas do CP e 1° para os ângulos de rotação. Neste experimento foram adotados os valores verdadeiros para os parâmetros fixados nos experimentos 1 e 2, a fim de verificar os erros verdadeiros resultantes, após o ajustamento. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos neste experimento.

TABELA 6: Experimento 3 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | ε_v (antes) | ε_v (depois) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| X_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0003 |
| Y_0^{Esq} (m) | 0,0000 | 0,0098 |
| Z_0^{Esq} (m) | 0,0000 | -0,4441 |
| ω^{Esq} (°) | 0,0000 | 0.1258 |
| φ^{Esq} (°) | 0,0000 | -0.0088 |
| κ^{Esq} (°) | 0,0000 | 0.4622 |
| X_0^{Dir} (m) | 0,0000 | -0,0003 |
| Y_0^{Dir} (m) | 0,7348 | 0,7250 |
| Z_0^{Dir} (m) | -0,6653 | -0,2212 |
| ω^{Dir} (°) | 0,3300 | 0,2016 |
| φ^{Dir} (°) | -0,9000 | 0,2932 |
| κ^{Dir} (°) | 0,8641 | 0,4234 |
| EMQ_{CP} (m) | 0,4046 | 0,3586 |
| EMQ_{Ang} (°) | 0,5268 | 0,2987 |
| <i>Paralaxe vertical antes</i> (mm) | | 0,2000 |
| <i>Paralaxe vertical depois</i> (mm) | | 0,0004 |

Pôde-se notar com a realização deste experimento que os parâmetros de orientação exterior se estabilizaram com um valor de paralaxe vertical similar ao do Experimento 2 (0,0004mm – 0,018 pixel), mas com os erros verdadeiros maiores (Experimento 2: $EMQ_{CP} = 0,2509m$ e $EMQ_{\hat{A}ng} = 0,1392^\circ$; Experimento 3: $EMQ_{CP} = 0,3586m$ e $EMQ_{\hat{A}ng} = 0,2987^\circ$). Dessa forma, pôde-se concluir que a paralaxe vertical do modelo foi minimizada mesmo com os valores dos parâmetros ajustados mais distantes dos valores verdadeiros, quando comparados aos valores obtidos no experimento 2.

Experimento 4

Para a realização do experimento 4 foi adotado um nível de acurácia para os parâmetros de orientação exterior compatível com a qualidade dos parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação direta de baixo custo, conforme já relatado no tópico 3.1. Os desvios-padrão adotados neste experimento para os parâmetros de orientação exterior foram: 0,5m para as coordenadas do CP e 10' para os ângulos de rotação. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no experimento 4.

TABELA 7: Experimento 4 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | ε_v (antes) | ε_v (depois) |
|---|-------------------------|--------------------------|
| X_0^{Esq} (m) | -0,1458 | -0,1457 |
| Y_0^{Esq} (m) | 0,2087 | 0,1665 |
| Z_0^{Esq} (m) | -0,2832 | -0,4102 |
| ω^{Esq} (°) | 0,1040 | -0,0117 |
| ϕ^{Esq} (°) | 0,0833 | 0,0658 |
| κ^{Esq} (°) | 0,1500 | 0,1388 |
| X_0^{Dir} (m) | -0,2726 | -0,2726 |
| Y_0^{Dir} (m) | 0,4348 | 0,4769 |
| Z_0^{Dir} (m) | -0,3654 | -0,2384 |
| ω^{Dir} (°) | -0,1246 | -0,0089 |
| ϕ^{Dir} (°) | -0,0500 | 0,0536 |
| κ^{Dir} (°) | 0,1141 | 0,0967 |
| EMQ_{CP} (m) | 0,3005 | 0,3097 |
| $EMQ_{\hat{A}ng}$ (°) | 0,1090 | 0,0774 |
| <i>Paralaxe vertical antes (mm)</i> | | 0,2056 |
| <i>Paralaxe vertical depois (mm)</i> | | 0,0015 |

Como pode ser visto pelos erros verdadeiros e os valores do Erro Médio Quadrático apresentados na Tabela 7, as coordenadas do CP permaneceram praticamente estáveis (Antes: $EMQ_{CP} = 0,3005m$; Depois: $EMQ_{CP} = 0,3097m$), mostrando que o nível de acurácia original é satisfatório para a formação do modelo. Contudo, os ângulos de rotação convergiram para valores mais próximos dos definidos como verdadeiros (Antes: $EMQ_{\hat{A}ng} = 0,1090^\circ$; Depois: $EMQ_{\hat{A}ng} = 0,0774^\circ$), minimizando a paralaxe vertical do modelo de 0,2056mm (9 pixels) para 0,0015mm (0,065 pixel).

Experimento 5

Neste experimento, os ângulos de rotação foram mais degradados, quando comparados ao experimento 4, a fim de verificar sua influência nos resultados. Os desvios-padrão adotados foram: 0,5m para as coordenadas do CP e 20' para os ângulos de rotação. A Tabela 8 traz os resultados obtidos a partir dos dados definidos no experimento 5.

TABELA 8: Experimento 5 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | ε_v (antes) | ε_v (depois) |
|---|-------------------------|--------------------------|
| X_0^{Esq} (m) | -0,1468 | -0,1458 |
| Y_0^{Esq} (m) | 0,2087 | 0,1919 |
| Z_0^{Esq} (m) | -0,2877 | -0,3742 |
| ω^{Esq} (°) | 0,2211 | 0,0253 |
| ϕ^{Esq} (°) | 0,1339 | 0,0703 |
| κ^{Esq} (°) | 0,3017 | 0,2581 |
| X_0^{Dir} (m) | -0,2622 | -0,2726 |
| Y_0^{Dir} (m) | 0,4366 | 0,4516 |
| Z_0^{Dir} (m) | -0,3651 | -0,2743 |
| ω^{Dir} (°) | -0,1246 | 0,0639 |
| ϕ^{Dir} (°) | -0,1500 | 0,1586 |
| κ^{Dir} (°) | 0,2141 | 0,2121 |
| EMQ_{CP} (m) | 0,3008 | 0,3032 |
| $EMQ_{\hat{A}ng}$ (°) | 0,1993 | 0,1562 |
| <i>Paralaxe vertical antes (mm)</i> | | 0,3290 |
| <i>Paralaxe vertical depois (mm)</i> | | 0,0038 |

O que se pode notar neste experimento é que os ângulos de rotação não convergiram para valores tão próximos dos valores verdadeiros, quando comparados aos obtidos no experimento 4 (Experimento 4: $EMQ_{\hat{A}ng} = 0,0774^\circ$;

Experimento 5: $EMQ_{\text{Ang}} = 0,1562^\circ$). Além disso, o valor da paralaxe vertical do modelo não foi reduzido a um valor mínimo como no experimento 4 (0,0015mm – 0,0065 pixel), mas, mesmo assim, o valor resultante é bem inferior a um pixel (0,0038mm - 0,17 pixel).

Experimento 6

No experimento 6 a degradação foi introduzida nas coordenadas do CP e não nos ângulos de rotação. Isso visa verificar a influência dos valores de posição nos resultados. Dessa forma, os desvios-padrão definidos foram: 1,0m para as coordenadas do CP e 10' para os ângulos de rotação. Na Tabela 9 pode-se verificar os resultados obtidos com a realização do experimento 6.

TABELA 9: Experimento 6 - Erros verdadeiros nos parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | ε_v (antes) | ε_v (depois) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| X_0^{Esq} (m) | -0,4584 | -0,4576 |
| Y_0^{Esq} (m) | 0,4087 | 0,2418 |
| Z_0^{Esq} (m) | -0,2832 | -0,6171 |
| ω^{Esq} (°) | 0,1061 | -0,0106 |
| φ^{Esq} (°) | 0,0901 | 0,0509 |
| κ^{Esq} (°) | 0,1487 | 0,1389 |
| X_0^{Dir} (m) | -0,4725 | -0,4733 |
| Y_0^{Dir} (m) | 0,4348 | 0,6017 |
| Z_0^{Dir} (m) | -0,3653 | -0,0315 |
| ω^{Dir} (°) | -0,1299 | -0,0100 |
| φ^{Dir} (°) | -0,0544 | 0,0390 |
| κ^{Dir} (°) | 0,1132 | 0,0969 |
| EMQ_{CP} (m) | 0,4088 | 0,4538 |
| EMQ_{Âng} (°) | 0,1108 | 0,0734 |
| <i>Paralaxe vertical antes</i> (mm) | | 0,2140 |
| <i>Paralaxe vertical depois</i> (mm) | | 0,0022 |

Com a realização do experimento 6 pôde-se notar que a influência das discrepâncias nas coordenadas do CP não foi tão significativa quanto as discrepâncias nos ângulos de rotação, mostrados no experimento anterior, sendo que a paralaxe do modelo foi minimizada a 0,0022mm (0,095 pixel). Esta mesma conclusão poderá ser verificada mais adiante, no cálculo das coordenadas de pontos no espaço objeto.

Como indicador de qualidade do ajustamento tomou-se como base a distribuição Qui-quadrado (χ^2), descrita no Tópico 5.2.4. O programa de ajustamento dos parâmetros de orientação exterior desenvolvido calcula o valor do χ^2 amostral, a partir do vetor dos resíduos e do número de graus de liberdade do ajustamento. Com

o valor do χ^2 amostral e os valores da tabela de distribuição χ^2 , foi realizada a análise dos resultados do ajustamento para os experimentos simulados.

Para um nível de significância (α) de 5% e seis graus de liberdade ($S = 6$), foram obtidos os seguintes valores, conforme apresenta a Tabela 10.

TABELA 10: Teste de distribuição χ^2 para os experimentos simulados.

| Experimentos Simulados | Qui-quadrado tabelado | | Qui-quadrado amostral |
|------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| | $\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ | $\chi^2_{S, 1 - \frac{\alpha}{2}}$ | $\bar{\chi}^2$ |
| Experimento 1 | 1,24 | 14,45 | 1,54 |
| Experimento 2 | | | 3,19 |
| Experimento 3 | | | 2,47 |
| Experimento 4 | | | 3,26 |
| Experimento 5 | | | 2,71 |
| Experimento 6 | | | 3,03 |

Comparando-se o valor do χ^2 amostral com os valores tabelados ($\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ e $\chi^2_{S, 1 - \frac{\alpha}{2}}$), foi constatado que em todos os experimentos simulados realizados o valor do χ^2 amostral encontrou-se no intervalo definido pelos valores tabelados. Sendo assim, verificou-se que a hipótese básica não foi rejeitada ao nível de significância de 5% e os parâmetros ajustados têm 95% de probabilidade de estarem corretos.

Com o objetivo de verificar a qualidade dos dados em processos de mapeamento pode-se calcular as coordenadas de pontos no espaço objeto e compara-las com as coordenadas de controle obtidas a partir dos dados ideais. Como se dispõe dos parâmetros de orientação exterior e de fotocoordenadas medidas nas imagens, as coordenadas de pontos no espaço objeto podem ser calculadas por intersecção fotogramétrica (TOMMASELLI, 2001). A Tabela 11 mostra os valores do Erro Médio Quadrático para as coordenadas no espaço objeto,

calculadas para os pontos considerados, com base nos parâmetros de orientação de cada um dos experimentos simulados realizados.

TABELA 11. Erro Médio Quadrático das coordenadas no espaço objeto, para os experimentos simulados.

| | Antes do ajustamento | | | Após o ajustamento | | |
|----------------------|----------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
| | $EMQ_x(m)$ | $EMQ_y(m)$ | $EMQ_z(m)$ | $EMQ_x(m)$ | $EMQ_y(m)$ | $EMQ_z(m)$ |
| Experimento 1 | 23,816 | 28,041 | 133,953 | 5,297 | 5,544 | 29,131 |
| Experimento 2 | 12,486 | 12,95 | 68,961 | 4,309 | 4,593 | 23,975 |
| Experimento 3 | 12,486 | 12,95 | 68,961 | 4,148 | 5,702 | 21,237 |
| Experimento 4 | 1,278 | 1,6538 | 9,106 | 1,585 | 0,357 | 0,854 |
| Experimento 5 | 2,417 | 4,067 | 20,062 | 2,884 | 2,03 | 6,751 |
| Experimento 6 | 1,446 | 1,753 | 9,535 | 1,547 | 0,443 | 1,153 |

Com os valores mostrados na Tabela 11, algumas conclusões podem ser tomadas. Como os três primeiros experimentos possuíam índices de degradação elevados para os parâmetros de orientação exterior, a qualidade das medidas realizada sobre o modelo não foi satisfatória (Ver Tabela 11), mesmo que os valores da paralaxe vertical tenham sido minimizados e os erros verdadeiros (ε_v) reduzidos significativamente (Tabelas 4 a 6).

O experimento 4 mostrou que com as proporções de degradação condizentes com a qualidade dos parâmetros fornecidos pelos sensores de orientação de baixo custo (0,5m para as coordenadas do CP e 10' para os ângulos de rotação), é possível minimizar a paralaxe residual do modelo (Tabela 7) e realizar medidas de qualidade, conforme segue apresentado na Tabela 11.

Os experimentos 5 e 6 foram realizados para verificar separadamente a influência da qualidade das coordenadas do CP e dos ângulos de rotação nos resultados. Os valores apresentados nas Tabelas 8, 9 e 11 mostraram

que a variação na qualidade dos valores dos ângulos de rotação foi mais significativa nos resultados que a variabilidade nas coordenadas do CP.

Outros experimentos simulados que verificam a influência dos parâmetros de orientação exterior sobre as informações de terreno podem ser encontrados em Tommaselli (2001).

É importante lembrar que estes experimentos foram realizados considerando-se uma câmara de pequena abertura angular (distância focal de 47mm e quadro da imagem equivalente a 35mm). Para quadros maiores, o comportamento dos dados provavelmente será diferente.

6.2 EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS

Os experimentos com dados reais foram conduzidos a partir de duas fontes de dados:

- Da degradação simulada dos parâmetros de orientação exterior de imagens digitais, trianguladas no sistema fotogramétrico digital *Socet Set*;
- Dos sensores de orientação direta de imagens (GPS + INS).

6.2.1 Experimentos com dados reais: dados simulados a partir da fototriangulação de imagens digitais

Nestes experimentos foram utilizados dois estereopares digitais, sendo um coletado pela câmara KODAK DCS420 e o outro pela câmara PROFESSIONAL KODAK PRO14n. A seguir, serão apresentados as principais características, resultados e conclusões dos experimentos realizados com cada uma das câmaras digitais.

6.2.1.1 Experimentos com a câmara digital KODAK DCS420

O par de imagens coletadas pela câmara digital KODAK DCS420 faz parte de um bloco fotogramétrico obtido da área do campus da FCT/UNESP em Presidente Prudente, com as seguintes características:

- Altura de vôo: 1175m;
- Distância focal nominal da câmara: 47mm;
- Escala da imagem: 1:25000;
- Resolução da imagem: 1524 x 1012 pixels;
- Tamanho do pixel: 0,023mm;
- Área de imageamento equivalente a um filme de 35mm.

Este modelo foi fototriangulado no Sistema Fotogramétrico Digital *Socet Set*, utilizando pontos de enlace medidos automaticamente e cinco pontos de

controle, coletados em campo com acurácia centimétrica, usando um receptor GPS *ASTECH Z12*.

Para simular a determinação direta por sensores embarcados (GPS+INS), os parâmetros de orientação exterior das imagens trianguladas foram degradados, introduzindo-se erros randômicos com desvios padrão de 0,5m para as coordenadas do CP (X_0, Y_0, Z_0) e 10' para os ângulos de rotação (ω, φ, κ). As fotocoordenadas dos pontos de passagem foram medidas automaticamente no modelo (com base na abordagem apresentada na Seção 5.2.2), a partir dos algoritmos de correlação de imagens desenvolvidos, sendo o desvio-padrão adotado de 0,5 pixel, em virtude da determinação subpixel pelo MMQ. Foram medidos nove pontos no modelo (estratégia 1), mas dois pontos foram eliminados na análise de resíduos do ajustamento, devido aos resíduos serem superiores a 0,5 pixel.

Um conjunto de experimentos com este nível de exatidão foi conduzido, e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 12. A Tabela 12 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) para cinco pontos de verificação (medidos manualmente nas imagens) e da paralaxe vertical do modelo (py) em três situações: após a aerotriangulação; para os parâmetros de orientação exterior degradados (antes do ajustamento) e; após o refinamento dos parâmetros de orientação exterior.

TABELA 12. Erro Médio Quadrático (EMQ) dos pontos de verificação e valores da paralaxe vertical do modelo para os experimentos realizados com as imagens coletadas pela câmara digital KODAK DCS420.

| | EMQX(m) | EMQY(m) | EMQZ(m) | py (mm) |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| Após a aerotriangulação | 0,76 | 0,88 | 2,89 | 0,0152 |
| Antes (parâmetros degradados) | 3,10 | 4,23 | 11,44 | 0,1190 |
| Depois (parâmetros refinados) | 3,06 | 2,73 | 4,10 | 0,0129 |

Com a realização destes experimentos constatou-se a eficácia da metodologia abordada, com a redução da paralaxe vertical do modelo de 0,119mm (5,18 pixels) para 0,0129mm (0,56 pixels), que é inferior à paralaxe residual do modelo após o processo de aerotriangulação, que foi de 0,0152mm (0,66 pixels).

Na análise da exatidão dos pontos de verificação observou-se que houve uma redução do erro altimétrico do modelo, porém não houve uma melhora significativa na acurácia planimétrica do modelo (Ver Tabela 12). Este erro nas coordenadas de pontos no espaço objeto pode estar relacionado à instabilidade dos parâmetros de orientação interior da câmara, já que a câmara utilizada é não-métrica. Nestes experimentos não foram considerados os parâmetros de calibração da câmara, como o deslocamento do ponto principal e os parâmetros das distorções óticas. Além disso, a distância focal da câmara não foi previamente calibrada, proporcionando assim, erros na componente altimétrica dos pontos no espaço objeto.

Nesta análise realizada com os pontos verificação foi observada uma sistematicidade no comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos no espaço objeto. O modelo resultante apresentou translações e rotações no espaço, em relação ao referencial definido pelos pontos de controle, como mostra a Figura 23. Este “erro” pode ser corrigido por uma transformação de similaridade no espaço, dispondo de pelo menos três pontos de controle, embora isso esteja fora dos objetivos da coleta direta.

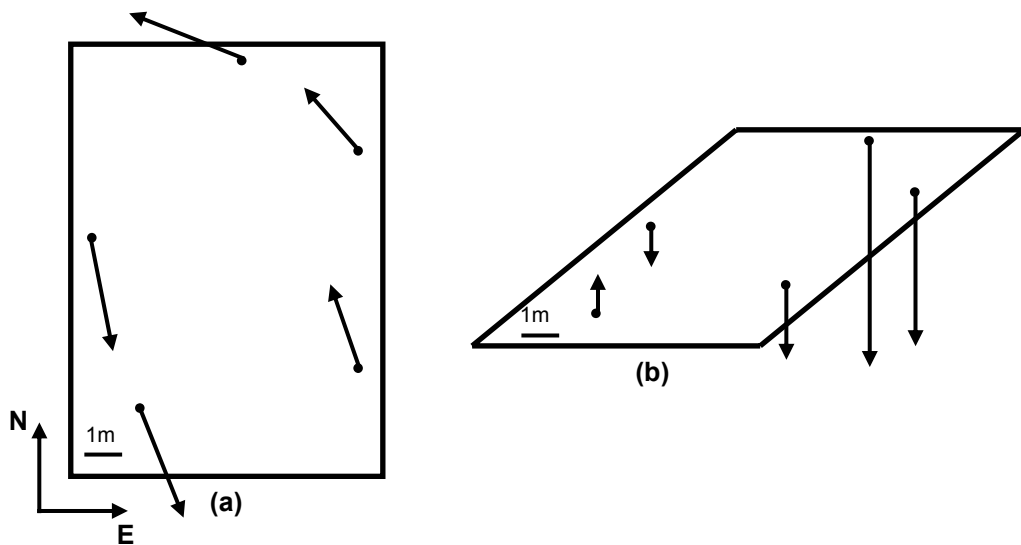


FIGURA 23: Experimentos com a câmara DCS420 - Comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação no modelo: (a) componentes planimétricas, (b) componente altimétrica.

Vale ressaltar que foi realizado um conjunto com seis experimentos ao nível de degradação estabelecido e, sendo assim, há uma orientação do modelo distinta para cada experimento realizado, dependendo da orientação original do modelo. Nestas condições, a Figura 23 mostrou o comportamento médio das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação, para o conjunto de experimentos realizado com a câmara DCS420.

É importante mencionar que os pontos excluídos após a análise dos resíduos podem ter sido influenciados pelas componentes de distorção das lentes não modeladas. Nos experimentos realizados observou-se que os mesmos pontos foram repetidamente excluídos, pelo fato destes pontos estarem localizados nas extremidades do modelo, cujo efeito da distorção é maior. Dessa forma, pela ordem de grandeza dos resíduos (em torno de 0,8 pixel), pôde-se notar que os pontos

foram descartados pelo não modelamento da distorção das lentes e não devido a erros na correspondência de feições.

Da mesma forma que foi verificada a qualidade do ajustamento para os experimentos simulados, foi utilizada a distribuição χ^2 para este conjunto de experimentos. Com um nível de significância (α) de 5% e sete graus de liberdade no ajustamento ($S = 7$), verificou-se que a hipótese básica não foi rejeitada para este nível de significância, pois o valor do χ^2 amostral médio se encontrou no intervalo definido entre os valores tabelados ($\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ e $\chi^2_{S, 1-\frac{\alpha}{2}}$), como mostram os valores apresentados na Tabela 13.

TABELA 13: Teste de distribuição χ^2 para o conjunto de experimentos realizados com as imagens obtidas pela câmara digital KODAK DCS420.

| Qui-quadrado tabelado | | Qui-quadrado amostral |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| $\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ | $\chi^2_{S, 1-\frac{\alpha}{2}}$ | $\bar{\chi}^2$ |
| 1,69 | 16,01 | 3,23 |

Para verificar visualmente o efeito da paralaxe em y, a Figura 24 mostra a magnitude das paralaxes verticais numa porção do modelo, antes e depois do ajustamento dos parâmetros de orientação exterior. Estas imagens foram obtidas a partir do recurso de visualização estereoscópica do sistema fotogramétrico digital *Socet Set*.

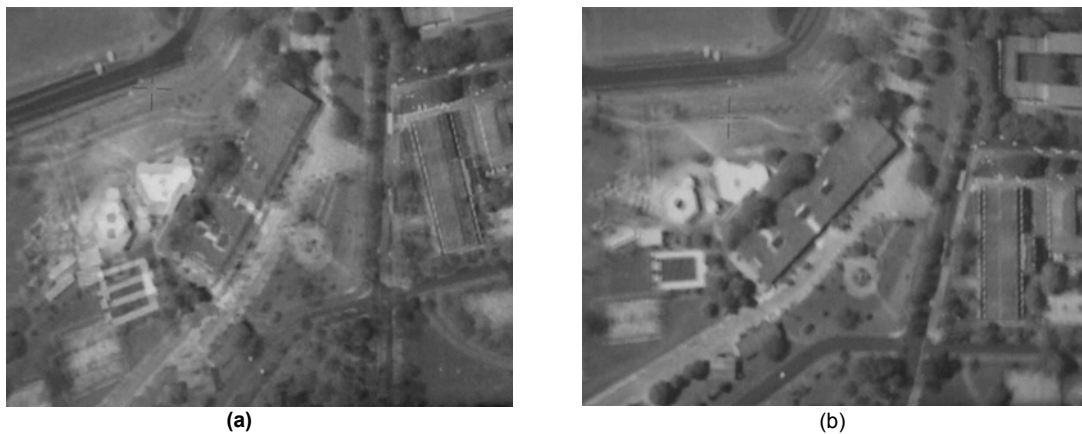


FIGURA 24: Experimento com a câmara digital KODAK DCS420 - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e normalização do par de imagens.

Com base na Figura 24, pôde-se notar visualmente a minimização da paralaxe vertical do modelo. Na Figura 24a está representada uma porção do modelo cujos parâmetros de orientação exterior se encontravam degradados. Como pôde ser visto na Tabela 12, o valor de paralaxe neste caso era de aproximadamente 5 pixels, o que influenciou consideravelmente na visualização estereoscópica da cena (Figura 24a).

Já na Figura 24b, segue apresentada a mesma área do terreno, mas com os parâmetros de orientação exterior “refinados” e com as imagens reamostradas, de acordo com a geometria epipolar. Neste caso pôde-se verificar que a paralaxe vertical do modelo foi minimizada (0,56 pixel – Tabela 12), o que proporcionou uma considerável melhoria na visualização estereoscópica da cena.

Para fins de comparação dos resultados foi realizado o mesmo conjunto de experimentos, agora para pontos de passagem medidos somente a precisão ao nível de pixel, ou seja, não foi utilizado o método de correlação pelos Mínimos Quadrados. Nestas condições, a paralaxe resultante foi de 0,016mm (0,70

pixel) e os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) nas coordenadas dos pontos de verificação foram: $EMQ_x = 3,93m$; $EMQ_y = 2,96m$; $EMQ_z = 5,33m$. Nota-se, portanto, que a determinação subpixel das posições dos pontos homólogos influenciou positivamente nos resultados, reduzindo tanto a paralaxe vertical do modelo quanto as discrepâncias nos pontos de verificação.

Além desta análise comparativa entre os métodos de correlação ao nível de pixel e Mínimos Quadrados, este conjunto de experimentos foi processado para um número maior de pontos de passagem, com base na estratégia 2 (15 pontos). Dos quinze pontos medidos foram considerados doze pontos, sendo três pontos excluídos após a análise dos resíduos do ajustamento. Para este conjunto de pontos, os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) nas coordenadas dos pontos de verificação foram: $EMQ_x = 3,01m$; $EMQ_y = 2,82m$; $EMQ_z = 4,05m$. A paralaxe vertical do modelo resultante foi de 0,0135 (0,58 pixel). Pôde-se notar que tanto a exatidão dos pontos de verificação quanto a paralaxe resultante não mudaram significativamente em relação aos valores obtidos do conjunto de experimentos realizados com sete pontos de passagem (Tabela 12). Neste sentido verificou-se que os pontos de passagem adicionais não trouxeram uma melhoria na solução anterior, realizada com apenas sete pontos.

6.2.1.2 Experimentos com a câmara digital KODAK PROFESSIONAL PRO 14n

O outro modelo, coletado pela câmara digital PROFESSIONAL KODAK PRO14n, foi obtido de um vôo fotogramétrico da mesma área, realizado em Outubro de 2003, pela empresa Multiespectral, sendo a câmara de propriedade da

empresa Photon. Tal bloco de imagens foi coletado com as seguintes características:

- Altura de vôo: 1550m;
- Distância focal nominal da câmara: 50mm;
- Escala da imagem: 1:30000;
- Resolução da imagem: 4500 x 3000 pixels;
- Tamanho do pixel: 0,008mm;
- Área de imageamento equivalente a um filme de 36mm.

Este par de imagens digitais foi fototriangulado no sistema *Socet Set*, a partir de pontos de passagem medidos automaticamente no modelo e oito pontos de controle com qualidade centimétrica, coletados com o receptor GPS *ASTECH Z12*. Os parâmetros de orientação exterior resultantes da fototriangulação foram degradados randomicamente (0,5m para (X_0, Y_0, Z_0) e 10' para (ω, ϕ, κ)), a fim de simular a orientação direta do sensor. Os valores observados (fotocoordenadas) foram medidos automaticamente nas imagens pelas técnicas de correlação (desvio-padrão de 0,5 pixel). Dos nove pontos medidos, três foram descartados na análise dos resíduos do ajustamento (resíduos superiores a 0,5 pixel).

A Tabela 14 mostra o Erro Médio Quadrático (EMQ) das coordenadas no espaço objeto para quatro pontos de verificação e a paralaxe média nas três situações de análise (Após a aerotriangulação; antes do ajustamento e; depois do ajustamento), para o conjunto de experimentos realizados.

TABELA 14. Erro Médio Quadrático (EMQ) dos pontos de verificação e valores da paralaxe vertical do modelo para os experimentos realizados com as imagens coletadas pela câmara digital

PROFESSIONAL KODAK PRO14n.

| | EMQX(m) | EMQY(m) | EMQZ(m) | <i>py (mm)</i> |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|----------------|
| Após a aerotriangulação | 0,68 | 0,63 | 1,67 | <i>0,0223</i> |
| Antes (parâmetros degradados) | 1,32 | 1,55 | 9,47 | <i>0,0834</i> |
| Depois (parâmetros refinados) | 1,60 | 3,30 | 4,27 | <i>0,0026</i> |

A partir da Tabela 14 pôde-se verificar que a paralaxe do modelo foi reduzida de 0,0834mm (10,43 pixels) para um valor mínimo de 0,0026mm (0,33 pixel), que é bem inferior à paralaxe do modelo após a aerotriangulação (0,0223 – 2,79 pixels). Vale ressaltar que a aerotriangulação é uma solução global para o bloco de imagens e, conseqüentemente, o modelo em particular apresentou um valor de paralaxe considerável (2,79 pixels). Se o modelo fosse fototriangulado individualmente, como nos experimentos com a câmara DCS420, o valor de paralaxe seria provavelmente inferior a um pixel.

Na análise de qualidade da determinação das coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto, foi constatado que houve somente uma redução do erro na componente altimétrica. Já as componentes planimétricas das coordenadas apresentaram erros mais acentuados após o ajustamento (Tabela 14). Isso pode estar relacionado a calibração da câmara, já que nenhum dos parâmetros de calibração foram considerados no processo, uma vez que a câmara não foi previamente calibrada.

Nos experimentos realizados com a câmara PRO 14n foi verificada a sistematicidade no comportamento das discrepâncias nos pontos de verificação. Tomando-se como base os resultados obtidos nestes experimentos, a Figura 25 mostra o comportamento médio de tais discrepâncias no modelo, com suas componentes planimétricas (Figura 25a) e altimétricas (Figura 25b).

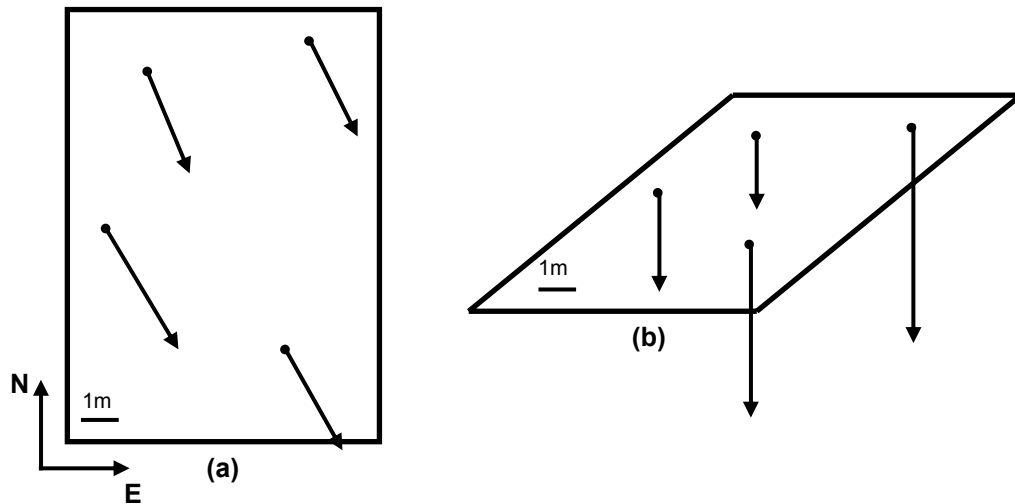


FIGURA 25: Experimentos com a câmara PROFESSIONAL PRO 14n: Comportamento das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação no modelo: (a) componentes planimétricas, (b) componente altimétrica.

Com base na Figura 25a, pôde-se verificar que os pontos apresentaram uma tendência nas componentes planimétricas, e com relação às discrepâncias altimétricas (Figura 25b), verificou-se que o modelo resultante apresentou uma translação e uma rotação no espaço. Neste sentido, se forem utilizados alguns pontos de controle (no mínimo três), pode-se aplicar uma transformação de similaridade 3D e corrigir as coordenadas dos pontos no espaço objeto.

Na análise do ajustamento pela distribuição χ^2 , para um nível de significância (α) de 5% e seis graus de liberdade ($S = 6$), verificou-se que a hipótese básica não foi rejeitada para o nível de significância estabelecido (5%) e que os parâmetros ajustados têm 95% de probabilidade de estarem corretos. Isso porque o valor do χ^2 amostral médio se mostrou definido no intervalo entre os valores tabelados ($\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ e $\chi^2_{S, 1 - \frac{\alpha}{2}}$), conforme segue apresentado na Tabela 15.

TABELA 15: Teste Qui-quadrado para o conjunto de experimentos realizados com as imagens obtidas pela câmara digital KODAK PROFESSIONAL PRO 14n.

| Qui-quadrado tabelado | | Qui-quadrado amostral |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| $\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ | $\chi^2_{S, 1 - \frac{\alpha}{2}}$ | $\bar{\chi}^2$ |
| 1,24 | 14,45 | 1,57 |

O efeito visual da paralaxe vertical do modelo pode ser visto na Figura 26, que apresenta uma porção do terreno imageado antes do ajustamento (Figura 26a), ou seja, com os parâmetros de orientação exterior degradados, e depois do ajustamento (Figura 26b), com as imagens normalizadas (Reamostragem Epipolar).



FIGURA 26: Experimento com a câmara digital KODAK PROFESSIONAL PRO 14n - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e normalização do par de imagens.

Na Figura 26a é possível verificar a influência da paralaxe vertical na visualização estereoscópica do modelo. Nesta situação não é possível visualizar estereoscopicamente a cena, devido ao valor elevado de paralaxe (em torno de 10 pixels). Contudo, após o “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior e

conseqüente normalização do par de imagens, a paralaxe foi reduzida a um valor insignificante para efeito de visualização (0,58 pixel), como mostra a Figura 26b, proporcionando a visualização em estereoscopia do modelo.

6.2.2 Experimentos com dados reais: dados provenientes dos sensores de orientação direta (GPS+INS)

Neste experimento foi utilizado um par de imagens digitais aéreas com dados de orientação direta do sensor (GPS+INS). Estes dados foram cedidos pelo *Center for Mapping*, a serviço do Departamento de Transportes (DOT) do estado de Ohio, nos Estados Unidos. O vôo foi realizado com uma câmara digital fabricada pela *Lockheed Martin Fairchild Semiconductors* e os parâmetros de orientação exterior foram determinados a partir da integração entre os sensores GPS *Trimble 4000SSI GPS* (dupla-freqüência) e inercial *Litton LN-100*, com acurácia de 0,3m para (X_0, Y_0, Z_0) e 1' para $(\omega, \varphi, \kappa)$.

As imagens foram coletadas a uma altura de vôo de aproximadamente 650m, escala 1:12000, resolução de 4096 x 4096 pixels, tamanho do pixel igual a 0,015mm e distância focal calibrada de 51,569mm, considerando uma área de imageamento equivalente a um filme de 61mm.

A partir dos valores observados (seis pontos considerados dos nove medidos no modelo), estes parâmetros de orientação exterior foram ajustados com base na abordagem desenvolvida. A Tabela 16 mostra os parâmetros de orientação exterior iniciais, gerados a partir do processamento dos dados fornecidos pelos

sensores GPS e INS, e os parâmetros ajustados, assim como os valores da paralaxe vertical do modelo nestas situações.

TABELA 16: Experimento com imagens digitais apoiadas pelos sensores de orientação direta:

Parâmetros de orientação exterior e paralaxes verticais do modelo, antes e depois do ajustamento.

| Parâmetros OE | Parâmetros de orientação direta (GPS+INS) | Ajustados |
|---|---|--------------|
| $X_0^{Esq} (m)$ | 138670,655 | 138670,649 |
| $Y_0^{Esq} (m)$ | 137211,441 | 137211,369 |
| $Z_0^{Esq} (m)$ | 1355,515 | 1355,297 |
| $\omega^{Esq} (^\circ)$ | 2,93061190 | 2,96582343 |
| $\varphi^{Esq} (^\circ)$ | -1,27860300 | -1,30260697 |
| $\kappa^{Esq} (^\circ)$ | 177,45700910 | 177,48079091 |
| $X_0^{Dir} (m)$ | 138472,650 | 138472,656 |
| $Y_0^{Dir} (m)$ | 137216,778 | 137216,850 |
| $Z_0^{Dir} (m)$ | 1358,557 | 1358,774 |
| $\omega^{Dir} (^\circ)$ | 5,60728800 | 5,57025040 |
| $\varphi^{Dir} (^\circ)$ | -3,93530190 | -3,97882988 |
| $\kappa^{Dir} (^\circ)$ | 177,48427930 | 177,49709949 |
| <i>Paralaxe vertical inicial (mm)</i> | | 0,0583 |
| <i>Paralaxe vertical depois do ajustamento (mm)</i> | | 0,00022 |

Com base nos valores apresentados na Tabela 16, nota-se que os parâmetros de orientação exterior ajustados não são muito diferentes dos parâmetros iniciais (Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre os parâmetros iniciais e ajustados: $EMQ_{CP} = 0,1323m$ e $EMQ_{\text{Ang}} = 0,0321^\circ$), devido a boa qualidade na determinação pelos sensores de orientação direta utilizados. Mesmo assim, a paralaxe vertical do modelo foi reduzida de 0,0583mm (aproximadamente 4 pixels) para um valor mínimo de 0,00022mm (0,015 pixel), mostrando a eficácia da metodologia desenvolvida.

Na análise da qualidade do ajustamento foi adotada a distribuição

χ^2 , com um nível de significância (α) de 5% e seis graus de liberdade ($S = 6$)

resultantes do ajustamento. Nestas condições verificou-se que a hipótese básica não foi rejeitada para o nível de significância estabelecido (5%), pois o valor do χ^2 amostral se mostrou definido no intervalo entre os valores tabelados ($\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ e $\chi^2_{S, 1-\frac{\alpha}{2}}$), como mostram os valores na Tabela 17.

TABELA 17: Teste Qui-quadrado para o experimento realizado com as imagens suportadas pelos parâmetros de orientação direta do sensor.

| Qui-quadrado tabelado | | Qui-quadrado amostral |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| $\chi^2_{S, \frac{\alpha}{2}}$ | $\chi^2_{S, 1-\frac{\alpha}{2}}$ | $\bar{\chi}^2$ |
| 1,24 | 14,45 | 3,38 |

Neste experimento não foi possível realizar a análise da qualidade na determinação de coordenadas de pontos no espaço objeto, pois não foram disponibilizados pontos de controle da área e pelo fato do modelo se encontrar referenciado a um sistema de coordenadas local, o que inviabiliza a obtenção de coordenadas de pontos de controle por meio de produtos cartográficos.

Após o “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior foi aplicado o processo de reamostragem epipolar sobre as imagens. Na Figura 27a segue mostrada uma porção do modelo nas condições iniciais, ou seja, com os parâmetros de orientação exterior fornecidos pela integração entre os sensores GPS e INS. Já a Figura 27b, apresenta a mesma porção do modelo com os parâmetros ajustados e as imagens normalizadas.

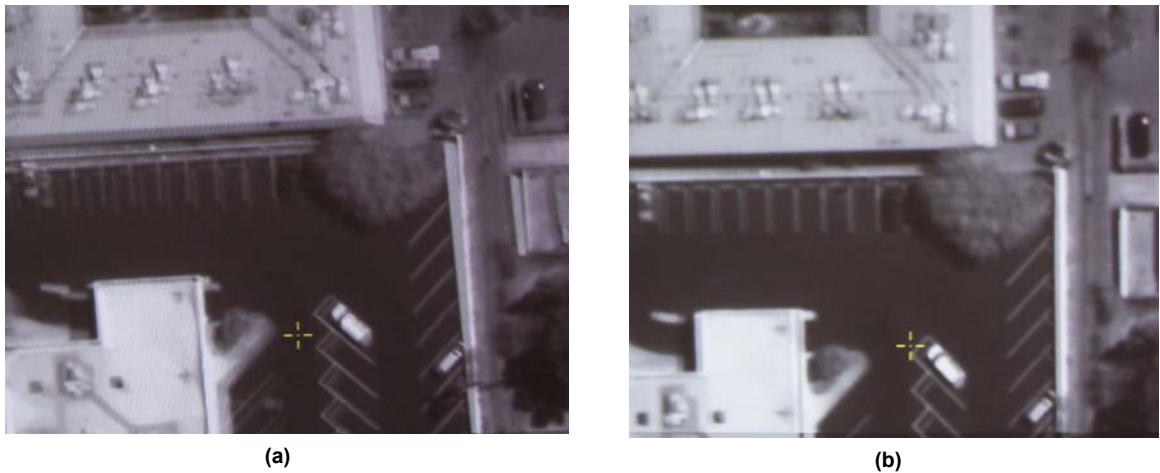


FIGURA 27: Experimento com as imagens apoiadas pelos parâmetros de orientação direta - Paralaxe vertical do modelo: (a) antes do refinamento dos parâmetros de orientação exterior, (b) após o refinamento e normalização do par de imagens.

A partir das imagens apresentadas na Figura 27 pôde-se verificar que a visualização estereoscópica da cena, que antes era prejudicada pelo efeito paralaxe de aproximadamente 4 pixels (Figura 27a), foi melhorada pelo “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior e conseqüente normalização do par de imagens, como pôde ser visto na Figura 27b (paralaxe igual a 0,015 pixel).

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos uma metodologia e algoritmos computacionais para a geração automática de estereomodelos, a partir de imagens coletadas por câmaras digitais integradas a sensores de posição e atitude (GPS+INS). Neste sentido, foi realizado um estudo sobre os sensores de orientação direta; desenvolvida uma metodologia para a identificação automática de pontos homólogos; estabelecido um modelo de orientação modificado para eliminar a paralaxe vertical residual do estereomodelo; desenvolvidas implementações computacionais para a geração automática de estereomodelos, com base na metodologia desenvolvida e; realizados experimentos para avaliar a qualidade dos resultados.

Considerando a qualidade dos parâmetros fornecidos pelos sensores de bordo (GPS + INS), pôde-se constatar, através dos experimentos realizados, que a metodologia abordada é eficaz, reduzindo a paralaxe vertical do modelo a um valor insignificante para efeito de visualização e proporcionando informações de terreno com níveis de exatidão centimétricas, quando realizados os experimentos simulados (Tabela 11).

Os experimentos com dados reais (simulados pela degradação dos parâmetros de OE), influenciados pela instabilidade dos parâmetros de orientação

interior da câmara, mostraram, tanto numericamente como visualmente, que a paralaxe do modelo foi minimizada, proporcionando uma melhor visualização estereoscópica da cena. No que se refere a exatidão dos pontos de verificação, notaram-se erros acentuados nas coordenadas, que provavelmente está relacionado aos parâmetros de calibração das câmaras, já que as câmaras não foram previamente calibradas. Um fato importante a ser considerado é a sistematicidade dos erros, que podem ser modelados por uma transformação de similaridade no espaço.

Foram realizados alguns testes na área de correlação de imagens, a partir dos quais pôde-se perceber que a determinação da posição de pontos homólogos utilizando a estimação subpixel, pelo Método dos Mínimos Quadrados, aumentou a acurácia dos resultados. Além disso, verificou-se que o número de pontos estabelecido pela estratégia 1 (9 pontos) foi suficiente para garantir a solução do modelo, pois o aumento do número de pontos de passagem não trouxe uma melhoria significativa nos resultados. Vale ressaltar que o aumento no número de pontos de passagem traz maior confiabilidade ao processo, uma vez que pontos erroneamente medidos podem ser desconsiderados.

No experimento com as imagens digitais orientadas pelos sensores de bordo (GPS+INS), apesar da boa acurácia dos parâmetros de orientação exterior, notou-se que o modelo apresentava uma paralaxe de aproximadamente quatro pixels e, após o “refinamento” dos parâmetros, a paralaxe foi minimizada a um valor praticamente nulo (0,015 pixel), proporcionando uma melhor visualização estereoscópica da cena. Neste experimento não foi possível verificar a exatidão de pontos no espaço objeto, em virtude da falta de pontos de controle da área e o fato

do modelo estar referenciado a um sistema de coordenadas local, inviabilizando a obtenção de informações de terreno por meio de produtos cartográficos da área.

Verificou-se pelos experimentos práticos realizados que a abordagem desenvolvida pode ser empregada em aplicações que requeiram informações cartográficas com requisitos de resposta rápida, como na segurança pública e na área ambiental, na qual é possível se obter modelos georreferenciados e sem paralaxe, em quase tempo real, para possíveis análises de desastres naturais e antrópicos.

Cabe lembrar que os programas computacionais desenvolvidos neste trabalho de pesquisa foram integrados à biblioteca de classes e funções para Fotogrametria, denominada UPTK (*Unesp Photogrammetry Tool Kit*), projeto pelo qual está sendo desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa de Fotogrametria, do Departamento de Cartografia da FCT/UNESP.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na abordagem e algoritmos computacionais desenvolvidos, pôde-se constatar que algumas modificações e/ou complementações podem ser integradas ao processo:

- Implementação do modelo de colinearidade com restrições de paralaxe para “refinar” os parâmetros de orientação exterior, com o intuito de comparar com os resultados obtidos pela abordagem desenvolvida;

- Desenvolvimento de estudos voltados especificamente a área de correlação de imagens, a fim de definir mais precisamente os critérios para a pré-análise da janela de referência;
- Estabelecimento de uma análise dos resíduos das observações mais robusta, no processo de “refinamento” dos parâmetros de orientação exterior pelo Método dos Mínimos Quadrados, para a eliminação de erros grosseiros;
- Desenvolvimento de experimentos com imagens digitais coletadas por câmaras digitais previamente calibradas, para comparar com os resultados obtidos nos experimentos realizados com as câmaras digitais KODAK DCS420 e KODAK PROFESSIONAL PRO14n.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998, 258p.

BRZEZINSKA, D. A. G. Direct Exterior Orientation Of Airborne Imagery with GPS/INS System: Performance Analysis. **Navigation**, v. 46, n. 4, p. 261-270, 1999.

BURMAN, H. Using GPS and INS for Orientation of Aerial Photography. **ISPRS Workshop: "Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation"**. Barcelona, nov. 1999.

COLOMINA, I. GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the Best Way for Operation Determination of Photogrammetric Image Orientation. **IAPRS**. München, v. 32, Part. 3 – 2W5. September 8-10, 1999.

COSTA, E. R.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Incorporação da Pré-Análise no Processo de Correspondência de Pontos em Fotogrametria Digital. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. 2003, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Rio de Janeiro: SBC, 2003.

CRAMER, M.; STALLMANN, D. On the use of GPS/inertial Exterior Orientation Parameters in Airborne Photogrammetry. **OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings**. Frankfurt, Kartographie und Geodasie, 2002.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Using GPS/Inertial Exterior Orientation Measurements for Photogrammetric Point Determination. **ISPRS Workshop Com III.1: "Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation"**. Barcelona, nov. 1999.

CRAMER, M.; SCHADE, H. Orientation of Photogrammetric Sensors with an Integrated Multi-Antena GPS/Low-cost INS System. In: COLOMINA, I.; NAVARRO, J. **Integrated Sensor Orientation: theory, algorithms and systems**. Heidelberg: Wichmann, p.101-111, 1995.

FRICKER, P.; SANDAU, R.; WALKER, A. S. Multispectral Sensor with Photogrammetric Precision – 'Airborne Digital Three-lines Sensor'. **GIM International Feature**, May, 2000.

FRICKER, P., SANDAU, R., WALKER, A. S. Airborne Digital Sensors – A new Approach. **Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/1, I/3 and IV/4 - Sensors and Mapping from Space**, 1999.

FRYER, J. C. Camera Calibration. In: ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996, 371p.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. 1993. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K. Avaliação geométrica de câmaras de vídeo para uso em fotogrametria digital. In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia, 1999, Recife. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Rio de Janeiro: SBC, 1999.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994, 319p.

GRUEN, A. Least Squares Matching: a fundamental measurement algorithm. In: ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996, 371p.

HARALICK, R; SHAPIRO, L.G.; **Computer and robot vision**. Addison-Wesley Publishing Company, 1993, v.2.

HINZ, O. A. The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System. **Photogrammetric Week**, p. 109 – 115, 1999.

KRAUS, K. **Photogrammetry – Fundamentals and Standard Processes**. UMMLER/BONN, 1993. v.1.

LEHMANN, F. et al. Fully Digital and Automatic Production of Accurate Geodata – ‘The High Resolution Stereo Camera (HRSC-A)’. **GIM International Feature**, July 2000.

MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. New York: IEP, 1976. 497p.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S. MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Inc. New York : John Wiley & Sons, 2001, 479p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrições, fundamentos e aplicações**. São Paulo. Editora UNESP, 2000, 287p.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct Positioning and Orientation Systems How do They Work? What is the Attainable Accuracy? **ASPRS**, 2001.

MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P. Digital Image Georeferencing from a Multiple Camera System by GPS/INS. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing** **56**, p. 1-12, 2001.

PETRIE, G. The Configurations of the New Airborne Digital Imagers – ‘Déjà Vu’. **Geo Informatics**, July/August, 2000.

SANDAU, R. et al. Design Principles of the LH System ADS 40 Airborne Digital Sensor. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Amsterdam, v. XXXIII, Part B1, p. 258 – 265, 2000.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. Ohio: TerraScience, 1999. v.1, 428p.

SEARA, A. Comparison Between Direct Camera Orientation Measurement and Bundle Block Adjustment Determination. OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings. **Kartographie und Geodäsie**. Frankfurt, 2002.

TOMMASELLI, A. M. G. Mapeamento com Câmaras Digitais: Análise de Requisitos e Experimentos. XX Congresso Brasileiro de Cartografia. 2001, Porto Alegre. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Rio de Janeiro: SBC, 2001.

TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K. Modernas Tecnologias de Aquisição de Imagens em Fotogrametria. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 6, nº 1, p. 49-64, 2000.

WOLF, P.R., DEWITT, B.A. **Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS**. 3rd ed. McGRAW-HILL, 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DADOS ESTATÍSTICOS PARA A PRÉ-ANÁLISE DA JANELA DE REFERÊNCIA

Neste apêndice estão presentes os dados estatísticos das áreas de correlação obtidos por meio de experimentos práticos (Tabela 18). Foram realizados testes em áreas de características diversas, conforme apresentado na Tabela 18, visando definir os limiares de aceitação das áreas de correlação na etapa de pré-análise da janela de referência. Pelos resultados obtidos verificou-se que a área amostrada pela janela de referência deve ser rejeitada se a variância do sinal for inferior a 400 ou o traço da MVC superior a 0,05.

TABELA 18: Experimentos com a janela de referência: valores estatísticos para a pré-análise das áreas de correlação.

| Tamanho da janela | Característica da janela | Valores Estatísticos | | | |
|-------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|--------------|----------------------|
| | | Variância do sinal | Variância do ruído | Traço da MVC | Máximo desvio-padrão |
| 9 x 9 | Área em branco | 10,2811 | 3,0801 | 0,0000 | 0,0000 |
| | Área homogênea | 12,5420 | 3,7630 | 0,0088 | 0,0762 |
| | Área de <i>corner</i> | 1397,1347 | 419,1404 | 0,0116 | 0,0854 |
| | Área de borda | 1601,7739 | 480,5321 | 0,1028 | 0,0657 |
| | Área heterogênea | 1274,6100 | 82,3802 | 0,0127 | 0,0961 |
| 15 x 15 | Área em branco | 1,3017 | 0,3905 | 0,0000 | 0,0000 |
| | Área homogênea | 8,9119 | 2,6735 | 0,0023 | 0,0376 |
| | Área de <i>corner</i> | 847,5804 | 254,2741 | 0,0076 | 0,0654 |
| | Área de borda | 641,3723 | 192,4117 | 0,2450 | 0,1731 |
| | Área heterogênea | 1051,9357 | 315,5807 | 0,0047 | 0,0599 |

APÊNDICE B

DERIVADAS PARCIAIS NO AJUSTAMENTO

B.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste apêndice seguem apresentadas as derivadas parciais da equação de coplanaridade (eq. 37) em relação aos parâmetros (Matriz A) e em relação às observações (Matriz B), para o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, baseado no Método Combinado.

Com base na Figura 15, as componentes para os vetores imagens

\bar{a}_E e \bar{a}_D são definidas como:

$$\bar{a}_E = \begin{bmatrix} u_E \\ v_E \\ w_E \end{bmatrix} = M_E^T \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^E x_E + m_{21}^E y_E - m_{31}^E f \\ m_{12}^E x_E + m_{22}^E y_E - m_{32}^E f \\ m_{13}^E x_E + m_{23}^E y_E - m_{33}^E f \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$\bar{a}_D = \begin{bmatrix} u_D \\ v_D \\ w_D \end{bmatrix} = M_D^T \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^D x_E + m_{21}^D y_E - m_{31}^D f \\ m_{12}^D x_E + m_{22}^D y_E - m_{32}^D f \\ m_{13}^D x_E + m_{23}^D y_E - m_{33}^D f \end{bmatrix} \quad (63)$$

sendo:

$(x_E, y_E, -f)$: coordenadas do ponto na imagem da esquerda referenciadas ao sistema fotogramétrico;

$(m_{11}^E, \dots, m_{33}^E)$: elementos do matriz de rotação da imagem da esquerda;

$(x_D, y_D, -f)$: coordenadas do ponto na imagem da direita referenciadas ao sistema fotogramétrico;

$(m_{11}^D, \dots, m_{33}^D)$: elementos do matriz de rotação da imagem da direita;

B.2 DERIVADAS PARCIAIS DA FUNÇÃO EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS

$$\frac{\partial F}{\partial X_0^E} = w_E v_D - v_E w_D$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y_0^E} = u_E w_D - w_E u_D$$

$$\frac{\partial F}{\partial Z_0^E} = v_E u_D - u_E v_D$$

$$\frac{\partial F}{\partial \omega^E} = -(w_E w_D + v_E v_D) b_X + v_E u_D b_Y + w_E u_D b_Z$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \varphi^E} = & \left[(\sin \omega^E \cos \varphi^E \cos \kappa^E x_E - \sin \omega^E \cos \varphi^E \sin \kappa^E y_E - \sin \omega^E \sin \varphi^E f) w_D b_X \right] - \\ & \left[(-\cos \omega^E \cos \varphi^E \cos \kappa^E x_E + \cos \omega^E \cos \varphi^E \sin \kappa^E y_E + \cos \omega^E \sin \varphi^E f) v_D b_X \right] + \\ & \left[(-\cos \omega^E \cos \varphi^E \cos \kappa^E x_E + \cos \omega^E \cos \varphi^E \sin \kappa^E y_E + \cos \omega^E \sin \varphi^E f) u_D b_Y \right] - \\ & \left[(-\sin \varphi^E \cos \kappa^E x_E + \sin \varphi^E \sin \kappa^E y_E - \cos \varphi^E f) w_D b_Y \right] + \\ & \left[(-\sin \varphi^E \cos \kappa^E x_E + \sin \varphi^E \sin \kappa^E y_E - \cos \varphi^E f) v_D b_Z \right] - \\ & \left[(\sin \omega^E \cos \varphi^E \cos \kappa^E x_E - \sin \omega^E \cos \varphi^E \sin \kappa^E y_E - \sin \omega^E \sin \varphi^E f) u_D b_Z \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \kappa^E} = & \left[(\cos \omega^E \cos \kappa^E x_E - \sin \omega^E \sin \varphi^E \sin \kappa^E x_E - \cos \omega^E \sin \kappa^E y_E - \sin \omega^E \sin \varphi^E \cos \kappa^E y_E) w_D b_X \right] - \\ & \left[(\sin \omega^E \cos \kappa^E x_E + \cos \omega^E \sin \varphi^E \sin \kappa^E x_E - \sin \omega^E \sin \kappa^E y_E + \cos \omega^E \sin \varphi^E \cos \kappa^E y_E) v_D b_X \right] + \\ & \left[(\sin \omega^E \cos \kappa^E x_E + \cos \omega^E \sin \varphi^E \sin \kappa^E x_E - \sin \omega^E \sin \kappa^E y_E + \cos \omega^E \sin \varphi^E \cos \kappa^E y_E) u_D b_Y \right] - \\ & \left[(-\cos \varphi^E \sin \kappa^E x_E - \cos \varphi^E \cos \kappa^E y_E) w_D b_Y \right] + \\ & \left[(-\cos \varphi^E \sin \kappa^E x_E - \cos \varphi^E \cos \kappa^E y_E) v_D b_Z \right] - \\ & \left[(\cos \omega^E \cos \kappa^E x_E - \sin \omega^E \sin \varphi^E \sin \kappa^E x_E - \cos \omega^E \sin \kappa^E y_E - \sin \omega^E \sin \varphi^E \cos \kappa^E y_E) u_D b_Z \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_0^D} = v_E w_D - w_E v_D$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y_0^D} = w_E u_D - u_E w_D$$

$$\frac{\partial F}{\partial Z_0^D} = u_E v_D - v_E u_D$$

$$\frac{\partial F}{\partial \omega^D} = (v_D v_E + w_D w_E) b_X - v_D u_E b_Y - w_D u_E b_Z$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \varphi^D} = & \left[(-\cos \omega^D \cos \varphi^D \cos \kappa^D x_D + \cos \omega^D \cos \varphi^D \sin \kappa^D y_D + \cos \omega^D \sin \varphi^D f) v_E b_X \right] - \\ & \left[(\sin \omega^D \cos \varphi^D \cos \kappa^D x_D - \sin \omega^D \cos \varphi^D \sin \kappa^D y_D - \sin \omega^D \sin \varphi^D f) w_E b_X \right] + \\ & \left[(-\sin \varphi^D \cos \kappa^D x_D + \sin \varphi^D \sin \kappa^D y_D - \cos \varphi^D f) w_E b_Y \right] - \\ & \left[(-\cos \omega^D \cos \varphi^D \cos \kappa^D x_D + \cos \omega^D \cos \varphi^D \sin \kappa^D y_D + \cos \omega^D \sin \varphi^D f) u_E b_Y \right] + \\ & \left[(\sin \omega^D \cos \varphi^D \cos \kappa^D x_D - \sin \omega^D \cos \varphi^D \sin \kappa^D y_D - \sin \omega^D \sin \varphi^D f) u_E b_Z \right] - \\ & \left[(-\sin \varphi^D \cos \kappa^D x_D + \sin \varphi^D \sin \kappa^D y_D - \cos \varphi^D f) v_E b_Z \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \kappa^D} = & \left[(\text{sen } \omega^D \cos \kappa^D x_D + \cos \omega^D \text{sen } \varphi^D \text{sen } \kappa^D x_D - \text{sen } \omega^D \text{sen } \kappa^D y_D + \cos \omega^D \text{sen } \varphi^D \cos \kappa^D y_D) v_E b_X \right] - \\ & \left[(\cos \omega^D \cos \kappa^D x_D - \text{sen } \omega^D \text{sen } \varphi^D \text{sen } \kappa^D x_D - \cos \omega^D \text{sen } \kappa^D y_D - \text{sen } \omega^D \text{sen } \varphi^D \cos \kappa^D y_D) w_E b_X \right] + \\ & \left[(-\cos \varphi^D \text{sen } \kappa^D x_D - \cos \varphi^D \cos \kappa^D y_D) v_E b_Y \right] - \\ & \left[(\text{sen } \omega^D \cos \kappa^D x_D + \cos \omega^D \text{sen } \varphi^D \text{sen } \kappa^D x_D - \text{sen } \omega^D \text{sen } \kappa^D y_D + \cos \omega^D \text{sen } \varphi^D \cos \kappa^D y_D) u_E b_Y \right] + \\ & \left[(\cos \omega^D \cos \kappa^D x_D - \text{sen } \omega^D \text{sen } \varphi^D \text{sen } \kappa^D x_D - \cos \omega^D \text{sen } \kappa^D y_D - \text{sen } \omega^D \text{sen } \varphi^D \cos \kappa^D y_D) u_E b_Z \right] - \\ & \left[(-\cos \varphi^D \text{sen } \kappa^D x_D - \cos \varphi^D \cos \kappa^D y_D) v_E b_Z \right] \end{aligned}$$

sendo (b_X, b_Y, b_Z) as componentes da aerobase, dadas por:

$$\begin{bmatrix} b_X \\ b_Y \\ b_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0^D - X_0^E \\ Y_0^D - Y_0^E \\ Z_0^D - Z_0^E \end{bmatrix} \quad (64)$$

B.3 DERIVADAS PARCIAIS DA FUNÇÃO EM RELAÇÃO AS OBSERVAÇÕES

$$\frac{\partial F}{\partial x_E} = (m_{12}^E w_D - m_{13}^E v_D) b_X + (m_{13}^E u_D - m_{11}^E w_D) b_Y + (m_{11}^E v_D - m_{12}^E u_D) b_Z$$

$$\frac{\partial F}{\partial y_E} = (m_{22}^E w_D - m_{23}^E v_D) b_X + (m_{23}^E u_D - m_{21}^E w_D) b_Y + (m_{21}^E v_D - m_{22}^E u_D) b_Z$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_D} = (m_{13}^D v_E - m_{12}^D w_E) b_X + (m_{11}^D w_E - m_{13}^D u_E) b_Y + (m_{12}^D u_E - m_{11}^D v_E) b_Z$$

$$\frac{\partial F}{\partial y_D} = (m_{23}^D v_E - m_{22}^D w_E) b_X + (m_{21}^D w_E - m_{23}^D u_E) b_Y + (m_{22}^D u_E - m_{21}^D v_E) b_Z$$

APÊNDICE C

ESTRUTURAS DOS ARQUIVOS DE ENTRADA PARA OS MÓDULOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS

C.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta seção será apresentada a forma de estruturar os arquivos de entrada para os programas desenvolvidos. Tais arquivos estão padronizados de tal forma a facilitar a formatação e a leitura dos dados. Os arquivos de entrada de dados possuem extensão “.dat”, devido a uma padronização adotada pelos membros do Grupo de Pesquisa em Fotogrametria desta instituição.

De acordo com os módulos computacionais desenvolvidos foram gerados os seguintes arquivos de dados:

- *paramOl.dat*;
- *imagem.dat*;
- *correlação.dat*;
- *obs.dat*.

C.2 ARQUIVO DE DADOS *ParamOI.dat*

O arquivo *ParamOI.dat* contém os parâmetros de orientação interior da câmara, além dos parâmetros de calibração e dados necessários à correção dos efeitos sistemáticos. A Figura 28 mostra um exemplo deste arquivo com a definição dos dados presentes.

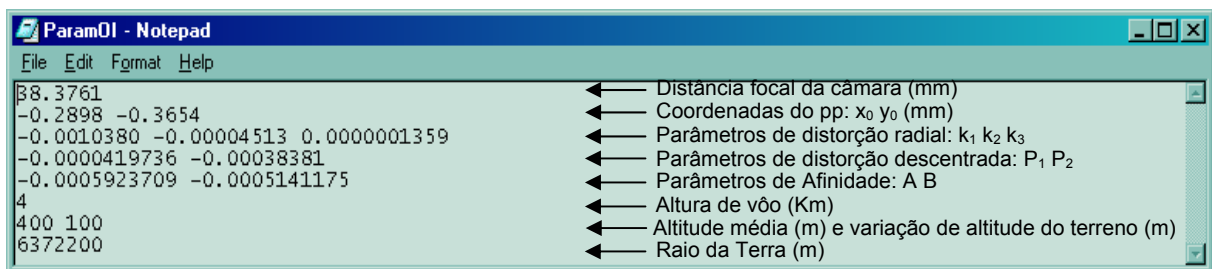


FIGURA 28: Exemplo do arquivo *ParamOI.dat*.

C.3 ARQUIVO DE DADOS *Imagem.dat*

O arquivo *Imagem.dat* é composto pelos dados das imagens que compõem o estereopar e pelos parâmetros de orientação exterior que as definem. A Figura 29 esclarece os dados presentes neste arquivo.

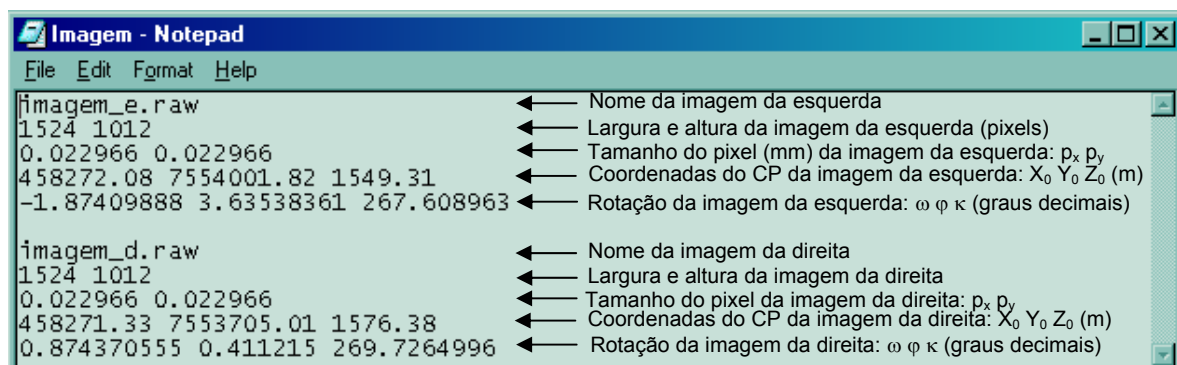


FIGURA 29: Exemplo do arquivo *Imagem.dat*.

C.4 ARQUIVO DE DADOS *correlacao.dat*

O arquivo denominado *correlação.dat*, apresentado na Figura 30, especifica os dados necessários à realização da correlação automática de imagens, como o tamanho da janela de referência e a estratégia de correlação, a qual está relacionada ao número de pontos de passagem a serem medidos no modelo:

- Estratégia 1: 9 pontos;
- Estratégia 2: 15 pontos.

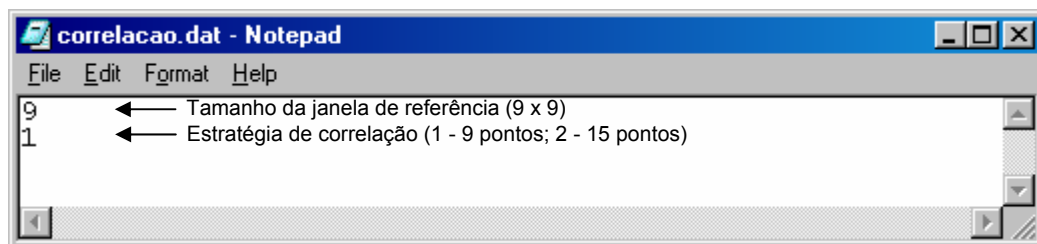


FIGURA 30: Exemplo do arquivo *correlacao.dat*.

C.5 ARQUIVO DE DADOS *Obs.dat*

No arquivo *Obs.dat* estão presentes as coordenadas, definidas no sistema de imagem, relacionadas aos pontos de passagem medidos por correlação. Este arquivo corresponde ao arquivo de saída do processo de correspondência de imagens, sendo usado como arquivo de entrada para o processo de ajustamento dos parâmetros de orientação exterior baseado na restrição de coplanaridade. A Figura 31 ilustra um exemplo deste arquivo. A primeira linha do arquivo indica o número de pontos medidos por correlação. A partir da segunda linha, as duas primeiras colunas listam as coordenadas (coluna, linha) dos pontos medidos na

imagem da esquerda, enquanto que as outras duas colunas representam as coordenadas (coluna, linha) dos pontos homólogos na imagem da direita.

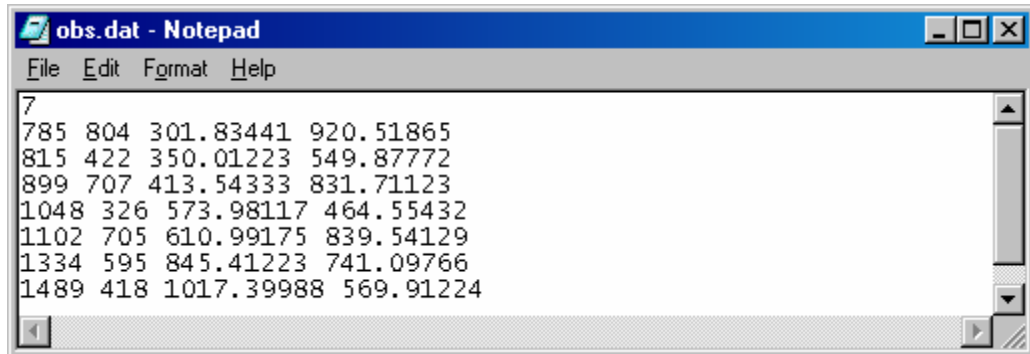


FIGURA 31: Estrutura do arquivo *Obs.dat*.