



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Câmpus de Presidente Prudente

JULIO CESAR SCALCO

**ORIENTAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE
IMAGENS CBERS USANDO RODOVIAS COMO
CONTROLE DE CAMPO**

Dissertação de Mestrado

Presidente Prudente
2006



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Câmpus de Presidente Prudente

JULIO CESAR SCALCO

**ORIENTAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE IMAGENS
CBERS USANDO RODOVIAS COMO CONTROLE DE
CAMPO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, para obtenção do título de mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz.

Presidente Prudente
2006

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
UNESP – FCT – Campus de Presidente Prudente

S293o Scalco, Julio Cesar.

Orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo / Julio Cesar Scalco. – Presidente Prudente: [s.n.], 2006
128 f.: il.

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

Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz

Bancas: João Fernando Custódio da Silva, Daniel Rodrigues dos Santos

1. Imagens CBERS. 2. Controle de campo. 3. DLT. 4. Extração de rodovias. 5. Orientação de imagens. I. Dal Poz, Aluir Porfírio. II. Silva, João Fernando Custódio da. III. Santos, Daniel Rodrigues dos. IV. Título.

CDD (18.ed.) 623.71



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

DEFESA DE DISSERTAÇÃO de JULIO CESAR SCALCO, realizada no dia 28 de agosto de 2006.

RELATÓRIO FINAL

Foi realizada, no dia 28 de agosto de 2006, a DEFESA DE DISSERTAÇÃO de **JULIO CESAR SCALCO**, aluno regular do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS desta Unidade Universitária.

O candidato apresentou o trabalho intitulado : ORIENTAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE IMAGENS CBERS USANDO RODOVIAS COMO CONTROLE DE CAMPO, tendo como Orientador o Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ.

A Comissão examinadora foi constituída pelos membros: Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ, Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente; Dr. JOAO FERNANDO CUSTODIO DA SILVA, Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente e Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS, DEPARTAMENTO DE GEOMÁTICA- UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ que elaborou o seguinte relatório:

O candidato evidenciou domínio do assunto e de acordo com os conceitos atribuídos pelos examinadores, foi considerado Aprovado, o que lhe concede o direito de receber, regimentalmente, o título de MESTRE em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, devendo este resultado ser homologado pela douta Congregação desta Unidade Universitária.

PRESIDENTE PRUDENTE, 28 de agosto de 2006.



Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ



Prof. Dr. JOAO FERNANDO CUSTODIO DA SILVA



Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS

DEDICATÓRIA

A Deus, por sempre ter me dado saúde, força e me iluminado com sabedoria para que eu pudesse enfrentar as dificuldades e vencer mais essa batalha.

Aos meus queridos pais, Maria Helena e Luiz (*in memorium*), que me apoiaram e fizeram de tudo para que eu alcançasse mais essa conquista.

À minha adorada irmã, Patrícia, pelo apoio, conselhos, ensinamentos e incentivo.

À minha amada noiva, Lauri, pelo carinho, companhia, alegria, compreensão, apoio, incentivo, opiniões e sugestões.

Aos meus amigos e familiares que sempre me apoiaram, incentivaram e acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, que durante os anos de orientação sempre acreditou na minha capacidade, procurando me apoiar e incentivar aos caminhos futuros. Obrigado pela oportunidade de trabalhar contigo, por ter compartilhado parte do seu conhecimento, pelos momentos em que me apoio, pelas vezes em que me ajudou a melhorar, pelas críticas, sempre construtivas, e sugestões.

Aos membros da banca examinadora, pela predisposição em analisar este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro atribuído a essa pesquisa, sob forma de bolsa de demanda social.

À Empresa ENGEMAP Engenharia e Mapeamento LTDA por ter disponibilizado os dados planimétricos das rodovias estaduais da região de Presidente Prudente utilizados como controle de campo na pesquisa.

A todo o pessoal do Laboratório de Fotogrametria Digital e da sala de permanência do PPGCC, em especial: Aninha, Rodrigo (Danone), Fazan, Edinéia, Zanin, Giovane, Marcelo, Edgar e Guilherme (Poleszuk).

Aos professores do Departamento de Cartografia e do PPGCC pela contribuição na minha formação acadêmica.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“O maior obstáculo na estrada do sucesso é a sensação de que as grandes coisas estão fora de nosso alcance”.

Dr. David Schwartz

“A pessoa que nunca comete erros é aquela que nunca faz coisa alguma. Não tenha medo de errar, pois você aprenderá a não cometer duas vezes o mesmo erro”.

Roosevelt

RESUMO

Nesta pesquisa é proposta uma metodologia para a orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. Baseia-se numa estratégia iterativa envolvendo três etapas. Na primeira etapa um operador identifica na imagem as rodovias de controle de campo e fornece alguns pontos sementes, distribuídos grosseira e esparsamente ao longo ou nas imediações das rodovias. Estes pontos sementes são utilizados pelo algoritmo de otimização de programação dinâmica para extrair as rodovias na imagem. Na segunda etapa são estabelecidas correspondências pontuais entre as rodovias de controle e as correspondentes rodovias extraídas na imagem. Na terceira etapa as correspondências pontuais são utilizadas para orientar a imagem usando a DLT (*Direct Linear Transformation*). As duas últimas etapas do processo são iteradas até que se verifique a estabilização do processo de orientação. Os resultados experimentais possibilitaram verificar que a metodologia proposta foi eficiente com várias imagens teste. Em todos os casos se verificou a convergência do processo de orientação. Além disso, os parâmetros estimados de orientação possibilitaram o registro de rodovias de verificação com acurácia no nível do pixel ou melhor.

Palavras Chave: Imagem CBERS; Controle de Campo; DLT; Extração de Rodovias; Orientação de Imagens.

ABSTRACT

In this research is proposed a methodology for semiautomatic CBERS image orientation using roads as ground control. It is based on an iterative strategy involving three steps. In the first step, an operator identifies on the image the ground control roads and supplies along them a few distributed seed points, which could be sparsely and coarsely distributed. These seed points are used by the dynamic programming algorithm for extracting the ground control roads from the image. In the second step, it is established the correspondences between points describing the ground control roads and the corresponding ones extracted from the image. In the last step, the corresponding points are used to orient the CBERS image by using the DLT (Direct Linear Transformation). The two last steps are iterated until the convergence of the orientation process is verified. Experimental results showed that the proposed methodology was efficient with several test images. In all cases the orientation process converged. Moreover, the estimated orientation parameters allowed the registration of check roads with pixel accuracy or better.

Key words: CBERS Image; Ground Control; DLT; Road Extraction; Image Orientation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Considerações Iniciais	13
1.2. Objetivos.....	16
1.3. Estrutura do Relatório.....	16
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	17
2.1. Introdução.....	17
2.2. Geometria de Sensores de Varredura Eletrônica.....	17
2.2.1. Sensores Existentes	17
2.2.2. Varredura Eletrônica.....	18
2.2.3. Satélite CBERS	21
2.3. Metodologias de Orientação de Sensores de Varredura Eletrônica	25
2.3.1. Métodos Indiretos	26
2.3.1.1. Modelos Rigorosos	26
2.3.1.2. Modelos Aproximados	29
2.3.2. Métodos Híbridos	36
2.4. Extração Semi-Automática de Rodovias	36
2.4.1. Uso de Feições Lineares em Fotogrametria	36
2.4.2. Algoritmo de Programação Dinâmica	38
2.4.3. Noções Sobre Modelagem e Extração de Rodovias.....	44
2.4.4. Extração Semi-Automática de Rodovias Utilizando Programação Dinâmica.....	46
2.4.4.1 Modelo Matemático de Rodovia	47
2.4.4.2 Solução do Modelo Matemático de Rodovia	52
2.5. Princípios de Determinação de Correspondência entre Feições.....	54
2.6 Orientação de Imagens CBERS usando a DLT.....	56
3. PROPOSTA METODOLÓGICA	60
3.1. Considerações Iniciais	60
3.2. Extração de Rodovias.....	61
3.3. Estabelecimento da Correspondência entre as Rodovias Georreferenciadas e as Correspondentes Extraídas na Imagem	61
3.3.1. Determinação de Correspondência entre Rodovias Homólogas pelo Critério de Distância Mínima	62
3.3.2. Refinamento do Critério de Distância Mínima.....	65
3.4. Orientação da Imagem.....	69
3.5. Critério de Convergência.....	69
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	70
4.1. Considerações Iniciais	70
4.2. Material e Métodos.....	70
4.2.1 Materiais	70
4.2.2 Metodologia de Avaliação.....	72
4.2.3 Determinação da Resolução Final dos Parâmetros de Rotação e Translação utilizados no Refinamento da Correspondência	73
4.3. Experimentos e Análise dos Resultados.....	74
4.3.1 Experimento – 1	75
4.3.1.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação	76
4.3.1.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação	80
4.3.1.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias	82
4.3.2 Experimento – 2	84

4.3.2.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação	85
4.3.2.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação	89
4.3.2.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias	91
4.3.3 Experimento – 3	91
4.3.3.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação	92
4.3.3.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação	96
4.3.3.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias	98
4.3.4 Experimento – 4	98
4.3.4.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação	100
4.3.4.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação	104
4.3.4.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias	106
4.3.5 Experimento – 5	107
4.3.5.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação	108
4.3.5.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação	115
4.3.5.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias	119
4.4. Síntese.....	120
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
5.1 Conclusões.....	121
5.2 Recomendações	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação de uma imagem por um sensor linear (SPOT).....	19
Figura 2 – Sistema de coordenadas para uma imagem SPOT.....	20
Figura 3 – Padrão das tabelas de máximo de f_k	40
Figura 4 – Definição das funções g_i	42
Figura 5 – Primeiro passo de resolução.....	42
Figura 6 – Segundo passo de resolução: (a) $f_1(x_2) + g_2(x_2, x_3)$; e (b) $f_2(x_3)$	43
Figura 7 – Terceiro passo de resolução: (a) $f_2(x_3) + g_3(x_3, x_4)$; e (b) $f_3(x_4)$	44
Figura 8 - Polígono representando a rodovia.....	50
Figura 9 – Estabelecimento de Correspondência entre as malhas extraída e de referência: (a) Ilustração do problema de digitalização do eixo da rodovia (–); e (b) Princípio para estabelecimento de correspondência.....	56
Figura 10 – Metodologia de orientação.....	60
Figura 11 – Projeção ortogonal de um ponto na reta.....	63
Figura 12 – Feições homólogas com diferenças sistemáticas.....	65
Figura 13 – Representação do espaço de busca para $K = 3$,.....	68
Figura 14 – Determinação da rotação ($\delta\alpha$).....	73
Figura 15 – Áreas selecionadas para os experimentos.....	74
Figura 16 – Parte superior esquerda da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.....	75
Figura 17 – Experimento 1: início do processo de orientação.....	76
Figura 18 – Experimento 1: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.....	78
Figura 19 – Experimento 1: Avaliação Externa: (a) Rodovia Controle 1; (a ₁) Trecho da Rodovia Controle 1; (b) Rodovia Controle 2; e (c) Rodovia Controle 3.....	81
Figura 20 – Parte superior direita da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.....	84
Figura 21 – Experimento 2: início do processo de orientação.....	85
Figura 22 – Experimento 2: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.....	87
Figura 24 – Parte inferior esquerda da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.....	92
Figura 25 – Experimento 3: início do processo de orientação.....	93
Figura 26 – Experimento 3: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.....	94
Figura 27 – Experimento 3: Avaliação Externa: Rodovia Controle 1.....	97
Figura 28 – Parte inferior direita da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.....	99
Figura 29 – Experimento 4: início do processo de orientação.....	100
Figura 30 – Experimento 4: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.....	102
Figura 31 – Experimento 4: Avaliação Externa: Rodovia Controle 1.....	105
Figura 32 – Toda imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.....	107
Figura 33 – Experimento 5: início do processo de orientação (recorte 1).....	108
Figura 34 – Experimento 5: início do processo de orientação (recorte 2).....	109
Figura 35 – Experimento 5: início do processo de orientação (recorte 3).....	110

Figura 36 – Experimento 5: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação (recorte 1).....	111
Figura 37 – Experimento 5: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação (recorte 2).....	112
Figura 38 – Experimento 5: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação (recorte 3).....	113
Figura 39 – Experimento 5: Avaliação Externa: (a) Controle 1; (b) Controle 2 Trecho 1; (b ₁) Detalhe do Controle 2 Trecho 1 e (c) Controle 2 Trecho2.....	116
Figura 40 – Experimento 5: Avaliação Externa: Controle 3.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da câmera WFI.	23
Tabela 2 – Características da Câmera Imageadora de Alta Resolução.	24
Tabela 3 – Características da câmera IRMSS.	25
Tabela 4 – Experimento 1: distâncias médias no processo de orientação.	79
Tabela 5 – Experimento 1: avaliação externa da orientação.	81
Tabela 6 – Experimento 1: avaliação da extração.	83
Tabela 7 – Experimento 2: distâncias médias no processo de orientação.	88
Tabela 8 – Experimento 2: avaliação externa da orientação.	90
Tabela 9 – Experimento 2: avaliação da extração.	91
Tabela 10 – Experimento 3: distâncias médias no processo de orientação.	95
Tabela 11 – Experimento 3: avaliação externa da orientação.	97
Tabela 12 – Experimento 3: avaliação da extração.	98
Tabela 13 – Experimento 4: distâncias médias no processo de orientação.	103
Tabela 14 – Experimento 4: avaliação externa da orientação.	105
Tabela 15 – Experimento 4: avaliação da extração.	106
Tabela 16 – Experimento 5: distâncias médias no processo de orientação.	114
Tabela 17 – Experimento 5: avaliação externa da orientação.	117
Tabela 18 – Experimento 5: avaliação da extração.	119
Tabela 19 – Distâncias médias globais obtidas nos experimentos.	120

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A orientação exterior de imagem é um problema básico em Fotogrametria, sendo indispensável para o georreferenciamento da própria imagem ou de feições cartográficas coletadas sobre a mesma. O processo de orientação pode ser dividido em três tipos básicos:

1) *Direto* – nesse caso, os parâmetros de orientação são obtidos diretamente usando, por exemplo, o GPS (*Global Positioning System*) e um INS (*Inertial Navigation System*), que permitem, respectivamente, a medida da posição e da atitude no instante de tomada da imagem;

2) *Indireto* – nesse caso, um modelo matemático, como o de colinearidade, e informações de apoio de campo medidas nos espaços imagem e objeto, são utilizadas para estimar, geralmente pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), os parâmetros de orientação exterior; e

3) *Híbrido* – esse é o caso quando nem todos os parâmetros de orientação exterior são medidos diretamente (por exemplo, só a posição de tomada medida pelo GPS) ou quando todos são medidos com precisão insuficiente, havendo a necessidade de refiná-los, a posteriori, com algumas informações de controle de campo, com uso do 2º tipo de metodologia.

A modelagem da geometria de imageamento é necessária para estabelecer as relações entre pontos dos espaços imagem e objeto. Vários modelos matemáticos foram propostos para esta finalidade, sendo que o mais popular é a equação de colinearidade, que é bastante utilizada na Aerofotogrametria (MIKHAIL et al., 2001). Independente do tipo, os modelos matemáticos relacionam parâmetros (por exemplo, a distância focal calibrada) e

variáveis. Estas últimas são geralmente as coordenadas de pontos dos espaços imagem (2D) e objeto (3D) e os parâmetros de orientação exterior. Já estes parâmetros são de particular interesse, pois, uma vez estimados, possibilitam o georreferenciamento da imagem ou de feições extraídas da mesma.

Para a modelagem geométrica de imagens, como as dos sistemas SPOT, CBERS, IKONOS, QuickBird etc., que são adquiridas por sensores de varredura eletrônica (*pushbroom*), muitos modelos geométricos diferentes em complexidade, rigor e precisão variada, foram desenvolvidos, como descritos em Fritsch e Stallmann (2000), Hattori et al., (2000), Dowman e Michalis (2003) e Poli (2004). As principais abordagens incluem modelos rigorosos e modelos aproximados, tais como: modelos de polinômios racionais, Transformações Lineares Diretas (DLT) e projeções afins. Os modelos rigorosos modelam rigorosamente a geometria interna e externa do sensor. Um exemplo de aplicação desse tipo de modelo é encontrado em Fritsch e Stallmann (2000), cujas imagens utilizadas foram as de alta resolução do sistema MOMS-2, que também opera no modo de varredura eletrônica. A solução usada pelos autores foi adaptada a partir do processo de fototriangulação por feixes de raios com auto-calibração, bastante utilizado em Fotogrametria, como pode ser visto, por exemplo, em Dal Poz (1989). Os parâmetros de orientação exterior (posição e atitude da Câmera ou sensor) são modelados por polinômios de 2º grau em função do tempo, dando origem a uma equação de colinearidade modificada. O processo de orientação é indireto, cujas incógnitas a estimar são os parâmetros polinomiais (para atitude e posição) e os dois parâmetros de orientação interior (distância focal e ponto principal). Diferente dos modelos rigorosos, os aproximados não modelam explicitamente os parâmetros de orientação interior e exterior. Em outras palavras, os parâmetros envolvidos geralmente não possuem significado físico ou geométrico. Os modelos vão desde uma simples transformação afim (OKAMOTO et al., 1998) ou função polinomial (OKAMOTO et al., 1999) até os mais elaborados envolvendo

as funções racionais (TAO et al., 2000) e a DLT (KARARA, 1989 e EL-MANADILI e NOVAK, 1996). Diversas abordagens 2D e 3D têm sido descritas para tentar resolver este problema (VALADAN e SADEGHIAN (2003); SADEGHIAN e DELAVAR (2003); DOWMAN e TAO (2002); HANLEY e FRASER (2001); TAO e HU (2002)). Eles não requerem parâmetros de orientação interior ou informações de efemérides da órbita. A solução da transformação do espaço objeto para o espaço imagem é baseada somente em pontos de controle terrestre. A grande vantagem desses modelos é a simplicidade, tanto matemática como algorítmica, não havendo necessidade de entendimento da geometria de imageamento. Por outro lado, os modelos rigorosos propiciam maior precisão e uma análise estatística mais confiável dos resultados do processo de orientação.

Os métodos de orientação baseados em funções de polinômios racionais, projeções afins e DLT são principalmente usados para imagens de satélite. Eles podem ser uma possível alternativa quando os dados de calibração (distância focal calibrada, coordenadas do ponto principal, distorções das lentes) não são liberados pelos provedores das imagens ou quando a posição e a atitude do sensor não estão disponíveis com precisão suficiente (POLI, 2004).

Em se tratando de imagens de satélite de varredura eletrônica, como o IKONOS e o QuickBird, os parâmetros de orientação são determinados diretamente, mas ainda não são disponibilizados ao usuário. Principalmente por este motivo, somente a metodologia indireta de orientação pode ser aplicada. Já no caso das imagens do satélite SPOT e CBERS os parâmetros de órbita e atitude do satélite são disponibilizados, então pode-se usar um processo de refinamento dos dados de órbita e atitude, como por exemplo, através da utilização das equações de colinearidade modificadas e do Filtro de Kalman (DAL POZ, 1991).

Neste trabalho é proposta uma metodologia indireta de orientação semi-automática de imagens CBERS usando a Transformação Linear Direta (DLT) e feições rodoviárias como controle de campo. A principal motivação é a possibilidade de se encontrar malha viária suficientemente em regiões mais povoadas em imagens de baixa resolução, como as do CBERS, além da possibilidade de gerar centenas de pontos de apoio automaticamente.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos desta pesquisa são:

- Desenvolver e implementar uma metodologia para orientação semi-automática de imagens CBERS usando a DLT e feições lineares, rodovias, como controle de campo;
- Avaliar experimentalmente a metodologia proposta, verificando seu potencial de aplicação envolvendo imagens de satélite CBERS.

1.3. Estrutura do Relatório

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica dos tópicos mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

A proposta metodológica desenvolvida na pesquisa é apresentada no capítulo 3.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e as respectivas análises, possibilitando a verificação do potencial da metodologia proposta na orientação de imagens CBERS.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões, recomendações e algumas considerações finais.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados tópicos importantes para o desenvolvimento deste trabalho. Na seção 2.2 serão vistos assuntos relacionados com a Geometria dos Sensores de Varredura Eletrônica. Na seção 2.3 são apresentadas metodologias de Orientação de Sensores de Varredura Eletrônica. Na seção 2.4 será vista a metodologia de extração semi-automática usando programação dinâmica. Já a seção 2.5 trará o princípio da determinação de correspondência entre feições. Finalmente, na seção 2.6 é apresentada a orientação de imagens CBERS utilizando a DLT.

2.2. Geometria de Sensores de Varredura Eletrônica

2.2.1. Sensores Existentes

Atualmente, vários tipos de sensores digitais podem ser usados em trabalhos fotogramétricos, como por exemplo, câmeras matriciais (*Z/I Systems*), câmeras lineares (HRV/SPOT), filmadoras etc..

Segundo Tommaselli et al. (2000), os sensores digitais são constituídos basicamente por um sistema de lentes, um ou mais *chips* com detectores CCD (*Charge Coupled Device*), processadores e memória para armazenamento, ou seja, trata-se de um pequeno computador, possuindo capacidade de processamento e comunicação.

Os sensores digitais, em função da disposição dos fotodetectores, podem ser agrupados em sensores matricial, linear ou trilinear.

Os sensores matriciais são constituídos por um arranjo matricial de detectores CCD e a cena é capturada em um único instante. Estes sensores são os chamados

sensores de quadro. As câmeras de mão, filmadoras e até as mais recentes câmeras aéreas pertencem a este grupo.

Os sensores lineares são constituídos de um arranjo linear de detectores do tipo CCD e a imagem é formada a partir de um processo dinâmico, ou seja, a cada intervalo de tempo uma linha de uma imagem é formada. Este tipo sensor é encontrado nos satélites IKONOS, QuickBird, SPOT, CBERS, etc..

Segundo Tommaselli et al. (2000) o *scanner* trilinear é um sistema baseado no uso de três sensores lineares simultaneamente. Cada um destes sensores registra uma faixa do terreno, sendo uma faixa na direção nadir, uma à frente e outra para trás. Com o deslocamento da aeronave e a aquisição contínua, cada porção da superfície é imageada três vezes, o que é importante em termos de recuperação da posição tridimensional.

2.2.2. Varredura Eletrônica

Os sensores de varredura eletrônica são fotodetectores organizados em uma única linha e, diferente dos sensores de quadro, onde toda a imagem é formada instantaneamente, num sensor linear a imagem é formada num processo de varredura linha a linha, ou seja, num processo dinâmico (WOLF e DEWITT, 2000). A cada intervalo de tempo uma linha de uma imagem é formada (Figura 1). Cada linha é gerada por uma projeção central, análogo às fotografias aéreas, mas com a diferença de que os parâmetros de orientação exterior são função do tempo (GONÇALVES e DOWMAN, 2002). Além disso, pode ocorrer variação da velocidade do satélite durante o período de formação da imagem. Por exemplo, no caso de imagens HRV-SPOT todas as linhas de uma imagem são integradas em aproximadamente 9s, resultando em imagens de 6000 x 6000 pixels no modo pancromático e 3000 x 3000 pixels no modo multiespectral (DAL POZ, 1991). De um modo

geral, a imagem é formada por um movimento de varredura conforme a plataforma se desloca ao longo de sua trajetória.

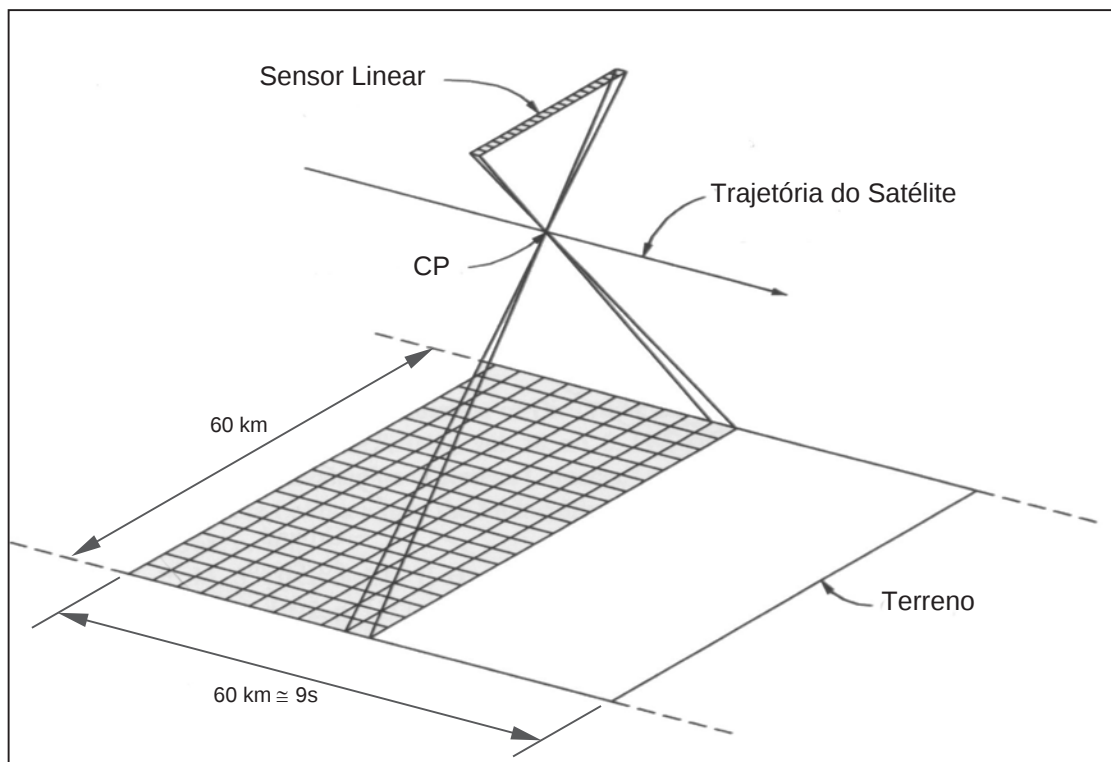


Figura 1 – Formação de uma imagem por um sensor linear (SPOT)
(Fonte: Adaptado de WOLF e DEWITT, 2000).

A Figura 2 apresenta a obtenção de uma imagem a partir de um sensor linear de imageamento. Os eixos x, y, z definem o Sistema de Coordenadas do Espaço Imagem. A origem do sistema é dada no centro de cada linha imageada. O eixo y é paralelo ao sensor, apontando para leste na passagem descendente. O eixo z é perpendicular ao eixo y e é definido pela direção oposta do eixo ótico do sensor. O eixo x torna o sistema dextrógiro, sendo então apontado na direção do movimento do satélite.

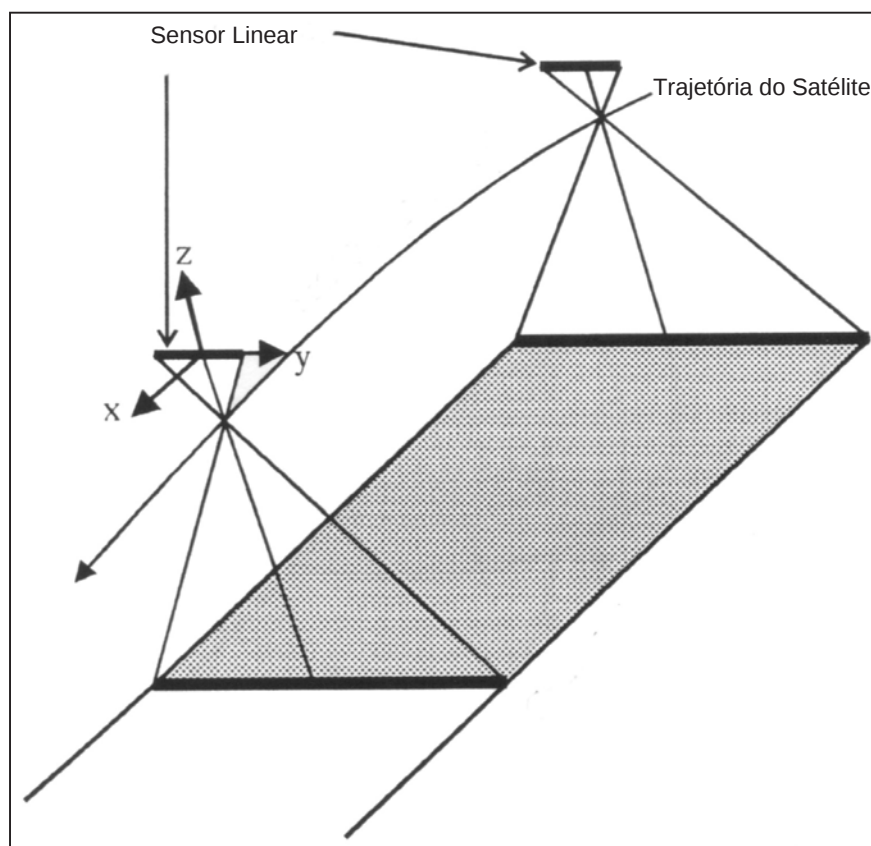


Figura 2 – Sistema de coordenadas para uma imagem SPOT
(Fonte: ZOEJ e PETRIE, 1998).

Segundo Mikhail (2001), a rigidez geométrica das imagens formadas por este tipo de sensor é fraca, pois cada linha é uma imagem independente e tem sua própria posição e orientação devido ao movimento da plataforma. Uma solução para melhorar este problema é o uso de sensores de navegação como o Sistema de Posicionamento Global (GPS) ou Sistema de Navegação Inercial (INS), e também usar combinação de sensores lineares.

Estes sensores mesmo contendo apenas um CCD têm a capacidade de girar ao longo da direção de voo (em torno de x), rastreando novamente a mesma área de interesse e desse modo fornecendo imagens estéreo.

As aplicações dos sensores de varredura eletrônicas em relação às aplicações de imageamento por quadro são mais complexas em relação ao processamento dos dados, requerendo maior esforço computacional durante a série de processamentos

subseqüentes incluindo o *matching*, geração de DTM (*Digital Model Terrain*) e geração de ortoimagem (TOUTIN, 2002).

2.2.3. Satélite CBERS

As informações sobre o satélite CBERS podem ser encontradas no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE):

http://www.cbers.inpe.br/pt/programas/cbers1-2_scd.htm.

Os satélites CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), que foram constituídos a partir de uma parceria Brasil e China, fazem parte do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais que, baseado na utilização de satélites e plataformas de coleta de dados (PCDs) distribuídas pelo território nacional, objetiva fornecer ao país dados ambientais diários coletados nas diferentes regiões do território nacional.

Os dados coletados pelos satélites do Sistema são utilizados em diversas aplicações, tais como a previsão de tempo, estudos sobre correntes oceânicas, marés, química da atmosfera, planejamento agrícola, entre outras, através de mais de 600 plataformas instaladas no território nacional. Uma aplicação de grande relevância é o monitoramento das bacias hidrográficas pelas redes de plataformas da ANA (Agência Nacional de Águas) e do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), que fornecem diariamente os dados fluviométricos e pluviométricos do Brasil.

O primeiro satélite desenvolvido, o CBERS-1, foi lançado com grande sucesso pelo foguete chinês Longa Marcha 4B, do Centro de Lançamento de Taiyuan em 14 de outubro de 1999. O CBERS-2 é tecnicamente idêntico ao CBERS-1 e foi lançado com sucesso no dia 21 de outubro de 2003, partindo do Centro de Lançamento de Taiyuan, na China.

Os satélites CBERS-1 e 2 são compostos por dois módulos. O módulo "carga útil" acomoda os sistemas ópticos (CCD *High Resolution* – Câmera Imageadora de Alta Resolução, IRMSS – Imageador por Varredura de Média Resolução e WFI – Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada) usadas para observação da Terra e o Repetidor para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais, e o módulo "serviço" que contém os equipamentos que asseguram o suprimento de energia, os controles, as telecomunicações e demais funções necessárias à operação do satélite.

A órbita do CBERS é heliosíncrona a uma altitude de 778 km com inclinação de 98,504°, perfazendo cerca de 14 revoluções por dia. Nesta órbita, o satélite cruza o Equador sempre na mesma hora local, 10:30h da manhã, permitindo assim que se tenha sempre as mesmas condições de iluminação solar para a comparação de imagens tomadas em dias diferentes.

O satélite permite a cobertura da Terra em 26 dias. Esse é o tempo necessário para se ter imagens de todo o globo terrestre com suas câmeras Imageadora de Alta Resolução e IRMSS, que possuem campos de visada de 113 Km e 120 Km, respectivamente. Já com a câmera WFI, que consegue imagear uma faixa de 890 km de largura, o tempo necessário para uma cobertura global é de 5 dias.

A capacidade de apontamento lateral da Câmera Imageadora de Alta Resolução aliada ao tipo de órbita do satélite torna possível obter-se pares estereoscópicos de uma certa região com um intervalo de três dias entre duas imagens.

Os satélites CBERS-1 e 2 são equipados com câmeras para observações ópticas de todo o globo terrestre, além de um sistema de coleta de dados ambientais. São sistemas únicos devido ao uso de câmeras que combinam características especiais para resolver a grande variedade de escalas temporais e espaciais típicas de nosso ecossistema.

Uma característica exclusiva dos satélites CBERS-1 e 2 é a diversidade de câmeras com diferentes resoluções espaciais e frequências de coleta de dados.

O Imageador de Amplo Campo de Visada (WFI) produz imagens de uma faixa de 890 km de largura, permitindo a obtenção de cartas-imagem com resolução espacial de 260 m. No período aproximado de cinco dias, obtém-se uma cobertura completa do globo. A Tabela 1 apresenta as características da Câmera WFI.

Tabela 1 – Características da câmera WFI.

Bandas espectrais	0,63 - 0,69 μm (vermelho) 0,77 - 0,89 μm (infravermelho)
Campo de visada	60°
Resolução espacial	260 x 260 m
Largura da faixa imageada	890 km
Resolução temporal	5 dias
Frequência da portadora de RF	8203,35 MHz
Taxa de dados da imagem	1,1 Mbit/s
Potência efetiva isotrópica irradiada	31,8 dBm

A Câmera Imageadora de Alta Resolução (CCD *High Resolution*) fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura, com uma resolução de 20 m. Esta câmera tem capacidade de orientar seu campo de visada dentro de ± 32 graus, possibilitando a obtenção de imagens estereoscópicas de uma certa região. Esta câmera opera em 5 faixas espectrais incluindo uma faixa pancromática no intervalo 0,51 a 0,73 μm . As duas faixas espectrais do WFI são também empregadas nesta câmera para permitir a combinação dos dados obtidos pelas duas câmeras. Com este sensor são necessários 26 dias para uma cobertura completa da Terra.

Na Tabela 2 são apresentadas as características da Câmera Imageadora de Alta Resolução.

Tabela 2 – Características da Câmera Imageadora de Alta Resolução.

Bandas espectrais	0,51 - 0,73 μm (pan)
	0,45 - 0,52 μm (azul)
	0,52 - 0,59 μm (verde)
	0,63 - 0,69 μm (vermelho)
	0,77 - 0,89 μm (infravermelho próximo)
Campo de visada	8,3°
Resolução espacial	20 x 20 m
Largura da faixa imageada	113 km
Capacidade de apontamento do espelho	$\pm 32^\circ$
Resolução temporal	26 dias com visada vertical
	3 dias com visada lateral
Frequência da portadora de RF	8103 MHz e 8321 MHz
Taxa de dados da imagem	2 x 53 Mbit/s
Potência efetiva isotrópica irradiada	43 dBm

Qualquer fenômeno detectado pelo WFI pode ser focalizado pela Câmera Imageadora de Alta Resolução, para estudos mais detalhados, através de seu campo de visada, no máximo a cada três dias.

O sensor Imageador por Varredura de Média Resolução (IRMSS) tem 4 faixas espectrais e estende o espectro de observação do CBERS até o infravermelho termal. O IRMSS produz imagens de uma faixa de 120 km de largura com uma resolução de 80 m (160 m no canal termal). Em 26 dias obtém-se uma cobertura completa da Terra que pode ser correlacionada com aquela obtida através da Câmera Imageadora de Alta Resolução. A Tabela 3 apresenta as características da Câmera IRMSS.

Tabela 3 – Características da câmera IRMSS.

Bandas espectrais	0,50 - 1,10 μm (pancromática)
	1,55 - 1,75 μm (infravermelho médio)
	2,08 - 2,35 μm (infravermelho médio)
	10,40 - 12,50 μm (infravermelho termal)
Campo de visada	8,8°
Resolução espacial	80 x 80 m (160 x 160 m termal)
Largura da faixa imageada	120 km
Resolução temporal	26 dias
Frequência da portadora de RF	8216,84 MHz
Taxa de dados da imagem	6,13 Mbit/s
Potência efetiva isotrópica irradiada	39,2 dBm

2.3. Metodologias de Orientação de Sensores de Varredura Eletrônica

Segundo Mitishita e Saraiva (2002), nos últimos anos vários modelos matemáticos vêm sendo pesquisados e implementados para a obtenção de informações espaciais (3D) e geração de ortoimagens a partir de imagens digitais de sensores remotos de varredura linear, tais como: SPOT, IRS-1, MOMS-2P, IKONOS e CBERS. Os modelos rigorosos de orientação são baseados nas equações de colinearidade, que exigem os parâmetros geométricos da órbita e do sensor. As transformações matemáticas que aproximam as condições teóricas de projeção são implementadas quando os parâmetros geométricos da órbita e do sensor não estão disponíveis.

Os processos de orientação podem ser classificados em direto, indireto e híbrido. A seguir serão apresentados os métodos indireto e híbrido de orientação, pois é através deles que os sensores de varredura eletrônica são orientados. O caso Direto não é de interesse para este trabalho.

2.3.1. Métodos Indiretos

Nos métodos indiretos são necessários um modelo matemático e informações de apoio de campo, medidas nos espaços imagem e objeto, para estimar os parâmetros de orientação exterior. Os modelos matemáticos de orientação podem ser classificados em dois grupos:

- Modelos rigorosos; e
- Modelos aproximados.

2.3.1.1. Modelos Rigorosos

Os modelos rigorosos tentam descrever as propriedades físicas do sensor de aquisição e são baseados nas equações de colinearidade, ou seja, eles modelam rigorosamente a geometria interna e externa do sensor.

O desenvolvimento de modelos matemáticos rigorosos implicam no conhecimento dos dados de calibração do sensor, informações da órbita do satélite e atitude do sensor.

As equações de colinearidade (equação 1) são desenvolvidas partindo-se do princípio de que os pontos no espaço imagem, espaço objeto e o centro perspectivo da imagem são colineares. As equações de colinearidade são expressas na forma (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\begin{aligned} x_i &= -f \frac{m_{11}(X_i - X_0) + m_{12}(Y_i - Y_0) + m_{13}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \\ y_i &= -f \frac{m_{21}(X_i - X_0) + m_{22}(Y_i - Y_0) + m_{23}(Z_i - Z_0)}{m_{31}(X_i - X_0) + m_{32}(Y_i - Y_0) + m_{33}(Z_i - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

- f é distância focal do sensor;
- (x_i, y_i) são as coordenadas de pontos no referencial fotogramétrico;
- (X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas da estação de exposição;
- (X_i, Y_i, Z_i) são as coordenadas de pontos no referencial do terreno;
- m_{ij} são os elementos da matriz de rotação (M).

A matriz de rotação (M) é dada pela seguinte equação (WOLF e DEWITT, 2000):

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

sendo:

ω : rotação em torno do eixo x;

ϕ : rotação em torno do eixo y;

κ : rotação em torno do eixo z.

Para câmera de quadro, geralmente, usadas para capturar fotografias aéreas, somente um conjunto de parâmetros de orientação ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$) é necessário para o modelo, pois a cena inteira é tomada por uma única exposição. Já para os sensores de varredura eletrônica, cada linha vai ter um conjunto do centro perspectivo e ângulos de rotação, assim para utilizar as equações de colinearidade é necessário realizar modificações (YANG, 2000).

Em Orun e Natarajan (1994) é encontrado um modelo de orientação, baseado nas equações de colinearidade, para imagens de sensores de varredura eletrônica que consideram a geometria linear desses sensores. A equação 3 expressa este modelo:

$$0 = x_i = -f \frac{r_{11}(X_i - X_S) + r_{12}(Y_i - Y_S) + r_{13}(Z_i - Z_S)}{r_{31}(X_i - X_S) + r_{32}(Y_i - Y_S) + r_{33}(Z_i - Z_S)}$$

$$y_i = -f \frac{r_{21}(X_i - X_S) + r_{22}(Y_i - Y_S) + r_{23}(Z_i - Z_S)}{r_{31}(X_i - X_S) + r_{32}(Y_i - Y_S) + r_{33}(Z_i - Z_S)}$$
(3)

A coordenada x_i na equação (3) é nula, pois, cada vetor linear tem seu próprio centro perspectivo e não tem dimensão na direção x .

A posição $S (X_S, Y_S, Z_S)$ do satélite em um determinado instante t pode ser relacionada linearmente a localização $0 (X_0, Y_0, Z_0)$ do satélite, correspondente ao vetor linear central (X_0, Y_0, Z_0) . Mas essa relação pode não ser linear, logo (ORUN e NATARAJAN, 1994):

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \end{aligned}$$
(4)

onde:

- $a_1, \dots, a_3$ e $b_1, \dots, b_3$ são variáveis a serem determinadas;
- t é a diferença de tempo entre as posições S e 0 do satélite.

A matriz de rotação (R) é dada pela seguinte equação (ORUN e NATARAJAN, 1994):

$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa_s & \cos \omega \sin \kappa_s & \sin \omega \sin \kappa_s \\ -\sin \kappa_s & \cos \omega \cos \kappa_s & \sin \omega \cos \kappa_s \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

sendo:

ω : rotação em torno do eixo x;

$\kappa_s = \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \rightarrow$ é rotação em torno do eixo z na posição S do satélite;

κ_0 , a_4 , b_4 serão determinados na solução, para um ângulo de inclinação específico do espelho, ω , do satélite quando a imagem é adquirida.

2.3.1.2. Modelos Aproximados

Geralmente, dados auxiliares como posição, vetores de velocidade e razões angulares da plataforma do satélite não são fornecidos com as imagens orbitais, assim meios alternativos de modelar a Câmera necessitam ser empregados.

Os modelos aproximados não modelam explicitamente os parâmetros de orientação interior e exterior, ou seja, os parâmetros envolvidos geralmente não possuem significado físico ou geométrico. Eles não requerem parâmetros de orientação interior ou informações de efemérides da órbita. A solução da transformação do espaço objeto para o espaço imagem é baseada somente em pontos de controle terrestre.

A seguir serão apresentados alguns modelos matemáticos, que relacionam o espaço imagem com o espaço objeto, encontrados na literatura (VALADAN e SADEGHIAN (2003); SADEGHIAN e DELAVAR (2003); DOWMAN e TAO (2002); HANLEY e FRASER (2001); TAO e HU (2002)), tais como: Transformação Afim Geral 2D; Transformação Projetiva 2D; Polinômios de 2º; Transformação Afim Paralela; DLT; Funções Racionais.

Transformação Afim 2D

A relação entre espaço imagem e espaço objeto usando a transformação afim 2D é feita através da seguinte expressão (MITISHITA e SARAIVA, 2002):

$$\begin{aligned}x &= a_1X + a_2Y + x_0 \\ y &= a_3X + a_4Y + y_0\end{aligned}\tag{6}$$

onde:

- a_1, a_2, a_3, a_4, x_0 e y_0 são parâmetros da transformação;
- (x, y) são coordenadas de pontos no referencial da imagem;
- (X, Y) são coordenadas de pontos no referencial do terreno.

Como pode ser notado, nesta transformação seis parâmetros definem a relação entre o espaço objeto e o espaço imagem. Logo, o número mínimo de pontos de apoio necessários para orientar a imagem é de três pontos. Já para a resolução pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) são necessários pelo menos quatro pontos de apoio para que haja graus de liberdade para o ajustamento.

Transformação Projetiva 2D

A equação 7 faz a relação espaço imagem e espaço objeto utilizada na transformação projetiva 2D, onde oito parâmetros definem a relação entre os planos objeto e imagem (BARAKAT et al., 2004):

$$\begin{aligned}x &= \frac{a_1X + a_2Y + a_3}{a_4X + a_5Y + 1} \\ y &= \frac{a_6X + a_7Y + a_8}{a_4X + a_5Y + 1}\end{aligned}\tag{7}$$

onde:

- $a_1, a_2, \dots, a_8$ são parâmetros da transformação;
- (x, y) são coordenadas de pontos no referencial da imagem;
- (X, Y) são coordenadas de pontos no referencial do terreno.

A equação 7 demonstra a natureza não linear da transformação projetiva. Para estimar os oito parâmetros que definem esta transformação são necessários no mínimo quatro pontos de apoio para uma solução única. Já para uma resolução pelo MMQ são necessários pelo menos cinco pontos de apoio.

Polinômio de 2º Grau

Uma relação entre os espaços imagem e objeto dado por um polinômio de 2º grau completo é expressa na forma:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{aligned} \quad (8)$$

onde:

- $a_0, a_1, \dots, a_5, b_0, b_1, \dots, b_5$ são parâmetros do polinômio;
- (x, y) são coordenadas de pontos no referencial da imagem;
- (X, Y) são coordenadas de pontos no referencial do terreno.

Como pode ser visto, nesta transformação doze parâmetros definem a relação entre o espaço objeto e o espaço imagem. Logo, o número mínimo de pontos de apoio necessários para orientar a imagem por uma solução única é de seis pontos. E para a resolução pelo MMQ são necessários pelo menos sete pontos de apoio.

Transformação APM (*Affine Projection Model*)

Segundo Mitishita e Saraiva (2002) a APM (equação 9) é conhecida como Equação de Projeção Paralela que projeta o espaço R^3 no plano R^2 . A projeção paralela é caso particular da projeção central onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito (LUGNANI, 1987). Por exemplo, a imagem de satélite de alta resolução IKONOS possui a característica de ser proveniente de sensor de linha que possui grande distância focal e estreito campo de visada. A geometria de uma linha de “pixel” da imagem tem uma perspectiva central no sentido da varredura (y) e aproxima-se de uma projeção paralela no sentido de deslocamento do satélite (x). Desta forma, a projeção da imagem pode ser aproximada por uma projeção paralela. Assumindo que os parâmetros de orientação do satélite são constantes para uma pequena área imageada e que o movimento do satélite é aproximadamente linear, a transformação matemática APM, pode ser aplicado para a projeção de um ponto do espaço objeto para o espaço imagem.

$$\begin{aligned}x &= a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4 \\y &= a_5X + a_6Y + a_7Z + a_8\end{aligned}\tag{9}$$

onde:

- $a_1, a_2, \dots, a_8$ são parâmetros do modelo APM;
- (x, y) são coordenadas planas no referencial da imagem;
- (X, Y, Z) são coordenadas tridimensionais no referencial do terreno.

Como esta transformação possui oito parâmetros o número mínimo de pontos de apoio necessários para orientar a imagem por uma solução única é de quatro pontos. Para uma resolução pelo MMQ são necessários pelo menos cinco pontos de apoio.

DLT (Direct Linear Transformation)

A equação DLT pode ser considerada como sendo a equação de colinearidade escrita de forma diferente, onde as coordenadas medidas na imagem podem ser transformadas diretamente para coordenadas do espaço-objeto. Este modelo foi introduzido por Abdel – Aziz e Karara (1971) para permitir a calibração de Câmeras não métricas. Este modelo matemático permite eliminar a orientação interior e exterior, normalmente realizada numa aplicação das equações de colinearidade. A DLT é definida pelo seguinte par de equações (KARARA, 1989):

$$\begin{aligned} x &= L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - xXL_9 - xYL_{10} - xZL_{11} \\ y &= L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - yXL_9 - yYL_{10} - yZL_{11} \end{aligned} \quad (10)$$

onde:

- $L_1, L_2, \dots, L_{11}$ são parâmetros da transformação;
- (x, y) são coordenadas planas de pontos no referencial da imagem;
- (X, Y, Z) são coordenadas tridimensionais de pontos no referencial do terreno.

Portanto, a equação (10) estabelece uma relação direta entre um ponto no referencial (3D) do espaço-objeto e sua imagem no referencial (2D) da imagem. Conforme mostra esta equação, tem-se um total de 11 parâmetros de orientação a serem estimados. Como cada ponto de apoio gera 2 equações, são necessários, no mínimo, 6 pontos de apoio para orientar a imagem.

A fim de que a DLT seja linear em relação aos parâmetros de orientação, é usual adotar como constante (isto é, sem erro) as coordenadas dos pontos de apoio (X, Y, Z) e os termos xX, xY, xZ, yX, yY e yZ (EL-MARADILI e NOVAK, 1996). Nestas condições, uma solução pelo MMQ fica bastante simples, não havendo inclusive necessidade de realizar iterações.

A utilização da DLT, devido ao fato de não exigir os parâmetros de orientação interior e exterior do sensor, tem sido crescente nas aplicações de relacionamento do espaço objeto R^3 para o plano da imagem R^2 , principalmente quando estes parâmetros não estão disponíveis, como é o caso das imagens IKONOS, QuickBird etc..

A vantagem desta transformação é que o modelo usado é, conforme a hipótese acima, linear, ou seja, num processo de ajustamento não há a necessidade de iteração. A desvantagem é que seus parâmetros não possuem significado físico.

Funções Racionais

Segundo Boccardo et al. (2004) a função racional é o modelo aproximado mais comumente usado, que é implementado em quase todos os *softwares* de processamento de imagens orbitais. Este tipo de abordagem é usada pelas empresas que comercializam as imagens para possibilitar ao usuário obter produtos com valor adicionado, como ortoprojeção, sem a necessidade de ter um modelo do sensor, mas somente incorporando os coeficientes da relação entre as coordenadas da imagem e as do terreno.

O modelo de função racional estabelece uma relação entre um ponto (3D) no espaço objeto e seu correspondente (2D) na imagem por relações polinomiais, através das seguintes equações (YANG, 2000):

$$\begin{aligned}x &= \frac{F_1(X, Y, Z)}{F_2(X, Y, Z)} \\ y &= \frac{F_3(X, Y, Z)}{F_4(X, Y, Z)}\end{aligned}\tag{11}$$

onde:

- (x, y) = coordenadas de pontos no espaço imagem;
- (X, Y, Z) = coordenadas de pontos no espaço objeto;

- F_i , $i = 1, 2, 3 \text{ e } 4$, é o um polinômio como segue:

$$F_i(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j c_n \cdot X^{i-j} \cdot Y^{j-k} \cdot Z^k \quad (12)$$

Sendo N a ordem do polinômio, c_n são coeficientes e o subscrito n é determinado por $n = \frac{i \cdot (i+1) \cdot (i+2)}{6} + \frac{j \cdot (j+1)}{2} + k$. Logo, o número total de coeficientes para cada polinômio é $\frac{(N+1) \cdot (N+2) \cdot (N+3)}{6}$. Por exemplo, quando N é 3 (valor máximo usualmente utilizado), a equação 7 se torna um polinômio de 3ª ordem com 20 coeficientes:

$$F(X, Y, Z) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4X^2 + c_5XY + c_6XZ + c_7Y^2 + c_8YZ + c_9Z^2 + c_{10}X^3 + c_{11}X^2Y + c_{12}X^2Z + c_{13}XY^2 + c_{14}XYZ + c_{15}XZ^2 + c_{16}Y^3 + c_{17}Y^2Z + c_{18}YZ^2 + c_{19}Z^3$$

Quando se tem uma Função Racional de primeira ordem, é possível fazer uma particularização da formulação (equação 11) gerando a DLT, ou seja, DLT é um caso particular das funções racionais de primeira ordem (YANG, 2000).

O número total de coeficientes para a função racional dependerá da ordem dos polinômios envolvidos. Por exemplo, quando os polinômios forem de 2ª ordem, a função racional terá um total de 40 coeficientes. Logo, o número de pontos de apoio necessários para orientar a imagem dependerá então da quantidade de coeficientes, ou seja, da ordem dos polinômios. Para o exemplo acima são necessários 20 pontos de apoio para orientar a imagem, pois cada ponto de apoio gera 2 equações, sendo assim teremos 40 equações para 40 incógnitas. Já para a resolução do problema pelo MMQ são necessários pelo menos 21 pontos de apoio.

A seguir é apresentado um modelo de funções racionais (GRODECKI e DIAL, 2001), do tipo da equação 11, contendo 20 coeficientes:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5XZ + a_6YZ}{1 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ} \\ y &= \frac{b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4XY + b_5XZ + b_6YZ}{1 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ} \end{aligned} \quad (13)$$

2.3.2. Métodos Híbridos

Esse é o caso quando nem todos os parâmetros de orientação exterior são medidos diretamente (por exemplo, só a posição de tomada medida pelo GPS) ou quando todos são medidos com precisão insuficiente, havendo a necessidade de refiná-los, a posteriori, com algumas informações de controle de campo.

Em Dal Poz (1991) é apresentado um exemplo deste processo de orientação onde as imagens formadas pelo sensor HRV-SPOT foram orientadas através do Filtro de Kalman, ou seja, foi realizado um processo de refinamento dos dados de órbita e atitude do satélite SPOT através da utilização do Filtro de Kalman.

2.4. Extração Semi-Automática de Rodovias

2.4.1. Uso de Feições Lineares em Fotogrametria

Atualmente com a evolução contínua da Fotogrametria Digital (uso de scanners e sensores orbitais de alta resolução e os avanços em processamento digital de imagens) os procedimentos automatizados estão se tornando populares. Contudo, a maioria destes procedimentos ainda é baseada em pontos. As técnicas de processamento de imagem permitem a extração de numerosos pontos em imagens, porém estes pontos têm menor

qualidade que os pontos selecionados manualmente. Além disso, o *matching* automático dos pontos extraídos das imagens sobrepostas é complexo e frequentemente produz incerteza. Devido a essas limitações, recentes pesquisas têm se focalizado no uso de feições de alto nível (por exemplo, feições lineares e feições de áreas) (HABIB et al., 2004).

Os principais tipos de feições lineares utilizados são rodovias, construções antrópicas, rios, ferrovias e limites de vegetação.

Vários processos fotogramétricos vêm focando atenção para o uso de feições lineares. Esta linha de pesquisa está sendo incentivada pelos seguintes fatores (HABIB et al., 2004):

- Feições lineares são mais fáceis de extrair quando comparadas com pontos distintos. Isto é atribuído a natureza das feições lineares desde que elas representam descontinuidades na função de brilho em uma direção. Já as feições ponto representam descontinuidade em todas as direções.
- Feições lineares podem ser extraídas na imagem com precisão sub-pixel.
- Imagens de ambientes antrópicos são ricas em feições lineares.
- Feições lineares permitem a incorporação de feições areais.
- Feições lineares possuem mais informações semânticas, que é desejável para processos como: geração de DEM, compilação de mapa e reconhecimento de objeto.
- Feições lineares aumentam a redundância e melhoram a robustez e a rigidez geométrica de vários processos de ajustamento fotogramétrico.
- As feições lineares, no espaço objeto, podem ser facilmente derivadas de mapas existentes, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), banco de dados, ou Sistemas de Mapeamento Móvel terrestre.

Segundo Habib et al. (2004), uma função analítica (por exemplo, linhas retas e seções cônicas) pode representar as feições lineares no espaço imagem. Entre estas

alternativas de representação, pode-se demonstrar que feições retas são apropriadas para atividades fotogramétricas pelas seguintes razões:

- Feições lineares de forma genérica podem ser representadas com precisão suficiente como uma seqüência de segmentos de linhas retas, isto é, uma linha poligonal.
- Linhas retas são valiosas pra a recuperação dos parâmetros de orientação interior de câmeras de quadro, onde linhas retas do espaço objeto deveriam aparecer como linhas retas no espaço imagem na ausência de distorções.
- Linhas retas também são valiosas para a recuperação dos parâmetros de orientação exterior de sensores de varredura eletrônica, onde as linhas retas do espaço objeto não aparecerão como linhas retas no espaço imagem devido às perturbações ao longo da trajetória de voo.

2.4.2. Algoritmo de Programação Dinâmica

A programação dinâmica é uma técnica eficiente para solucionar alguns problemas de otimização, quando nem todas as variáveis envolvidas estão inter-relacionadas simultaneamente (DAL POZ, 2000).

Seja o problema de determinar o máximo M da função,

$$g = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (14)$$

O objetivo então é encontrar a ênupla $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ que maximiza a função g . Sendo esta uma função desconhecida, e as variáveis independentes $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ assumem valores discretos, a única técnica que garante um máximo global é a enumeração exaustiva de todas as combinações dessas variáveis. Porém, se nem todas as variáveis são simultaneamente inter-relacionadas, então um algoritmo de programação dinâmica pode ser aplicado para solucionar o problema.

Supondo então que,

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g_1(x_1, x_2, x_3) + g_2(x_2, x_3, x_4) + g_3(x_3, x_4, x_5) + \dots + g_{n-2}(x_{n-2}, x_{n-1}, x_n) \quad (15)$$

onde, a função g_1 depende apenas de x_1, x_2 e x_3 , e a função g_2 apenas de x_2, x_3 e x_4 , e assim por diante.

Logo, o valor máximo da função 15 pode ser encontrado através de um processo de eliminação sequencial das variáveis envolvidas.

O processo é iniciado com a eliminação da variável x_1 . Como as funções $g_2, \dots, g_{n-2}$ não dependem de x_1 , somente a função g_1 deve ser considerada nesse momento. A eliminação de x_1 é realizada através da seleção do valor de x_1 que maximiza g_1 , para cada par (x_2, x_3) , isto é,

$$f_1(x_2, x_3) = \max_{x_1} [g_1(x_1, x_2, x_3)] \quad (16)$$

O processo continua com a eliminação da variável x_2 , sendo que o mesmo principio é aplicado, como segue,

$$f_2(x_3, x_4) = \max_{x_2} [f_1(x_2, x_3) + g_2(x_2, x_3, x_4)] \quad (17)$$

A eliminação das demais variáveis segue o mesmo principio da etapa anterior. Entretanto, é conveniente formalizar a eliminação das duas ultimas variáveis (x_{n-1}, x_n) , como segue,

$$f_{n-1}(x_{n-1}, x_n) = \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}, x_n)] \quad (18)$$

$$M = \max(g) = \max_{x_n} [f_{n-1}(x_{n-1}, x_n)] \quad (19)$$

Com esse algoritmo apresentado acima é solucionada a primeira parte do problema, ou seja, o cálculo do valor máximo (M) da função g. A segunda parte do problema consiste em obter os valores intermediários de x_i para os quais o máximo M é obtido.

A primeira parte do problema é resolvida em n-1 estágios, cada qual correspondendo a eliminação de uma variável da função g. Este procedimento permite gerar tabelas com o padrão mostrado na Figura 3, onde para cada realização do par (x_{k+1}, x_{k+2}) há uma realização de x_k , cujo valor da função $f_k(x_{k+1}, x_{k+2})$ é máximo. Todas as n-1 tabelas geradas devem ser armazenadas para possibilitar posteriormente a solução da segunda parte do problema.

x_k	$f_k(x_{k+1}, x_{k+2})$		
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Figura 3 – Padrão das tabelas de máximo de f_k .
(Adaptado de DAL POZ, 2000)

A solução da segunda parte do problema baseia-se num procedimento de retro-busca pelas n-1 tabelas de máximos.

As seguintes fórmulas de recursão são utilizadas para resolver ambas as partes do problema de otimização:

$$f_0(x_1, x_2) = 0 \quad (20)$$

$$f_k(x_{k+1}, x_{k+2}) = \max_{x_k} [f_{k-1}(x_k, x_{k+1}) + g_k(x_k, x_{k+1}, x_{k+2})] \quad (21)$$

$$f_{n-1}(x_{n-1}, x_n) = \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}, x_n)] \quad (22)$$

$$M = \max(g) = \max_{x_n} [f_{n-1}(x_{n-1}, x_n)] \quad (23)$$

$$(\bar{x}_{n-1}, \bar{x}_n) = \text{argumento}(\max[f_{n-1}(x_{n-1}, x_n)]) \quad (24)$$

$$\bar{x}_k = \text{retroagindo_em}(\bar{x}_{k+1}, \bar{x}_{k+2}) \quad (25)$$

As fórmulas recursivas 20, 21, 22 e 23 são usadas para construir as n-1 tabelas de máximos. A busca pelo vetor solução $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ é iniciada com a expressão 24, que possibilita a identificação de quais as realizações de x_{n-1} e x_n (respectivamente, $\bar{x}_{n-1}$ e $\bar{x}_n$) que maximiza a função g. As demais realizações $(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{n-2})$ são obtidas retroagindo-se pelas n-1 tabelas, conforme mostra a expressão 25. Por exemplo, começando com a (n-1)-ésima tabela, verifica-se qual a linha que contém as realizações $\bar{x}_{n-1}$ e $\bar{x}_n$ (por exemplo, k=n-2), permitindo a identificação da melhor realização de x_{n-2} ($\bar{x}_{n-2}$). Na sequência, tendo agora por base as realizações $\bar{x}_{n-2}$ e $\bar{x}_{n-1}$ (por exemplo., k=n-3), repete-se o procedimento para a (n-2)-ésima tabela, permitindo, desta vez, a obtenção da realização ótima de x_{n-3} , por exemplo, $\bar{x}_{n-3}$. Este procedimento é repetido até a realização $(\bar{x}_1)$ de x_1 seja obtida.

Abaixo é apresentado o algoritmo resumido de programação dinâmica:

1. Fazer $k = 1$ e $f_0(x_1, x_2) = 0$;
2. Avaliar a função $f_k(x_{k+1}, x_{k+2})$ e preencher as posições nas tabelas;
3. Se $k < n-1$, então $k = k+1$ e ir para o passo 2, caso contrário ir para o passo 4;
4. Identificar o valor máximo de f_{n-1} e retroagir pelas n-1 tabelas para obter o vetor solução $(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$.

Com objetivo de melhor elucidar o algoritmo de programação dinâmica, segue, um exemplo artificial apresentado em Vale (2003). Neste exemplo, $n = 4$ e as funções g_i dependem apenas de 2 variáveis, sendo que cada x pode ser tomado de uma terna de valores discretos. As funções g_i são completamente descritas pelas tabelas da figura 4. Por exemplo, o valor $g_1(0, 1) = 5$.

$g_1(x_1, x_2)$				$g_2(x_2, x_3)$				$g_3(x_3, x_4)$						
		x_2				x_3				x_4				
		1	2	3			-1	0	1					
		0	5	7	3			1	1	7	1			
x_1	1	2	1	8	x_2	2	1	1	3	x_3	-1	7	9	8
	2	6	3	3		3	5	6	2		0	2	3	6
											1	5	4	1

Figura 4 – Definição das funções g_i
(Adaptado de VALE, 2003)

Na figura 5 tem-se o passo 1:

x_2	f_1	x_1
1	6	2
2	7	0
3	8	1

Figura 5 – Primeiro passo de resolução
(Adaptado de VALE, 2003)

Na figura 5, para cada valor de x_2 tem-se o respectivo valor de x_1 que maximiza $g_1(x_1, x_2)$, restando-se dessa forma os maiores valores de g_1 . A construção da função $f_1(x_2)$ baseia-se nas fórmulas de recursão 20 e 21, ficando, por o exemplo em discussão:

$$f_1(x_2) = \max_{x_1} [f_0(x_1) + g_1(x_1, x_2)], \text{ com } f_0(x_1) = 0 \quad (26)$$

Aplicando a equação 26 para os possíveis valores de x_2 (por exemplo, 1, 2 e 3) obtém-se os respectivos valores de $f_1(x_2)$ (Figura 5).

$$f_1(x_2 = 1) = \max_{x_1} [f_0(x_1) + g_1(x_1 = 2, x_2 = 1)] = 6 \quad (27)$$

$$f_1(x_2 = 2) = \max_{x_1} [f_0(x_1) + g_1(x_1 = 0, x_2 = 2)] = 7 \quad (28)$$

$$f_1(x_2 = 3) = \max_{x_1} [f_0(x_1) + g_1(x_1 = 1, x_2 = 3)] = 8 \quad (29)$$

Na figura 6(a) e 6(b) tem-se o passo 2. Notar que a tabela da figura 6(a) é formada pela adição dos elementos $f_1(x_2)$ às respectivas linhas de $g_2(x_2, x_3)$. Este passo baseia-se na seguinte fórmula de recursão:

$$f_2(x_3) = \max_{x_2} [f_1(x_2) + g_2(x_2, x_3)] \quad (30)$$

A tabela da figura 6(a) é montada usando o argumento do operador $\max[\cdot]$ da equação 30. Por exemplo, para montar a primeira linha (valores 7, 13 e 7) basta fixar $x_2 = 1$ e atribuir à x_3 os valores -1, 0 e 1.

Agora, para completar o passo 2, computam-se os máximos (em cinza) a partir da tabela da Figura 6(a), como no passo 1, obtendo-se, dessa forma, $f_2(x_3)$ (tabela da Figura 6(b)). Formalmente:

$$f_2(x_3 = -1) = \max_{x_2} [f_1(x_2 = 3) + g_2(x_2 = 3, x_3 = -1)] = 13 \quad (31)$$

$$f_2(x_3 = 0) = \max_{x_2} [f_1(x_2 = 3) + g_2(x_2 = 3, x_3 = 0)] = 14 \quad (32)$$

$$f_2(x_3 = 1) = \max_{x_2} [f_1(x_2 = 2) + g_2(x_2 = 2, x_3 = 1)] = 10 \quad (33)$$

			x_3	
		-1	0	1
	1	7	13	7
x_2	2	8	8	10
	3	13	14	10

(a)

x_3	f_2	x_2
-1	13	3
0	14	3
1	10	2

(b)

Figura 6 – Segundo passo de resolução: (a) $f_1(x_2) + g_2(x_2, x_3)$; e (b) $f_2(x_3)$
(Adaptado de VALE, 2003)

A montagem das tabelas da Figura 7(a) e 7(b) é realizada de forma análoga ao procedimento descrito para a montagem das tabelas do passo anterior. Nesse caso, a seguinte fórmula de recursão deve ser utilizada:

$$f_3(x_4) = \max_{x_3} [f_2(x_3) + g_3(x_3, x_4)] \quad (34)$$

			x_4	
		-1	2	3
	-1	20	22	21
x_3	0	16	17	20
	1	15	14	11

(a)

x_4	f_3	x_3
1	20	-1
2	22	-1
3	21	-1

(b)

Figura 7 – Terceiro passo de resolução: (a) $f_2(x_3) + g_3(x_3, x_4)$; e (b) $f_3(x_4)$
(Adaptado de VALE, 2003)

A solução é encontrada pelo traçado em sentido contrário, seguindo-se 3 tabelas no sentido inverso, respectivamente, as tabelas das Figuras 7(b), 6(b) e 5. Assim, tomando o maior $f_3(x_4)$, vê-se que $x_4 = 2$ e $x_3 = -1$. Retrocedendo à tabela de $f_2(x_3)$, encontra-se $x_2 = 3$, pois é este o valor que está relacionado a $x_3 = -1$, da tabela anterior. Em seguida, seguindo o caminho inverso, encontra-se $x_1 = 1$, que é o valor relacionado a $x_2 = 3$, em $f_1(x_2)$. Assim, tem-se a solução ótima $g(x_1, x_2, x_3, x_4) = 22$, com $x_1 = 1$, $x_2 = 3$, $x_3 = -1$ e $x_4 = 2$.

2.4.3. Noções Sobre Modelagem e Extração de Rodovias

A modelagem de uma malha viária pode ser descrita por dois modelos: o intrínseco que descreve características específicas da malha viária; e o contextual que descreve a relação entre a malha viária e outros objetos que a circundam.

O modelo intrínseco é dividido em três outros (OLIVEIRA, 2002):

- **Geométrico** – descreve propriedades geométricas da rodovia;
- **Radiométrico** – descreve as propriedades radiométricas da rodovia;

- **Topológico** – descreve a estrutura da malha viária como constituída de arcos e interseções.

O modelo contextual é bastante eficiente tanto em áreas rurais quanto urbanas, e é subdividido em (OLIVEIRA, 2002):

- **Local** – descreve as relações locais existentes entre a rodovia e outros objetos que a circundam;
- **Global** – reúne aos diferentes contextos de acordo com os três tipos básicos de regiões, a urbana, a florestal e a rural.

Os métodos semi-automáticos utilizam algoritmos baseados em propriedades radiométricas e geométricas do objeto rodovia. Outra peculiaridade, resultante da pouca inteligência geralmente incorporada nestes métodos, é a necessidade da inicialização usando pontos sementes fornecidos por um operador.

Em geral, todos os modelos de extração de rodovia utilizam implícita ou explicitamente as propriedades citadas acima.

Existem diversas metodologias disponíveis para a extração de rodovias, mas, em geral, podem ser identificadas 5 etapas básicas (DAL POZ, 2000): realce da malha viária, detecção e extração de pontos sementes, extração de fragmentos de rodovia, conexão de fragmentos e geração da malha viária.

Realce da malha viária: nesta etapa, algum operador do gradiente (exemplo: Sobel, Nevatia & Babu) é aplicado em toda imagem com a finalidade de realçar as estruturas das rodovias para facilitar o processamento nas outras etapas.

Detecção e extração de pontos sementes: a imagem realçada é utilizada nesta etapa para detectar pontos sementes ou indícios da localização da rodovia. Geralmente, em métodos automáticos, a detecção de pontos sementes baseia-se nas informações de bordas,

já em métodos semi-automáticos, a identificação dos pontos sementes é feita por um operador.

Extração de fragmentos de rodovia: devido principalmente a problemas tais como ruídos, sombras e obstruções, dificilmente é possível extrair, num único passo, um segmento de rodovia unindo duas intersecções da malha viária. Em vez, fragmentos desconectados de rodovia são extraídos a partir dos pontos sementes da etapa anterior. Geralmente, as estratégias utilizam informações de bordas de rodovias nessa etapa.

Conexão de fragmentos: a formação dos segmentos de rodovia realiza-se nesta etapa através da ligação dos fragmentos desconectados de rodovia obtidos na etapa anterior. Os métodos semi-automáticos apresentam a vantagem da possibilidade de interferência do operador nesta etapa, sendo esta operação, não muito simples de ser realizada automaticamente.

Geração da malha viária: finalmente, os segmentos extraídos individualmente são conectados, a fim de formar a malha viária.

2.4.4. Extração Semi-Automática de Rodovias Utilizando Programação Dinâmica

O princípio geral da extração de rodovias através de programação dinâmica pode ser colocado de forma similar ao problema clássico de programação dinâmica (LI, 1997). Isto é, trata-se de um problema de otimização num grafo, ou seja, um problema de como encontrar o caminho ótimo entre o ponto inicial e o ponto final do segmento de rodovia. A seguir é apresentado o modelo geral de rodovia e, em linhas gerais como resolvê-lo usando o algoritmo de programação dinâmica.

2.4.4.1 Modelo Matemático de Rodovia

Neste trabalho é utilizado o modelo intrínseco, porém somente os aspectos radiométricos e geométricos são utilizados, pois as tarefas mais complexas de reconhecimento são deixadas a cargo do operador.

Sendo ξ uma curva representando uma rodovia em uma imagem digital, pode-se fazer as seguintes observações (DAL POZ, 2000):

- A curva ξ pode ser representada pela função vetorial $\vec{f}(s)$, que mapeia o arco-distância s em pontos (x, y) na imagem;
- A curva ξ possui derivadas contínuas; e
- A imagem é representada por uma função bidimensional contínua $G_c(x, y)$, possuindo derivadas contínuas.

A modelagem matemática (DAL POZ e AGOURIS, 2001, DAL POZ, 2001) da entidade rodovia é desenvolvida com base em seis propriedades básicas, sendo três radiométricas e três geométricas.

A primeira propriedade é radiométrica e estatui que os *pixels* de uma rodovia são mais claros que os de fundo, ou seja, uma rodovia em uma imagem digital pode ser considerada como uma faixa estreita e continua de alta intensidade de brilho, margeada por regiões (fundo) de baixa intensidade. Portanto, a integral do quadrado da função imagem ($G_c(x, y)$) ao longo da curva que representa a rodovia é máxima, isto é (DAL POZ, 2000):

$$Ep_1 = \int [G_c(\vec{f}(s))]^2 ds \rightarrow \text{Máximo} \quad (35)$$

A versão discreta é dada por (DAL POZ, 2000):

$$Ep_1 = \sum G_d^2(x_i, y_i) \rightarrow \text{Máximo} \quad (36)$$

onde, G_d é o tom de cinza do *pixel* (x_i, y_i) .

A segunda propriedade também é radiométrica e está relacionada com o conhecimento a priori de que o material de rolagem, usualmente asfalto ou concreto, não varia muito em distancias curtas. Com isso pode-se dizer que em segmentos curtos as respostas espectrais são similares. Portanto, uma expressão matemática baseada no conceito de homogeneidade pode ser escrita, como segue (DAL POZ, 2000),

$$Ep_2 = \sum_i \int_{\Delta S_i} [G_c(\vec{f}(s)) - G_{cm}(\Delta S_i)]^2 ds \rightarrow \text{Mínimo} \quad (37)$$

onde,

- ΔS_i é um segmento curto de ξ .
- $G_{cm}(\Delta S_i)$ é o valor médio (eq. 38) de $G_c(x, y)$ ao longo da distância ΔS_i .

$$G_{cm}(\Delta S_i) = \frac{1}{\Delta S_i} \int_{\Delta S_i} G_c(\vec{f}(s)) ds \quad (38)$$

As versões discretas para as fórmulas 37 e 38 são dadas respectivamente por (DAL POZ, 2000),

$$Ep_2 = \sum_i \sum_j [G_d(x_j, y_j) - G_{dm}^{\Delta S_i}]^2 \rightarrow \text{Mínimo} \quad (39)$$

$$G_{dm}^{\Delta S_i} = \frac{\sum_j G_d(x_j, y_j)}{\Delta S_i} \quad (40)$$

Nas equações 39 e 40, o índice j é usado par indexar pontos ao longo de cada vetor (i, i+1). A distância ΔS_i é dada por:

$$\Delta S_i = \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2} \quad (41)$$

A terceira propriedade é uma generalização das duas primeiras, pois uma rodovia pode ser tratada como uma feição linear de alta intensidade de brilho, sendo que os

pontos mais distantes dessa curva têm menor influência na definição da mesma. Pode-se então, escrever a seguinte expressão matemática para representar esta propriedade, como segue (DAL POZ, 2000),

$$Ep_3 = \int w(d(s)) [G_c (\vec{f}(s) + d(s) \vec{n}(s))]^2 ds \rightarrow \text{Máximo} \quad (42)$$

onde,

- $d(s)$ é a distância entre a curva ζ e um ponto fora da mesma;
- $w(d(s))$ é uma função inversamente proporcional à distância $d(s)$; e
- $\vec{n}(s)$ é um vetor unitário normal à curva ζ na posição $\vec{f}(s)$.

A versão discreta da fórmula 42 utilizada neste trabalho é dada a seguir (DAL POZ, 2000),

$$Ep_3 = \sum_i e^{-d_i^2} G_d^2(x_i, y_i) \quad (43)$$

onde,

- $e^{-d_i^2}$ é uma função gaussiana, correspondente à função $w(d(s))$ (eq. 42); e
- d_i é a distância entre um ponto (x_i, y_i) e a curva discreta representando a rodovia.

A quarta propriedade é geométrica e reflete uma característica fundamental da rodovia, isto é, a suavidade. Por questões práticas, uma rodovia é normalmente composta por segmentos retos e curvas suaves, usualmente circulares. Matematicamente, tem-se (DAL POZ, 2000),

$$E_g = \int |\vec{f}''(s)| ds \rightarrow \text{Mínimo} \quad (44)$$

onde, $\vec{f}''(s)$ é a derivada segunda de $\vec{f}(s)$. (DAL POZ, 2000) apresenta a seguinte fórmula para o caso discreto:

$$E_g = \sum_i [2 - 2\cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i \rightarrow \text{Mínimo} \quad (45)$$

onde (Figura 8),

- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$ é o ângulo de deflexão entre dois vetores sucessivos da entidade discreta representando a rodovia; e
- ΔS_i é a distância entre o vértice i e $i-1$ ou $i+1$.

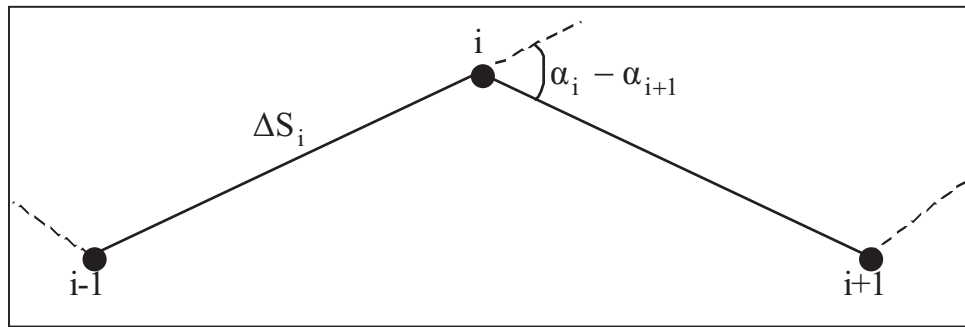


Figura 8 - Polígono representando a rodovia

A quinta propriedade estatui que a curvatura local de uma rodovia possui um limite máximo, isto é:

$$C_g = |\vec{f}''(s)| < T \quad (46)$$

onde, T é um limiar.

Para o caso discreto, a fórmula 46 pode ser aproximada por,

$$C_{gi} = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T \quad (47)$$

A sexta propriedade esta relacionada com o fato da largura da rodovia não variar significativamente. Entretanto, esta propriedade já está implícita na terceira propriedade.

Considerando apenas o caso discreto, no qual a rodovia é representada por um polígono de n vértices, o seguinte modelo matemático geral pode ser descrito (DAL POZ, 2000):

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - \beta Ep_2 - \gamma Ep_3)[1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i) = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (48)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (49)$$

onde, β e γ são duas constantes positivas.

Portanto, o modelo matemático é composto por 2 funções:

- E : corresponde à função objetivo (custo) (eq. 48), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) do polígono que representa a rodovia; e
- C_i : devido a sua definição (eq. 49), também é denominada de injeção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para os pontos que satisfaçam $C_i < T$.

Como mostra a equação 48, apenas três vértices (ou seis variáveis) sucessivos da linha poligonal estão inter-relacionados simultaneamente. Nesse caso, como a estrutura desta equação se assemelha à da equação 15, a programação dinâmica é um algoritmo eficiente para resolver o problema de otimização.

2.4.4.2 Solução do Modelo Matemático de Rodovia

O princípio geral da extração de rodovias através de programação dinâmica consiste em encontrar o melhor caminho entre os pontos inicial e final da rodovia.

De uma forma ainda geral, alguns detalhes adicionais são:

- A curva ξ é descrita por um polígono de n vértices;
- Os vértices que definem o caminho ótimo, isto é, a rodovia extraída, são calculados a partir das respectivas posições aproximadas. Cada vértice aproximado move em torno de sua respectiva posição aproximada, sendo que a área de busca é normalmente tomada como uma pequena janela de *pixels*. As várias possibilidades que os vértices aproximados podem assumir implicam na geração de uma série de linhas poligonais; e
- A seqüência de vértices que definem o caminho ótimo é tal que maximiza a função custo E e satisfaz a injunção $C_i < T$.

Geralmente é utilizada uma janela de busca bidimensional. Sendo n o número de vértices e m o número de possibilidades que cada vértice pode assumir dentro da janela de busca, o esforço computacional será da ordem de $O(nm^3)$. Portanto, o uso de janelas maiores aumenta o raio de convergência, mas também aumentaria significativamente o esforço computacional. Duas estratégias podem ser exploradas para diminuir o número de elementos (m) na janela de busca (LI, 1997; DAL POZ, 2000):

- **Uso de uma janela de busca unidimensional:** nesse caso, os elementos da janela de busca são tomados numa direção ortogonal ao polígono inicial num determinado vértice P_i . Esse procedimento

possibilita manter o raio de convergência, mas o esforço computacional é bem menor; e

- **Uso de janelas de resolução variadas:** esta estratégia está relacionada à teoria da pirâmide de imagem (DAL POZ, 2000), onde a base corresponde à imagem original e as outras camadas, na direção do topo, correspondem a mesma imagem, mas com resoluções cada vez menores. Uma solução alternativa, computacionalmente mais atrativa e que produz bons resultados, baseia-se na computação dos elementos da janela de busca em intervalos diferentes. O processo de extração é iterativo, permitindo o refinamento sucessivo do polígono inicial. Portanto, os intervalos com um maior número de *pixels* são usados no início, permitindo a obtenção de um grande raio de convergência. A medida que o processo de convergência vai sendo atingido, o intervalo entre pontos na janela de busca vai sendo diminuído também, até atingir o valor do sub-*pixel*, permitindo a obtenção de um resultado final com alta precisão.

À primeira vista, a descrição de uma rodovia através de uma linha poligonal pode ser realizada com vértices eqüidistantes. Como nesse caso as posições dos vértices não estão relacionadas com a forma da curva, a quantidade de pontos é usualmente bem maior que a necessária para descrevê-la. Uma solução mais adequada é apresentada em DAL POZ (2000).

Inicialmente, são fornecidos vários pontos sementes, cujas localização e distribuição são grosseiras. Ligando-se estes pontos obtém-se a primeira aproximação para a rodovia. O processo de refinamento do polígono inicial é iterativo, como segue:

- **1ª iteração:** entre cada par de pontos sementes é inserido um novo ponto através de interpolação linear. O procedimento de otimização através da programação dinâmica gera uma nova aproximação para a rodovia; e
- **Demais iterações:** procedimentos idênticos são repetidos nas demais iterações.

O processo converge quando, numa determinada iteração, a otimização de todos os novos pontos inseridos linearmente gera apenas pontos colineares aos preexistentes.

Vale ressaltar que nenhum ponto inserido em iterações anteriores fica fixo antes da convergência do processo. Isto é resultado da reavaliação de todos os pontos em cada iteração.

Duas vantagens do procedimento apresentado são:

- O esforço computacional é menor; e
- O algoritmo torna-se mais robusto quando pequenas obstruções e sombras, além de outras distorções, estão presentes.

2.5. Princípios de Determinação de Correspondência entre Feições

Segundo Maia (2003) na literatura são encontradas várias metodologias para o estabelecimento de discrepâncias e/ou correspondências entre feições. O método do centróide (MITISHITA, 1997) é um desses métodos, servindo apenas para o cálculo da discrepância média entre várias feições. O método dos retângulos equivalentes (FERREIRA e

CINTRA, 1999) segue essa mesma direção, e estima a discrepância entre duas feições através da área entre ambas. O método do ponto gerado (LUGNANI, 1986), pode ser usado tanto para o cálculo de discrepâncias quanto para o estabelecimento de correspondências. Porém há a necessidade de se conhecer uma correspondência inicial entre as feições envolvidas e ocorre o acúmulo de erros sistemáticos quando ambas as feições apresentam diferenças significativas nas formas. O método baseado em *splines* (LUGNANI, 1986), embora também se preste ao cálculo de discrepâncias e correspondências entre feições, apresenta o inconveniente computacional de realizar as rotações de segmentos de uma das feições.

A rodovia extraída (+) e a correspondente projetada (0) são formadas por seqüências diferentes de pontos (Figura 9(a)), sendo que estas seqüências definem linhas poligonais, isto é, seqüências conectadas de segmentos de reta. Assim, os pontos de ambas as feições não podem ser usados como pontos correspondentes. Conseqüentemente, a correspondência ponto a ponto entre ambas as malhas deve ser inicialmente estabelecida. Para cada ponto da rodovia projetada calcula-se, caso exista, o correspondente na rodovia extraída. Em Maia (2003) a solução do critério da distância mínima é apresentada, cujo princípio está ilustrado na Figura 9(b), onde a distância (δ_i) entre ambos os pontos (P_i e P_j), respectivamente, na rodovia extraída e na rodovia projetada, deve ser mínima. Sendo a correspondência (P_i, P_j) válida, caso δ_i não exceda um limiar pré-definido. O procedimento é repetido para todos os pontos da rodovia projetada.

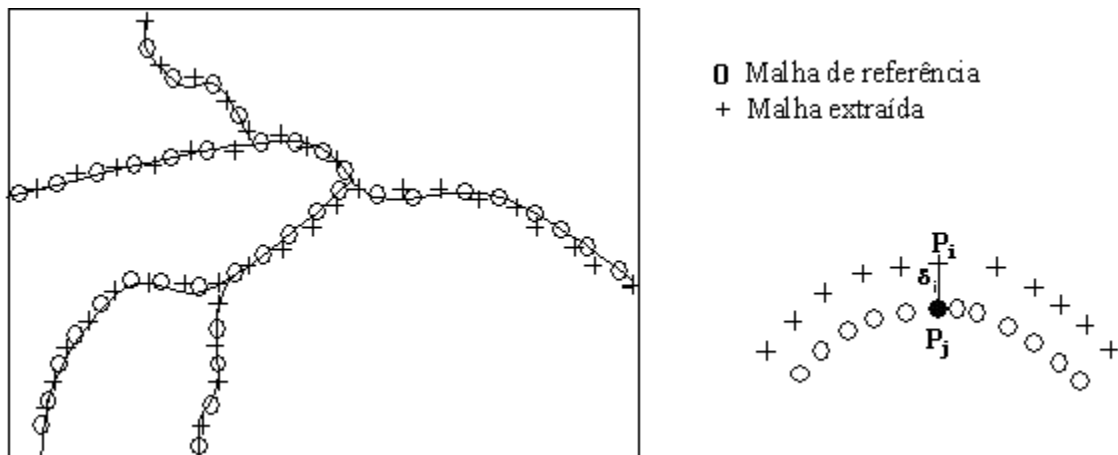


Figura 9 – Estabelecimento de Correspondência entre as malhas extraída e de referência:
 (a) Ilustração do problema de digitalização do eixo da rodovia (-); e
 (b) Princípio para estabelecimento de correspondência.
 (Fonte: MAIA, 2003).

O método da distância mínima (GALO et al., 2001), com modelagem de feições por linhas poligonais, é o que melhor se adequa a esta pesquisa. Pois esta metodologia permite o cálculo acurado da correspondência ponto a ponto entre feições, o que é fundamental, porque os parâmetros da transformação (função racional) dependem da correspondência ponto a ponto entre feições. Na seção 3.3.1, é apresentado o método de correspondência pela distância mínima.

2.6 Orientação de Imagens CBERS usando a DLT

Conforme já apresentado anteriormente (seção 2.3.1.2 equação 10) a DLT é definida pelo seguinte par de equações:

$$\begin{aligned}x &= L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - xXL_9 - xYL_{10} - xZL_{11} \\y &= L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - yXL_9 - yYL_{10} - yZL_{11}\end{aligned}$$

onde:

- $L_1, L_2, \dots, L_{11}$ são parâmetros da transformação;

- (x, y) são coordenadas planas de pontos no referencial da imagem;
- (X, Y, Z) são coordenadas tridimensionais de pontos no referencial do terreno.

Considerando as coordenadas dos pontos de apoio (X, Y, Z) e os termos xX , xY , xZ , yX , yY e yZ como constantes (isto é, sem erro), o resultado é um modelo linear e implícito. Logo, as observações (x, y) podem ser expressas em função dos parâmetros de orientação. Assim pode-se utilizar o método paramétrico (MMQ) para o ajustamento.

O modelo matemático utilizado no método paramétrico apresenta as observações ajustadas como função dos parâmetros ajustados, assim o modelo funcional é expresso como (GEMAEL, 1994):

$$L_a = F(X_a) \quad (50)$$

O modelo linearizado é dado como segue:

$$L_b + V = F(X_0 + X) = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a = X_0} X \quad (51)$$

sendo:

$$V = L_a - L_b$$

$$X = X_a - X_0$$

Designando a função dos parâmetros aproximados $(F(X_0))$ por L_0 :

$$L_0 = F(X_0) \quad (52)$$

e a matriz das derivadas parciais por:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a = X_0} \quad (53)$$

Assim pode-se escrever a equação (51) como:

$$L_b + V = L_0 + AX \quad (54)$$

ou,

$$V = AX + (L_0 - L_b) \quad (55)$$

$$\text{ou, fazendo } L = L_0 - L_b, \quad (56)$$

$$V = AX + L \quad (57)$$

Impondo agora a condição de mínimos quadrados, chega-se a solução desejada:

$$X_a = X_0 - (A^T P A)^{-1} A^T P L$$

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}, \text{ com } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{S}, \text{ onde } S = 2n \text{ (observações)} - u \text{ (parâmetros)}.$$

Para o problema em questão, deseja-se determinar os 11 parâmetros (u) da DLT. Assim, o vetor dos parâmetros ajustados é dado por:

$$X_a = [L_1, L_2, \dots, L_{11}]^T \quad (58)$$

Já as observações são as coordenadas de n pontos medidos no referencial da imagem:

$$L_b = [x_1, y_1, \dots, x_n, y_n]^T \quad (59)$$

Dada a forma linear da DLT, qualquer valor aproximado para os parâmetros pode ser adotado, inclusive o vetor nulo ($X_0 = 0$). Nessas condições, é fácil verificar que $L_0 = 0$ e, conseqüentemente, $L = -L_b$. Outra consideração importante refere-se a matriz peso P. Levando em conta que é razoável supor que todas as observações possuem mesma precisão (σ) e que, além disso, $\sigma = \sigma_0$ (desvio-padrão da observação de peso unitário), tem-se que $P = I$. Por estas considerações,

$$X_a = (A^T A)^{-1} A^T L_b$$

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T A)^{-1}, \text{ com } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T V}{S}, \text{ onde } S = 2n - u.$$

A matriz das derivadas parciais é dada por,

$${}_{2n}A_{11} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 \\ & & \dots & & \dots & & & \dots & & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_n X_n & -x_n Y_n & -x_n Z_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_n X_n & -y_n Y_n & -y_n Z_n \end{bmatrix}$$

3. PROPOSTA METODOLÓGICA

3.1. Considerações Iniciais

Uma visão geral da metodologia proposta para a orientação de imagens CBERS é apresentada na Figura 10. Os dados de entrada são a própria imagem, o controle de campo (isto é, rodovias georreferenciadas, obtidas a partir de um mapa ou base de dados ou através de levantamento de campo, dentre outras possibilidades) e os pontos sementes (coletados pelo operador de forma esparsa e grosseira sobre ou nas imediações das rodovias). O método trabalha com três passos básicos e um laço de realimentação, que controla a convergência do processo. Os detalhes desses passos serão dados nas seções seguintes.

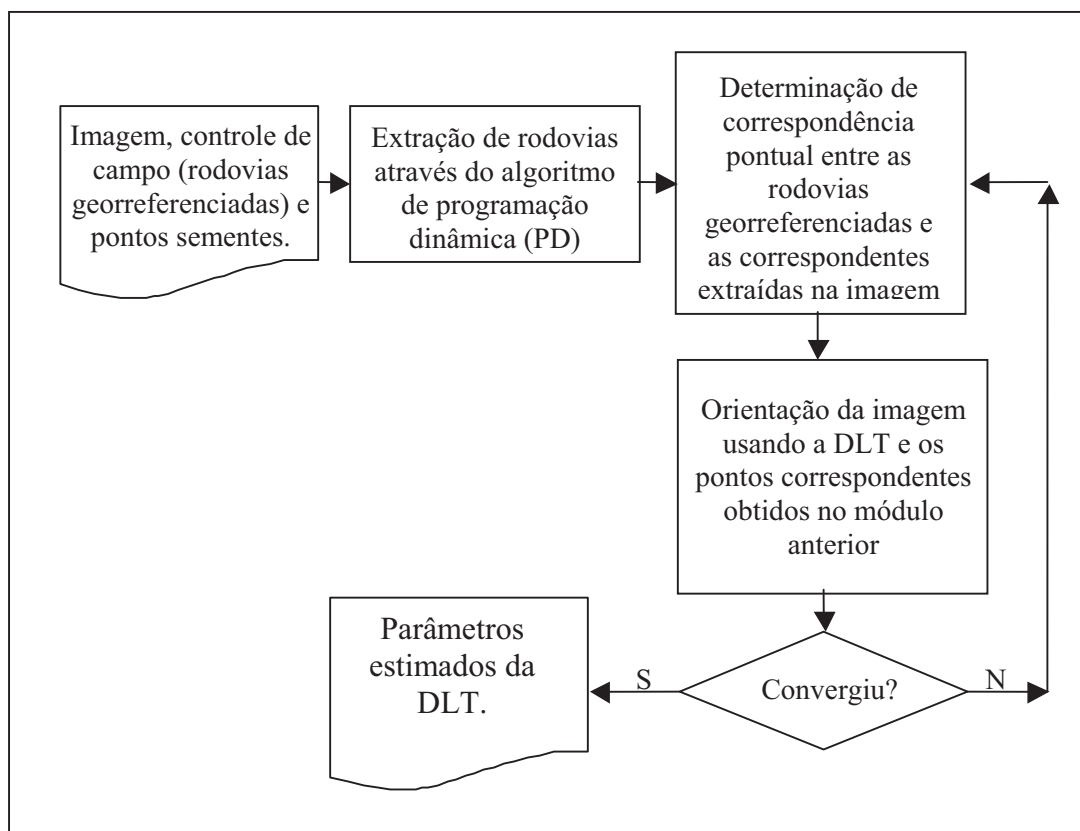


Figura 10 – Metodologia de orientação.

3.2. Extração de Rodovias

Na extração de rodovias na imagem usando o algoritmo de programação dinâmica (PD) os eixos das rodovias são extraídos semi-automaticamente usando o algoritmo de programação dinâmica (apresentado na seção 2.4.2) e alguns pontos sementes fornecidos pelo operador. Este passo não foi alvo de desenvolvimento computacional, pois tais desenvolvimentos já foram realizados em pesquisas anteriores (DAL POZ, 2000, VALE, 2003 e SILVA, 2005).

3.3. Estabelecimento da Correspondência entre as Rodovias Georreferenciadas e as Correspondentes Extraídas na Imagem

A metodologia a ser apresentada a seguir se presta à determinação da correspondência ponto a ponto entre duas feições bidimensionais, embora o problema possa ser estendido para entidades em espaços com dimensões maiores. Um problema de correspondência ponto a ponto entre um par de feições dos espaços imagem e objeto é resolvido indiretamente. Primeiramente uma feição do espaço-objeto é projetada para o espaço-imagem usando um modelo matemático adequado e seus parâmetros de orientação, disponíveis com alguma qualidade. Na sequência, o critério de distância mínima é utilizado para determinar a correspondência ponto a ponto entre a feição extraída na imagem e a correspondente projetada. Entretanto, como principalmente no início do processo de orientação estas feições apresentam grandes diferenças sistemáticas, propõe-se neste trabalho a minimização ou atenuação prévia destas diferenças através de uma transformação geométrica. Após a determinação da correspondência entre a feição extraída e a correspondente projetada e geometricamente corrigida, tem-se estabelecidas as

correspondências ponto a ponto entre a feição extraída e a correspondente feição do espaço objeto. Detalhes deste processo são descritos a seguir.

3.3.1. Determinação de Correspondência entre Rodovias Homólogas pelo Critério de Distância Mínima

Este procedimento é realizado seqüencialmente para cada par de rodovias correspondentes. Considerando-se então uma determinada rodovia georreferenciada, representada pela seqüência de pontos $P_1(X_1, Y_1, Z_1), \dots, P_n(X_n, Y_n, Z_n)$, e a correspondente rodovia extraída da imagem, representada pela seqüência $q_1(x_1, y_1), \dots, q_m(x_m, y_m)$, são necessárias as seguintes etapas para estabelecer a correspondência ponto-a-ponto entre ambas as feições:

1. Transformação dos pontos $P_1, \dots, P_n$ para o espaço-imagem, obtendo-se a seqüência $p_1, \dots, p_n$. Como no início do processo os parâmetros da DLT não são conhecidos, a referida transformação pode ser realizada aproximadamente usando a Transformação Afim 2D. Os parâmetros de transformação são determinados através da resolução de um sistema linear de 6 equações e 6 incógnitas, tendo por base apenas três pontos de apoio aproximadamente medidos na imagem (por exemplo, pontos sementes medidos em cruzamentos de rodovia). O MMQ pode ser usado se mais pontos estiverem disponíveis;
2. Determinação da correspondência ponto-a-ponto entre as seqüências planas (2D) $p_1, \dots, p_n$ (projetada) e $q_1, \dots, q_m$ (extraída), conforme princípio descrito abaixo.

Como as feições rodoviárias são feições geometricamente suaves, estas podem ser representadas por linhas poligonais com longos segmentos de reta. Dessa forma, a

correspondência será realizada entre linhas poligonais representando a rodovia extraída e a correspondente projetada.

A correspondência entre duas linhas poligonais é realizada projetando-se os pontos (vértices) de uma linha poligonal para a outra. Na figura 11, P_1 e P_2 são dois pontos sucessivos da linha poligonal representando a rodovia extraída e P é um vértice da linha poligonal representando a rodovia projetada. Pelo critério de distância mínima, o ponto correspondente a P na rodovia extraída é o ponto de intersecção (P') entre a reta (r), definida pelos pontos P_1 e P_2 , e a projeção ortogonal (s) que passa por P .

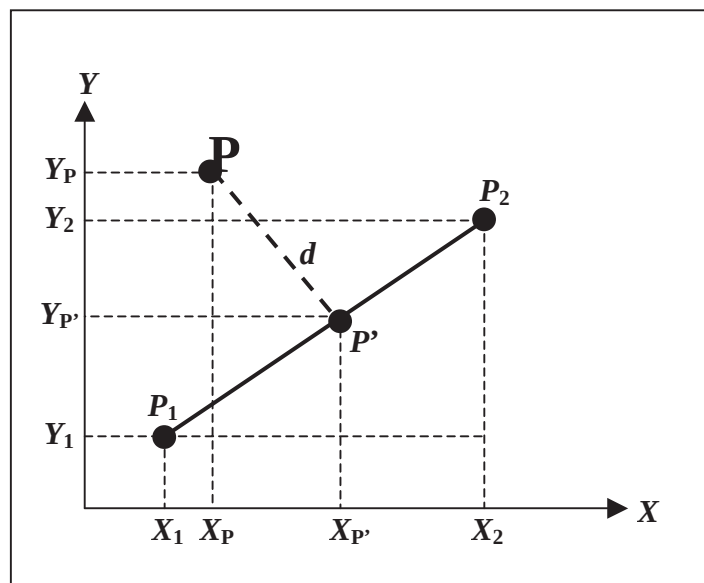


Figura 11 – Projeção ortogonal de um ponto na reta
(Adaptado de MAIA, 2003)

Se a reta r , definida pelos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$, for expressa na forma $ax + by + c = 0$, então a distância de P à reta r poderá ser obtida por:

$$d = \frac{|ax_p + by_p + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (60)$$

O ponto $P'(x'_p, y'_p)$ é a projeção ortogonal de P em r , sendo suas coordenadas obtidas através da equação 61 (MAIA, 2003):

$$\begin{aligned} x'_p &= \frac{m_r(m_r x_1 - y_1 + y_p) + x_p}{m_r^2 + 1} \\ y'_p &= \frac{m_r^2(m_r x_1 - y_1 + y_p) + m_r x_p - m_r(m_r^2 + 1)x_1 + (m_r^2 + 1)y_1}{m_r^2 + 1} \end{aligned} \quad (61)$$

onde, m_r é o coeficiente angular de r , obtido a partir dos pontos P_1 e P_2 .

A equação 61 não pode ser aplicada no caso em que r for horizontal. Assim, quando r for horizontal, as coordenadas de P' são dadas por (x_1, y_p) .

Após o cálculo das coordenadas do ponto $P'(x'_p, y'_p)$, deve-se verificar se o mesmo pertence ao segmento de reta definido pelos pontos $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$, como segue:

$$\begin{aligned} x_1 &\leq x'_p \leq x_2 \\ y_1 &\leq y'_p \leq y_2 \end{aligned} \quad (62)$$

O processo de correspondência descrito acima é realizado para todos os pontos da linha poligonal, a fim de que seus correspondentes sejam encontrados na linha poligonal representando a rodovia extraída. Caso se deseje obter a correspondência de pontos não coincidentes com vértices da linha poligonal de entrada, basta reamostrar os pontos de interesse e aplicar o processo descrito.

O resultado deste processo é uma reamostragem da seqüência $q_1, \dots, q_m$, isto é, $q'_1, \dots, q'_n$. As correspondências obtidas são então $(q'_1, p_1), \dots, (q'_n, p_n)$ ou $(q'_1, P_1), \dots, (q'_n, P_n)$;

3.3.2. Refinamento do Critério de Distância Mínima

A metodologia de correspondência apresentada anteriormente funciona adequadamente quando não estão presentes distorções geométricas significativas entre as linhas poligonais homólogas. O ideal é que apenas diferenças randômicas estejam presentes.

No problema em estudo, especialmente no início do processo, haverá grandes diferenças geométricas entre as feições extraídas e projetadas. Portanto, para aplicação da metodologia descrita é necessário fazer uma correção prévia de eventuais diferenças geométricas entre as feições homólogas. A Figura 12 mostra duas feições homólogas (E , P) com diferenças sistemáticas.

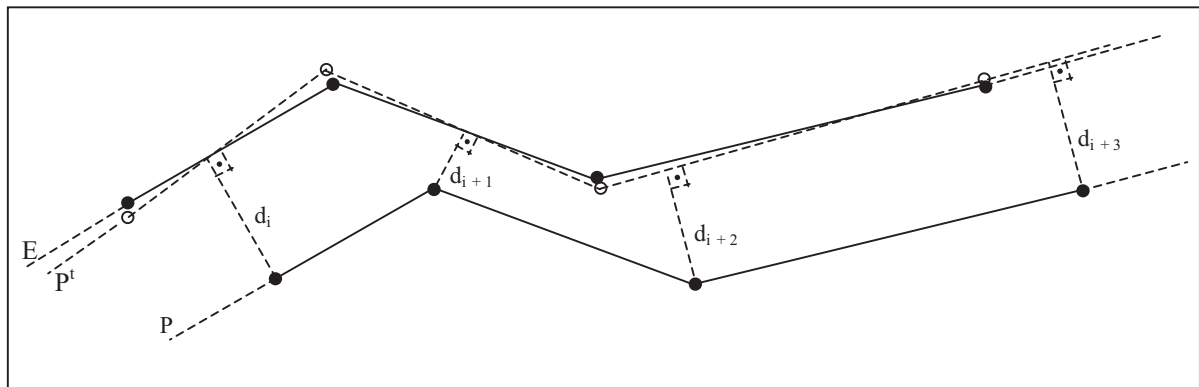


Figura 12 – Feições homólogas com diferenças sistemáticas.

Na Figura 12, d_i é a distância entre dois pontos, um ponto qualquer de P e sua projeção ortogonal sobre E . Sendo n o número de vértices em P , a distância média (D) entre P e E é dada por:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (63)$$

O problema a ser resolvido consiste em aplicar uma transformação geométrica em P , tal que D seja mínima.

Após a aplicação de uma transformação geométrica adequada à feição P , o resultado seria uma linha poligonal transformada (P'), identificada pela linha tracejada na Figura 12. A linha poligonal P' possui apenas diferenças randômicas em relação à linha poligonal E . Sendo,

$$P = \{p_1, \dots, p_n\} \quad (64)$$

a seqüência de vértices que define a linha poligonal P e,

$$p_i^t = T(u_1, \dots, u_k, p_i) \quad (65)$$

uma transformação geométrica com k parâmetros u_i , então a seqüência P pode ser transformada em P' na forma que segue:

$$P^t = \{T(u_1, \dots, u_k, p_1), \dots, T(u_1, \dots, u_k, p_n)\} = \{p_1^t, \dots, p_n^t\} \quad (66)$$

Assim, como os pontos p_i^t dependem dos parâmetros $u_1, \dots, u_k$, a equação da distância média (D) pode ser reescrita na forma:

$$D(u_1, \dots, u_k) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i(u_1, \dots, u_k)}{n} \quad (67)$$

Sendo $U = (u_1 \dots u_k)$ o vetor dos parâmetros incógnitos e sabendo-se que cada componente varia num intervalo conhecido, pode-se expressá-lo na forma:

$$U = U_0 + I^T \delta U \quad (68)$$

onde,

$U_0 = [u_1^0 \ u_2^0 \ \dots \ u_k^0]^T$ é o limite inferior de variação do vetor U ;

$\delta U = [\delta u_1 \dots \delta u_k]$ é a resolução dos componentes do vetor U ;

$$I = [i_1 \dots i_k]^T = \left[\text{int} \left(\frac{u_1 - u_1^0}{\delta u_1} \right) \dots \text{int} \left(\frac{u_k - u_k^0}{\delta u_k} \right) \right]^T \quad (69)$$

Como U depende apenas de I , já que U_0 e δU são parâmetros previamente fixados, a equação (67) pode ser reescrita na forma:

$$D(i_1, \dots, i_k) = \sum_{i=1}^n d_i(i_1, \dots, i_k) \quad (70)$$

A equação 70 mostra que a métrica D passa a depender de variáveis que assumem valores no N^k .

Assim, cada variável i_j , $j = 1, \dots, k$, assume valor no intervalo $[0; i_j^t]$, onde

$$i_j^t = \text{int} \left(\frac{u_j^t}{\delta u_j} \right), \text{ sendo } u_j^t \text{ o limite superior para a variável real } u_j.$$

A solução (I) da equação 70 é tal que:

$$D(i_1, \dots, i_k) \rightarrow \text{mínimo} \quad (71)$$

A obtenção desta solução envolve então um problema combinatório que exige um esforço computacional proibitivo para K grande. Uma forma de se diminuir o esforço computacional é fazer uso de técnicas hierárquicas, iniciando-se com uma resolução (δU) grosseira para U e sucessivamente aumentar esta resolução até atingir uma solução com qualidade desejada. Conseqüentemente, ocorrerá, em cada iteração, uma diminuição gradativa nos intervalos de variação das componentes U . De qualquer forma, os intervalos de variação das componentes de U diminuem drasticamente após a realização da primeira orientação com a DLT. Como neste trabalho serão utilizadas imagens CBERS, cuja geometria interna é boa, pode-se corrigir apenas translação (x_0, y_0) e rotação (α), ficando então o vetor U reduzido a

três componentes, isto é, $K = 3$. Neste caso, o espaço de busca é volumétrico, podendo ser representado como no exemplo da Figura 13, onde i_1 e i_2 assumem valores no conjunto $[0;1;2]$ e i_3 no conjunto $[0; 1]$. Logo, as possíveis soluções são dadas pelo produto cartesiano $[0;1;2]^2 \times [0; 1]$. Cada possível solução é um ponto contido no paralelepípedo mostrado na Figura 13, sendo a solução ótima aquela que atende a expressão 71.

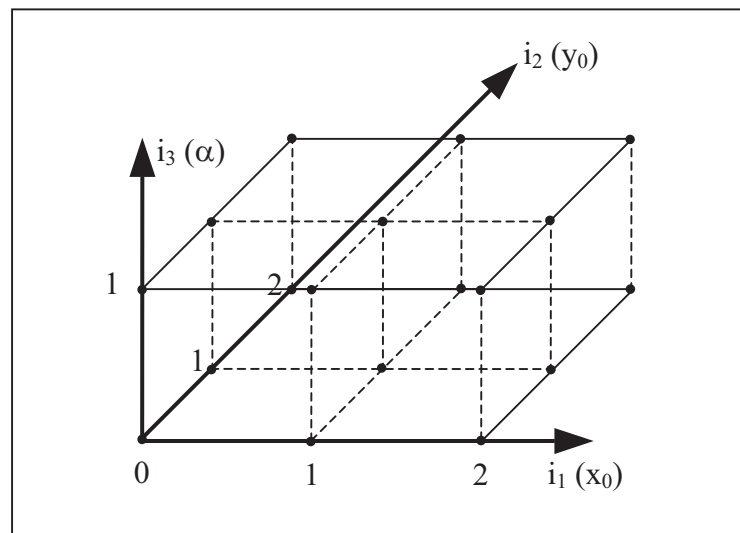


Figura 13 – Representação do espaço de busca para $K = 3$, i_1 e i_2 assumindo valores no intervalo no conjunto $[0; 1; 2]$ e i_3 assumindo valores no conjunto $[0; 1]$.

Após ter determinado o terno de valores de i_1 , i_2 e i_3 que minimiza a distância média D , tem-se também como resultado o estabelecimento da correspondência pontual entre a feição extraída (E) e a feição transformada, definida pelo conjunto de pontos p^t . Como também se conhece a correspondência entre este último conjunto e um outro conjunto de pontos na feição projetada P , têm-se indiretamente a correspondência ponto a ponto entre a feição extraída e a correspondente feição no espaço objeto. Duas observações finais podem ser feitas:

- o procedimento descrito pode ser aplicado para cada par de feições homólogas, isolada ou simultaneamente;

- técnicas de multiresolução podem ser aplicadas para reduzir gradativamente o espaço de busca.

3.4. Orientação da Imagem

Nesta pesquisa optou-se em utilizar a Transformação Linear Direta (DLT) na metodologia de orientação da imagem. Dada à boa qualidade interna das imagens CBERS, um modelo linear como a DLT deve produzir resultados satisfatórios para terrenos não muito movimentados.

Na orientação da imagem, os pontos correspondentes (ponto no espaço-imagem e ponto no espaço-objeto) obtidos no passo anterior (seção 3.3.) são utilizados na determinação dos coeficientes da DLT (seção 2.3.1.2). Como neste caso temos 11 parâmetros (u), para a solução pelo MMQ são necessários no mínimo 6 pontos de controle (n) que irão gerar 12 equações, assim o Grau de liberdade será: $S = 2n - u = 6 \cdot 2 - 11 = 12 - 11 = 1$. Dada a forma que os pontos correspondentes são determinados sempre haverá um grande número de pontos de apoio.

3.5. Critério de Convergência

Após a realização dos passos acima (seções 3.2, 3.3 e 3.4) é necessário verificar a estabilização dos parâmetros de orientação. Este procedimento é realizado por meio da análise das discrepâncias entre os pontos correspondentes das rodovias extraídas da imagem e das rodovias (georreferenciadas) projetadas para a imagem, possibilitando acessar o erro médio em pixels das rodovias projetadas na imagem. Logo pode-se dizer que é feita uma avaliação indireta da qualidade dos parâmetros estimados de orientação.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no processo de orientação semi-automática de imagens CBERS usando rodovias como controle de campo. Conforme foi mostrado no capítulo anterior, o problema é resolvido a partir das etapas de extração semi-automática de rodovias, correspondência e orientação. Cada uma dessas etapas é realizada separadamente.

4.2. Material e Métodos

4.2.1 Materiais

Os experimentos foram conduzidos a partir de uma imagem orbital, de um mapa digital planimétrico das rodovias e de dados de altimetria.

A imagem orbital é uma imagem do satélite CBERS2 da região de Presidente Prudente do dia 14 de Dezembro de 2005. Trata-se de uma imagem nível 1 (imagem resultante apenas da aplicação de procedimentos de calibração radiométrica) do sensor CCD, possuindo uma resolução espacial de 20m e a cobertura no terreno é de aproximadamente 113x113Km. É importante lembrar que nenhuma informação de calibração do sensor (por exemplo, a posição do ponto principal no arranjo linear de detectores) e de efemérides (posição e atitude do satélite durante a formação da imagem) está disponível. A imagem foi disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através do sítio: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>.

Os dados planimétricos das rodovias estaduais da região foram disponibilizados pela empresa Engemap Engenharia e Mapeamento Ltda. Estes dados foram

levantados com GPS (Sistema de Posicionamento Global) e possuem uma precisão de 1m no terreno.

Os dados de altimetria foram obtidos através de uma interpolação dos dados do sistema da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Os dados do SRTM (versão 2) para a América do Sul possuem uma precisão de 30 metros.

Dentre as rodovias presentes na imagem, apenas as rodovias estaduais foram selecionadas para a avaliação experimental da metodologia proposta, pois eram as que continham informações de campo.

Nos experimentos foi utilizada apenas a banda 4 da imagem CBERS, pois esta é a banda que mostra mais nitidamente as rodovias. Antes da realização dos experimentos foi feita a inversão nos tons de cinza dos pixels da imagem (banda 4) para que as rodovias ficassem representadas com os tons de cinza mais claros que o fundo. Isso é necessário para a utilização do método de extração semi-automática de rodovias por programação dinâmica, pois em sua concepção os níveis de cinza das rodovias são assumidos como mais claros que o fundo.

Além da imagem CBERS e dos dados de campo, foram utilizados também os seguintes recursos:

- Rotinas computacionais:
 - ✓ Para a extração de rodovias usando programação dinâmica;
 - ✓ Para estabelecimento de correspondência pontual entre duas feições cartográficas.
- Microcomputador e componentes, presentes no Laboratório de Fotogrametria Digital da FCT/UNESP.

O método proposto foi implementado em linguagem C ++ Builder (versão 4) para ambiente Windows/PC.

4.2.2 Metodologia de Avaliação

A avaliação da metodologia de orientação semi-automática de imagens CBERS utilizando rodovias como controle de campo será feita da seguinte forma:

- Avaliação interna do processo de orientação usando as rodovias utilizadas na orientação;
- Avaliação externa do processo de orientação usando trechos de rodovias de verificação; e
- Avaliação da extração das rodovias.

Os resultados obtidos serão analisados visual e numericamente. Na análise visual os eixos de rodovias extraídos e projetados para o espaço imagem são sobrepostos na imagem, sendo analisados visualmente por um operador. A interpretação visual compreenderá, basicamente, a análise de imagens e de gráficos.

Na análise numérica do processo, é feita uma análise das discrepâncias entre os pontos correspondentes das rodovias extraídas da imagem e das rodovias (georreferenciadas) projetadas para o espaço-imagem após a convergência do processo. Este procedimento possibilita acessar o erro médio em pixels das rodovias projetadas na imagem. Portanto, esta estratégia permite avaliar indiretamente a qualidade dos parâmetros estimados de orientação.

Na análise numérica do processo de extração as entidades comparadas são: rodovias de referência e extraídas. As rodovias de referência correspondem aos eixos centrais da rodovia, os quais são considerados corretos, sendo, digitalizados por um operador. As correspondentes rodovias extraídas são os eixos de rodovia extraídos através do algoritmo de programação dinâmica.

Nas avaliações numéricas dos experimentos serão consideradas, para as discrepâncias, 4 casas decimais. Isto será feito com o intuito de possibilitar a verificação da variação das discrepâncias, pois as mesmas são fornecidas em unidade sub-pixel.

4.2.3 Determinação da Resolução Final dos Parâmetros de Rotação e Translação utilizados no Refinamento da Correspondência

A resolução adotada para os parâmetros de translação (δx_0 , δy_0) foi de 0,5 pixel, pois assim é possível chegar a um resultado final com precisão sub-pixel.

Já no caso da resolução para a rotação ($\delta\alpha$) é necessário encontrar qual o menor valor de $\delta\alpha$. Neste caso, considerando dois segmentos de reta de duas linhas poligonais, o menor valor para $\delta\alpha$ ocorre para o maior segmento de reta. Sendo d o comprimento do maior segmento de reta de todas as linhas poligonais representando as rodovias extraídas (Figura 14):

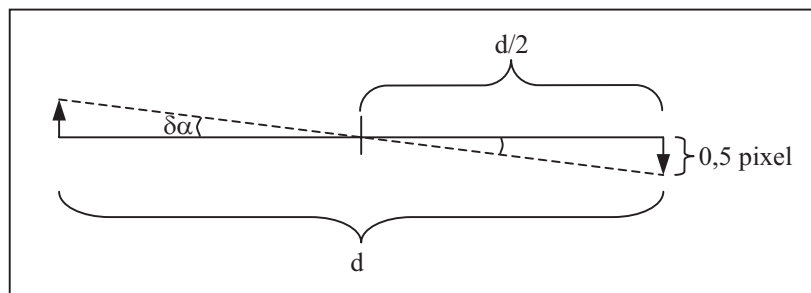


Figura 14 – Determinação da rotação ($\delta\alpha$)

$$\text{Tg}(\delta\alpha) = \frac{0,5}{\frac{d}{2}} = \frac{1}{d} \quad (72)$$

Logo,

$$\delta\alpha = \text{Tg}^{-1}\left(\frac{1}{d}\right) \quad (73)$$

4.3. Experimentos e Análise dos Resultados

De forma a avaliar a potencialidade da metodologia de orientação semi-automática de imagens CBERS utilizando rodovias como controle de campo, cinco experimentos foram realizados com a imagem CBERS disponível. A metodologia foi aplicada em recortes da imagem e na imagem toda. O objetivo é verificar o desempenho do método em regiões menores e maiores da imagem. A Figura 15 mostra a imagem CBERS e as áreas selecionadas para os experimentos.

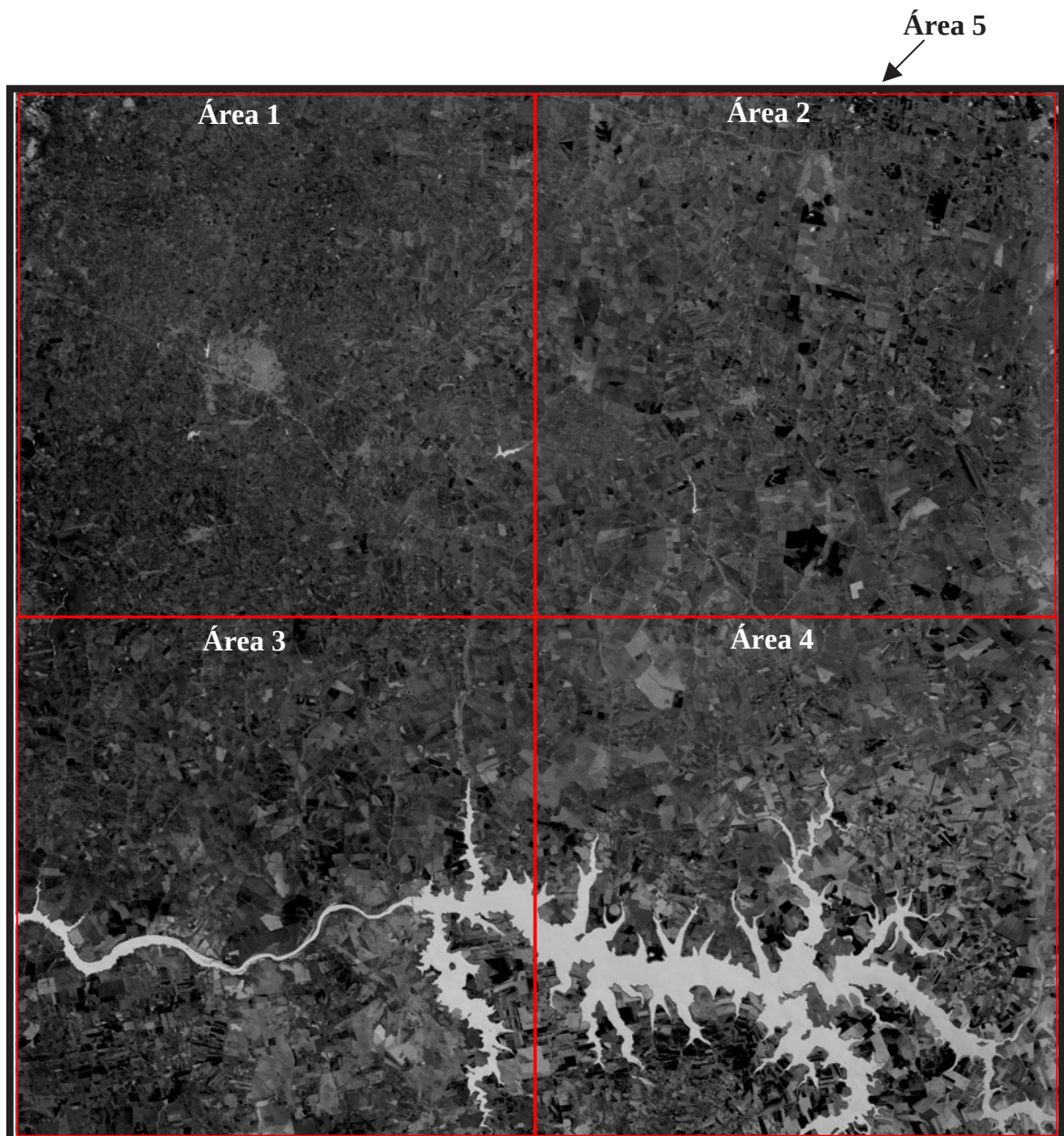


Figura 15 – Áreas selecionadas para os experimentos.

4.3.1 Experimento – 1

Este experimento foi realizado na parte superior esquerda da imagem (área 1 da Figura 15), onde foram selecionadas cinco rodovias para o processo de orientação e três trechos de rodovias para a avaliação do processo como mostra a Figura 16. A Figura 15 mostra também os pontos (em amarelo) utilizados na orientação inicial da imagem através da transformação afim.

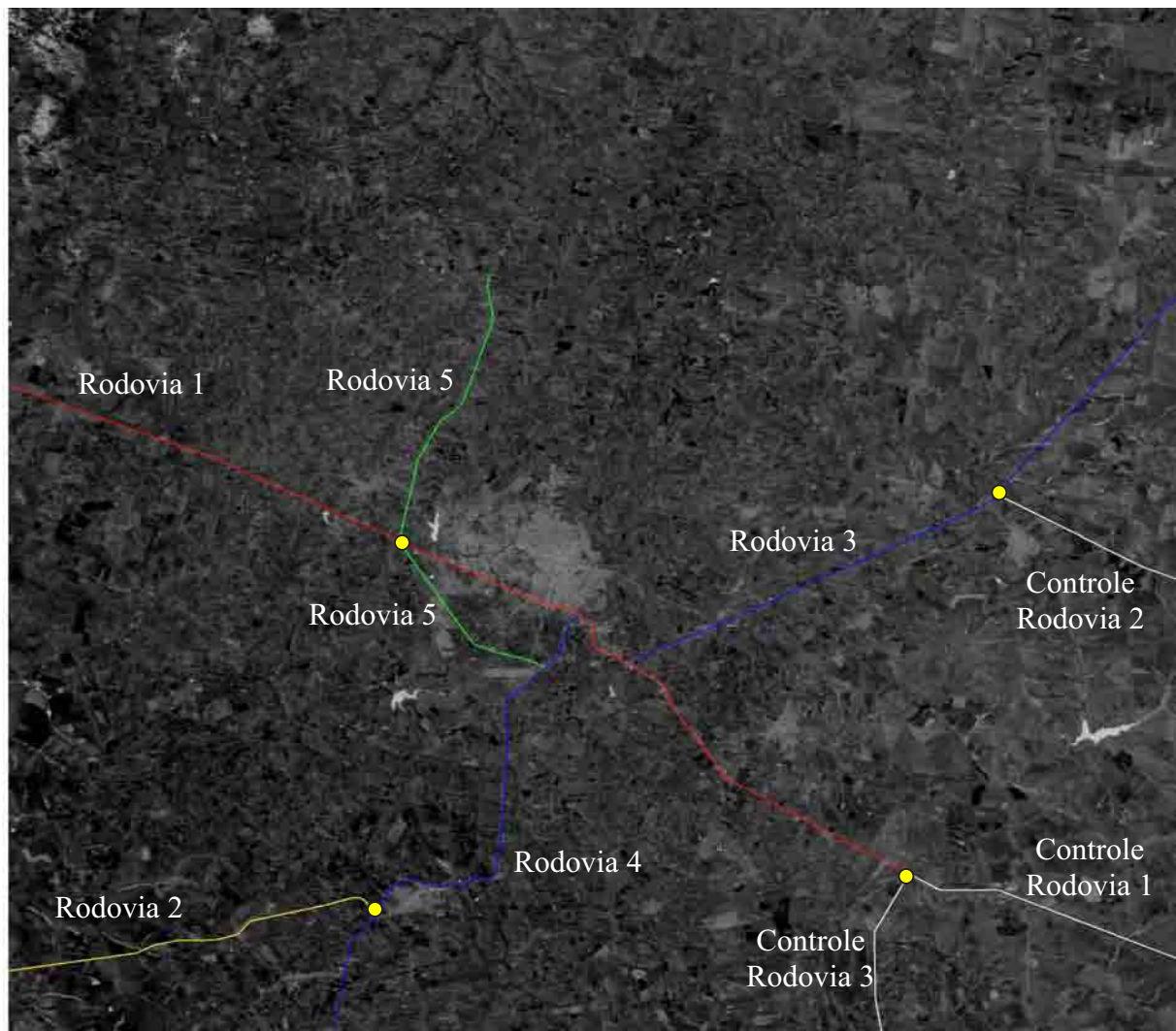


Figura 16– Parte superior esquerda da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.

4.3.1.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação

A Figura 17 mostra um recorte da área 1 com alguns segmentos de rodovias utilizados neste experimento. As rodovias extraídas estão representadas em azul, as projetadas em vermelho e o refinamento da projeção inicial em branco. Como já foi descrito no capítulo anterior, a projeção inicial das rodovias do espaço objeto para o espaço imagem é feita através da transformação afim e nos demais passos essa projeção é feita pela DLT.



Figura 17 – Experimento 1: início do processo de orientação.

Como se pode notar na Figura 17, no início do processo, as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas estão afastadas. Sendo assim é necessário aplicar o processo de refinamento proposto (capítulo 3), a fim de minimizar globalmente essa distância. Esse ajuste geométrico permite a realização da correspondência pontual entre as feições de forma mais eficiente.

A distância média global (D) entre todos os pontos correspondentes das rodovias extraídas e das rodovias projetadas no início do processo é de 2,729 pixels. Após o refinamento esse valor passa para 1,187 pixels. Este resultado mostra que o processo de refinamento melhorou significativamente as correspondências. As correspondências obtidas dessa forma são utilizadas para a realização da primeira determinação dos parâmetros da DLT, ou seja, é realizada assim a primeira iteração do processo de orientação.

Após a primeira iteração, novamente, é calculada a distância média global (D) entre as rodovias extraídas e as projetadas via DLT. Novamente é realizada a correspondência pontual e o processo segue para uma nova iteração. O processo é iterativo e é realizado até que os parâmetros da orientação estabilizem, o que é detectado indiretamente através da verificação do mínimo de D . Neste experimento o processo converge após a terceira iteração.

A Figura 18 mostra a mesma janela mostrada na Figura 17, onde as rodovias extraídas estão em azul e as projetadas em vermelho. Estas últimas foram projetadas usando os parâmetros da DLT obtidos após a convergência do processo de orientação.

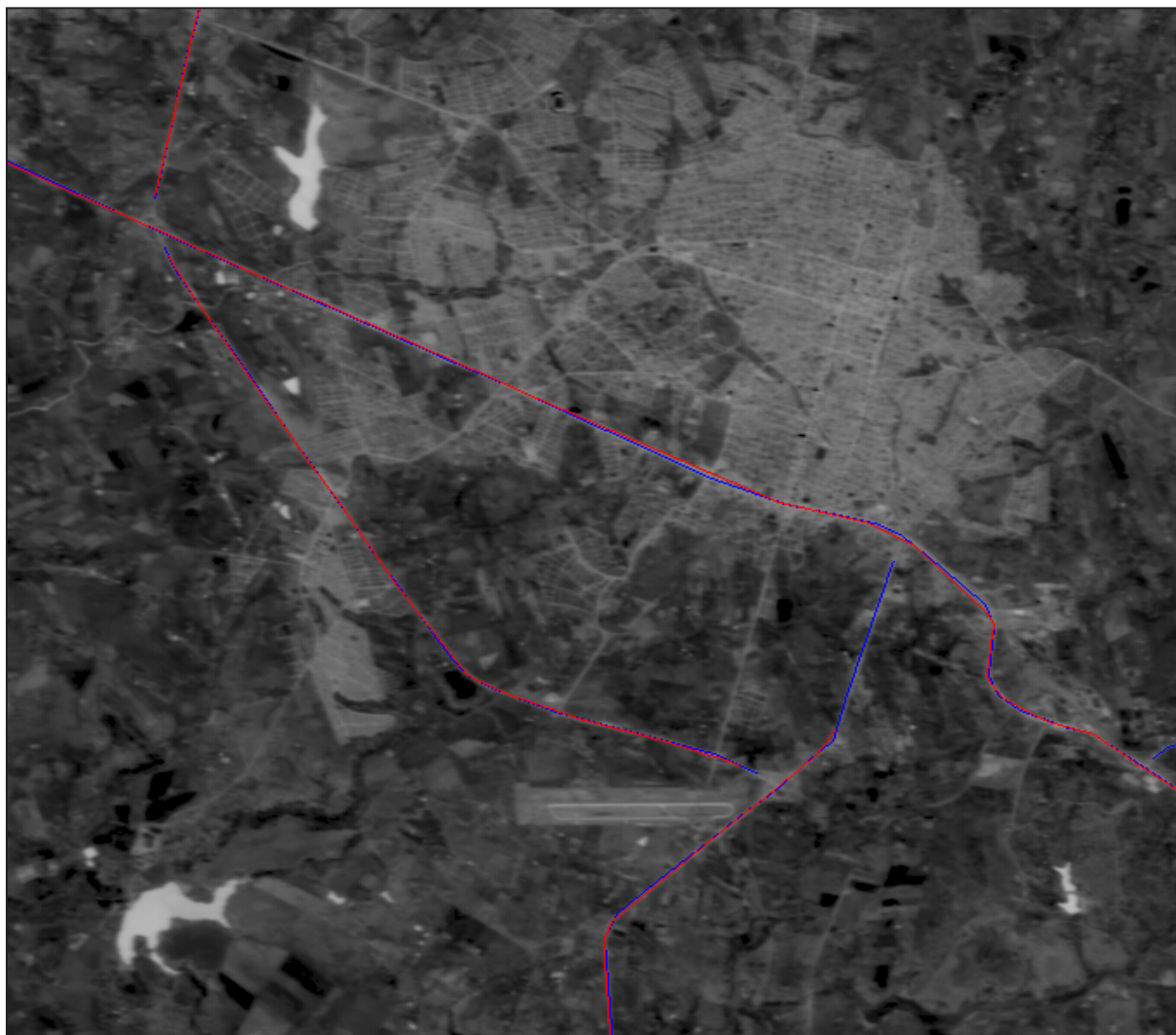


Figura 18 – Experimento 1: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.

Como se pode notar na Figura 18, as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas em boa parte dos trechos estão quase sobrepostas, ou seja, elas possuem um deslocamento muito pequeno entre si. Logo pode-se concluir que o método, no geral, obteve um bom desempenho. A análise numérica dos resultados confirma isso, já que a discrepância global (D) no final do processo de orientação é de apenas 0,219 pixels.

A Tabela 4 mostra a distância média de cada rodovia e a distância média global, obtidas em cada uma das iterações do processo de orientação.

Tabela 4 – Experimento 1: distâncias médias no processo de orientação.

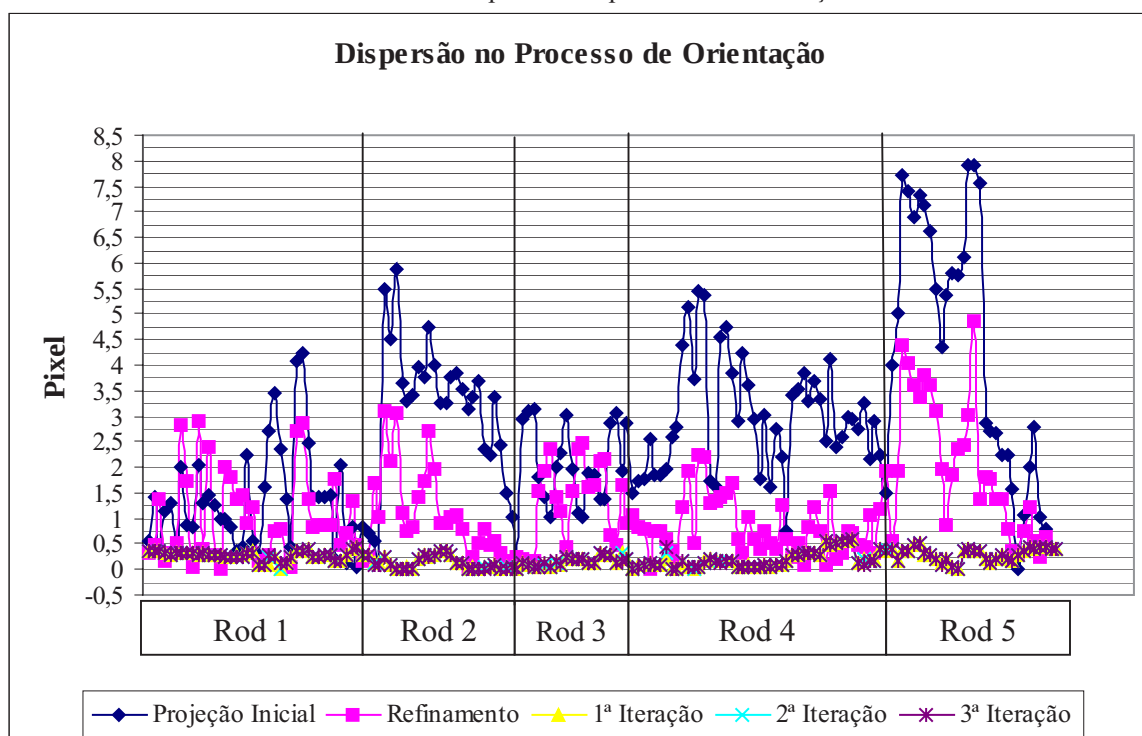
	Proj. Inicial	Refinamento	1ª Iteração	2ª Iteração	3ª Iteração
Rodovia 1 (d_1)	1,2925	0,9987	<u>0,2662</u>	0,2690	0,2712
Rodovia 2 (d_2)	3,3426	1,0739	<u>0,1164</u>	0,1174	0,1183
Rodovia 3 (d_3)	2,1022	1,3434	0,1701	0,1698	<u>0,1629</u>
Rodovia 4 (d_4)	3,0073	0,8602	0,1999	0,1999	<u>0,1982</u>
Rodovia 5 (d_5)	4,3491	2,0698	<u>0,3009</u>	0,3017	0,3024
Global (D)	2,7292	1,1872	0,2287	0,2196	0,2190

onde, d_i , $i = 1, 2, 3, 4$ e 5 – distância média na rodovia

Conforme mostra a Tabela 4, individualmente algumas rodovias obtiveram a distância média (d) mínima antes da convergência do processo, porém, a análise sempre é feita em cima da distância média global (D), e como se pode ver, D é mínima após a 3ª iteração.

O Gráfico 1 mostra as discrepâncias dos vértices das rodovias utilizadas na orientação em cada uma das iterações do processo de orientação.

Gráfico 1. Discrepâncias no processo de orientação.



O Gráfico 1 mostra que as discrepâncias após o refinamento tem uma certa queda e que após a 1ª Iteração tem uma queda abrupta, permanecendo neste patamar até o fim do processo.

4.3.1.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação

Após a determinação dos parâmetros da DLT, ou seja, após o término do processo de orientação, é necessário fazer a avaliação externa da orientação. Para isto, foram utilizados três trechos de rodovias não utilizados na orientação, os quais são mostrados na Figura 16.

Na avaliação cada uma das rodovias foi projetada do espaço objeto para o espaço imagem utilizando os parâmetros da DLT determinados na orientação. Em seguida, cada rodovia foi analisada separadamente e, por último, foi feita uma análise global, ou seja, as três rodovias foram analisadas juntas.

Os resultados obtidos no processo de avaliação da orientação são apresentados na Figura 19. Conforme mostra a Figura 19 (a), as rodovias (extraída e projetada) em grande parte do percurso estão superpostas. Como em apenas um trecho existe uma separação mais acentuada (Figura 19 (a₁)), conclui-se que, no geral, o resultado é satisfatório. Pela Figura 19 (b), nota-se que as rodovias possuem uma separação ainda menor que as verificadas anteriormente (Figura 19 (a)), estando sobrepostas em boa parte. Já na Figura 19(c), pode-se notar que as rodovias, no geral, estão mais distantes entre si do que se verifica nas Figuras 19 (a) e 19 (b).

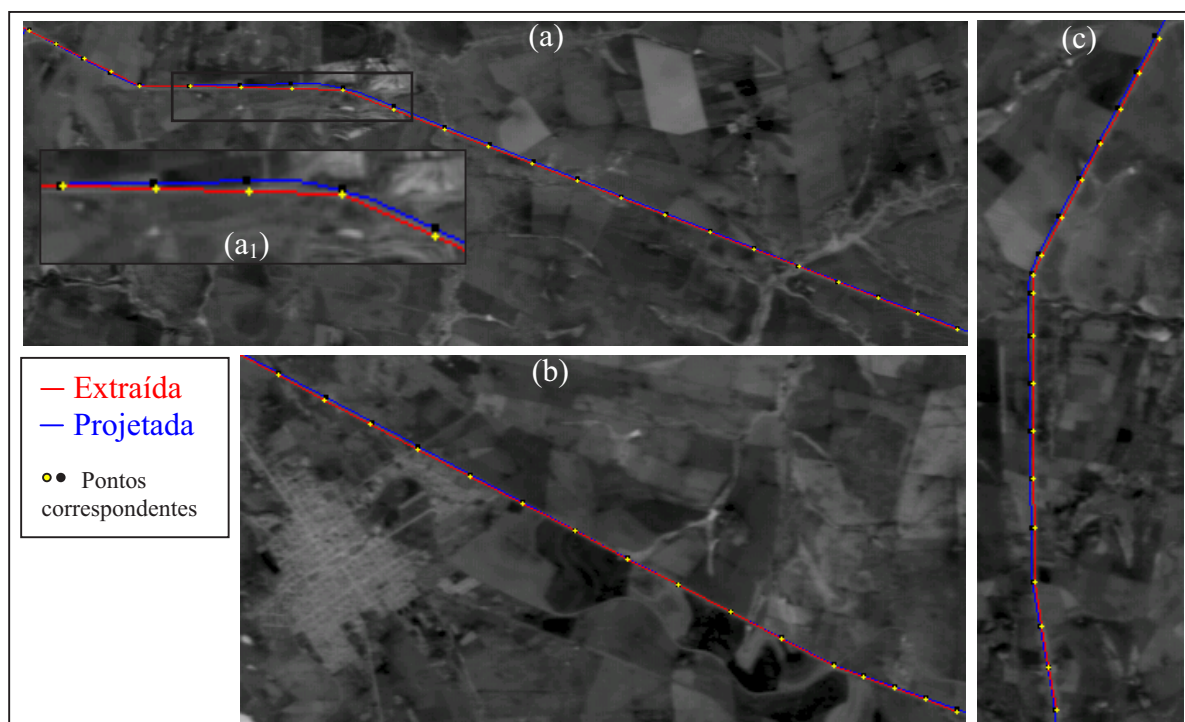


Figura 19 – Experimento 1: Avaliação Externa: (a) Rodovia Controle 1; (a₁) Trecho da Rodovia Controle 1; (b) Rodovia Controle 2; e (c) Rodovia Controle 3.

A Tabela 5 mostra a distância média em cada rodovia e a distância média global na avaliação externa do processo de orientação.

Tabela 5 – Experimento 1: avaliação externa da orientação.

Avaliação	Distâncias
Controle 1 (d_1)	0,9764
Controle 2 (d_2)	0,9336
Controle 3 (d_3)	1,4063
Global (D)	1,0959

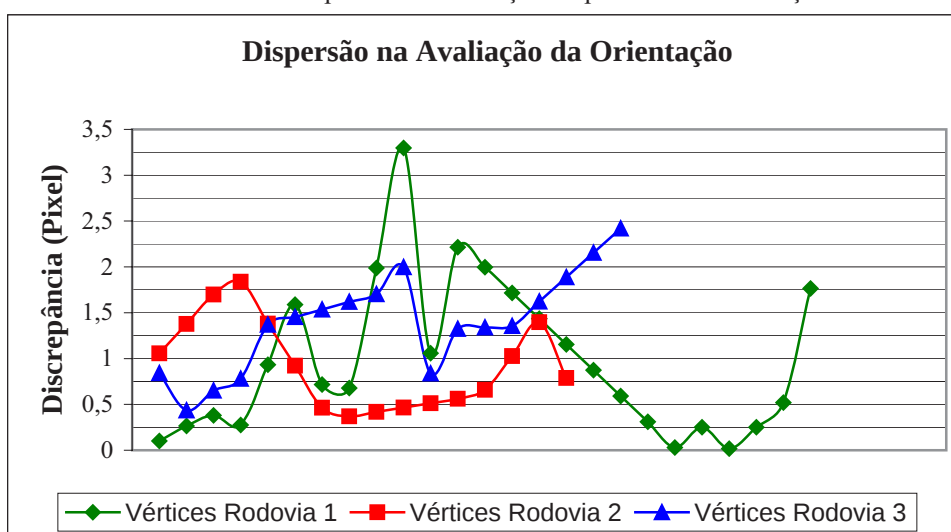
onde, d_i , $i = 1, 2 \text{ e } 3$ – distância média na rodovia

Como se pode verificar na Tabela 5, a rodovia 2 é a que possui a menor distância média (0,9336 pixels), seguida pela rodovia 1 (0,9764 pixels) e, como já foi prevista pela análise visual, a rodovia 3 é a que possui a maior distância média (1,4063 pixels). A

distância média global (D) nesta avaliação foi de 1,0959 pixels. No geral, conclui-se então que o processo proposto obteve um resultado satisfatório, já que a precisão global, obtida para as três rodovias de verificação, situou-se no nível do pixel.

O Gráfico 2 mostra as discrepâncias referentes aos vértices de cada uma das rodovias utilizadas na avaliação externa do processo de orientação.

Gráfico 2. Discrepâncias na avaliação do processo de orientação.



Verifica-se pelo Gráfico 2 que um vértice pertencente à rodovia 1 possui uma discrepância acima de 3 pixels, o que pode ser observado na Figura 19 (a₁). Pode-se observar também que a maioria dos pontos da rodovia 3 possuem uma discrepância acima de 1,0 pixel.

4.3.1.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias

Nos processos de orientação e avaliação externa da orientação as discrepâncias entre as feições são calculadas através da comparação entre as rodovias

extraídas e as correspondentes projetadas. Determina-se agora a qualidade das rodovias extraídas através do método de extração por programação dinâmica.

A avaliação realizada a seguir será feita, apenas numericamente, através da análise da discrepância entre as rodovias extraídas manualmente (referência), sendo estas consideradas como corretas, e as rodovias extraídas semi-automaticamente pelo algoritmo de programação dinâmica.

A Tabela 6 mostra as distâncias médias entre todas rodovias (referência e extraídas) utilizadas neste experimento.

Tabela 6 – Experimento 1: avaliação da extração.

Avaliação	Distâncias
Rodovia 1 (d_1)	0,4172
Rodovia 2 (d_2)	0,5495
Rodovia 3 (d_3)	0,2763
Rodovia 4 (d_4)	0,5597
Rodovia 5 (d_5)	0,5913
Controle 1 (d_6)	0,5443
Controle 2 (d_7)	0,1679
Controle 3 (d_8)	0,4298
Global (D)	0,4355

onde, d_i , $i = 1, 2, \dots, 8$ – distância média da rodovia

Como mostra a Tabela 6 a distância média global (D) é de 0,4355 pixels. Considerando que, na média, a largura das rodovias é de 1,5 pixels, verifica-se que as rodovias, globalmente, foram extraídas com uma qualidade muito boa para este caso, visto que a distância média global é menor que 1/3 da largura da rodovia.

4.3.2 Experimento – 2

Este experimento foi realizado na parte superior direita da imagem (área 2 da Figura 15), onde foram selecionadas três rodovias para o processo de orientação e um trecho de rodovia para a avaliação do processo. Também foram identificados três pontos (em amarelo) utilizados na orientação inicial da imagem através da transformação afim (Figura 20).

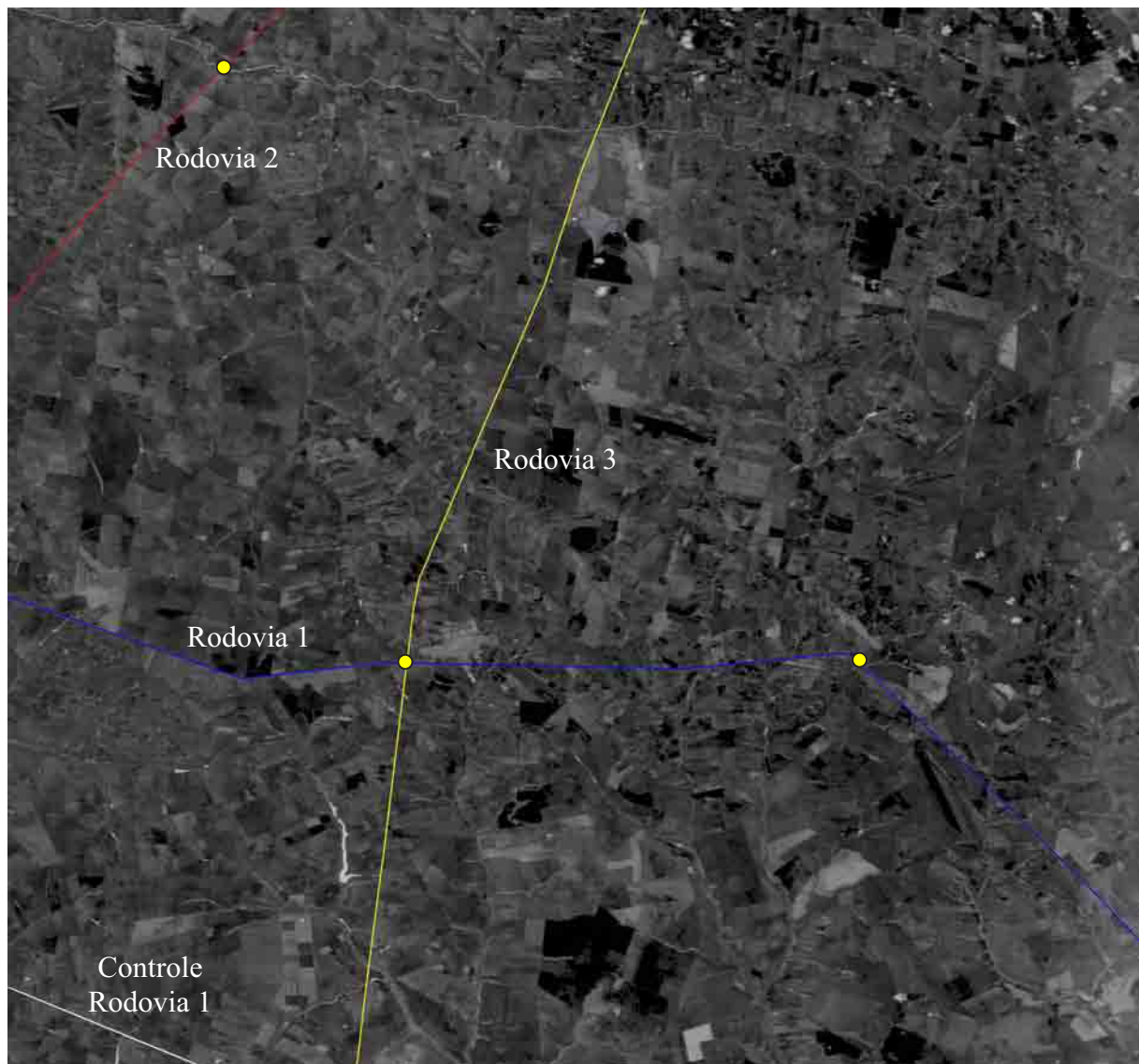


Figura 20 – Parte superior direita da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.

4.3.2.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação

A Figura 21 mostra algumas partes da área 2 e alguns segmentos de rodovias utilizados neste experimento. As rodovias extraídas estão representadas em azul, as projetadas em vermelho e o refinamento da projeção inicial em branco.

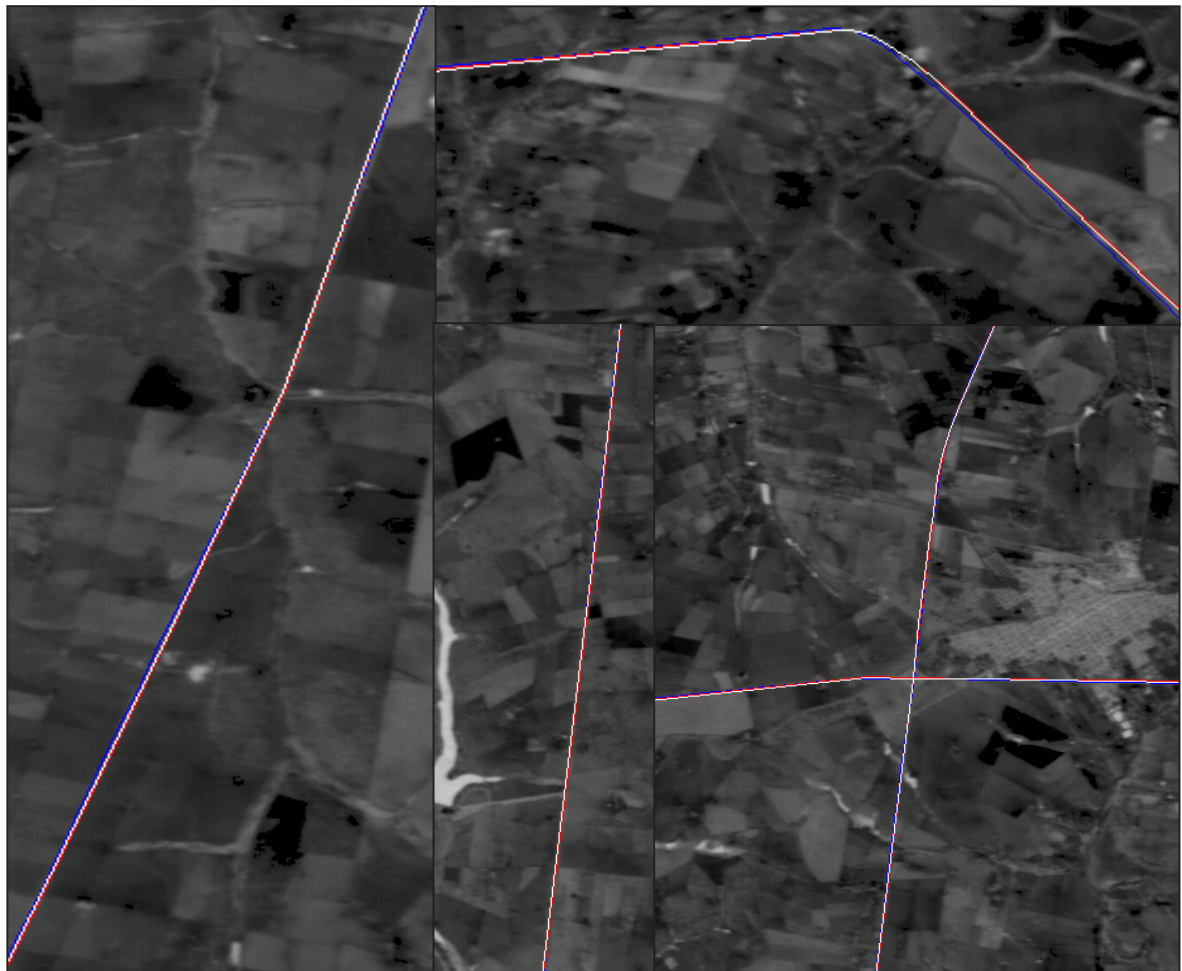


Figura 21 – Experimento 2: início do processo de orientação.

A Figura 21 mostra que, no início do processo, as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas estão bem próximas, mas ainda é possível fazer uma separação visual entre elas. Com o intuito de minimizar globalmente a distância entre elas, antes de

iniciar o processo de correspondência pontual entre as feições, aplica-se o processo de refinamento (cor branca).

A distância média global (D) entre as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas no início do processo é de 1,2664 pixels. Após o processo de refinamento esse valor passa para 1,2082 pixels. Assim é realizada a correspondência pontual entre as feições e o processo segue para a primeira iteração.

Após a primeira iteração, novamente, é calculada a distância média global (D) entre as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas via DLT. Novamente é realizada a correspondência e o processo segue para uma nova iteração. O processo é realizado até que os parâmetros da orientação estabilizem e D seja mínima. Neste experimento, assim como no anterior, o processo converge após a terceira iteração.

A Figura 22 mostra algumas partes da área usada neste experimento e alguns trechos de rodovias, que são os mesmos mostrados na Figura 21. As rodovias extraídas são representadas em azul e as projetadas em vermelho. Estas últimas são obtidas através dos parâmetros de orientação determinados no final do processo de orientação.

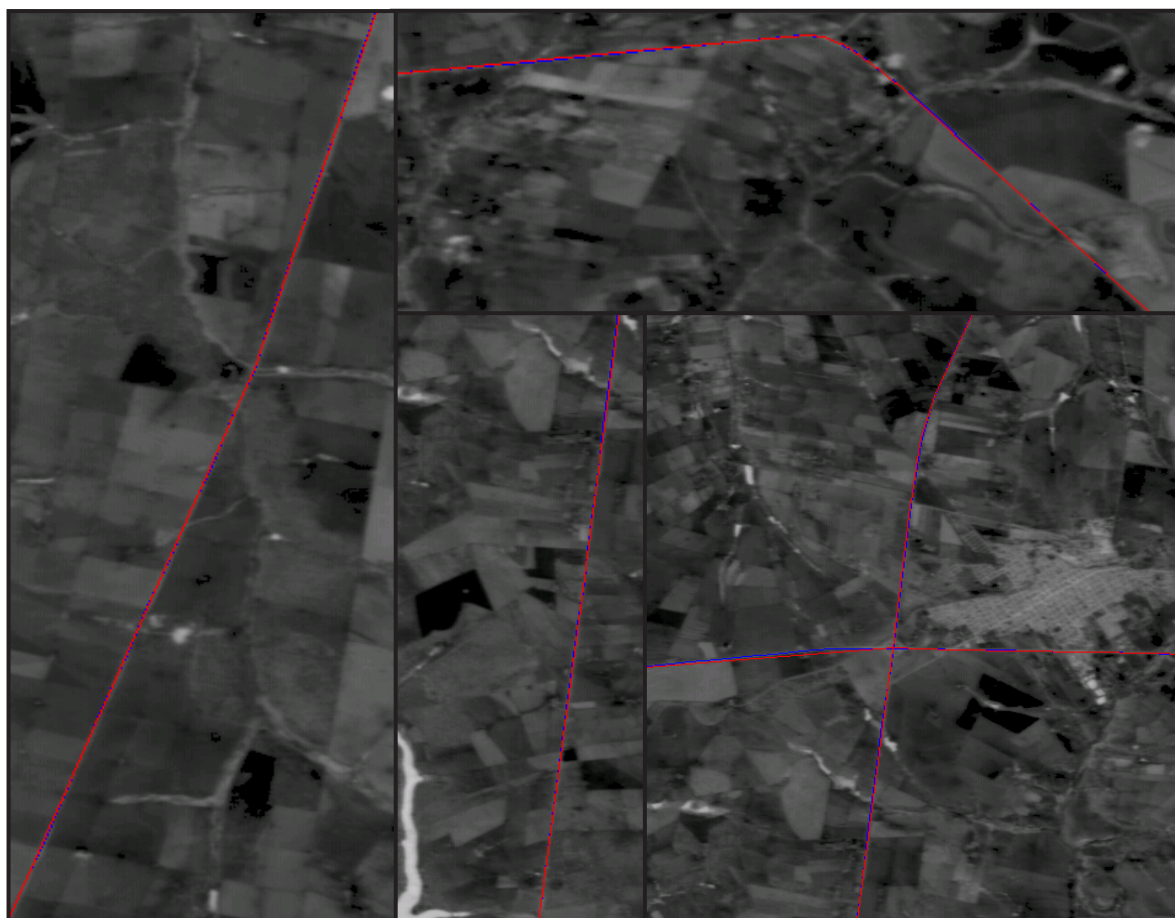


Figura 22 – Experimento 2: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.

A Figura 22 mostra que as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas em grande parte dos trechos estão quase sobrepostas, ou seja, elas possuem um deslocamento muito pequeno entre si. Apenas em alguns pontos isolados essa separação é mais visível.

A análise numérica dos resultados confirma as interpretações conduzidas na análise visual. A distância média global (D) ao final do processo de orientação é de 0,1942 pixels, levando a concluir que o processo obteve um resultado satisfatório.

A Tabela 7 mostra a distância média (d) em cada rodovia e a distância média global (D) em cada uma das iterações do processo de orientação.

Tabela 7 – Experimento 2: distâncias médias no processo de orientação.

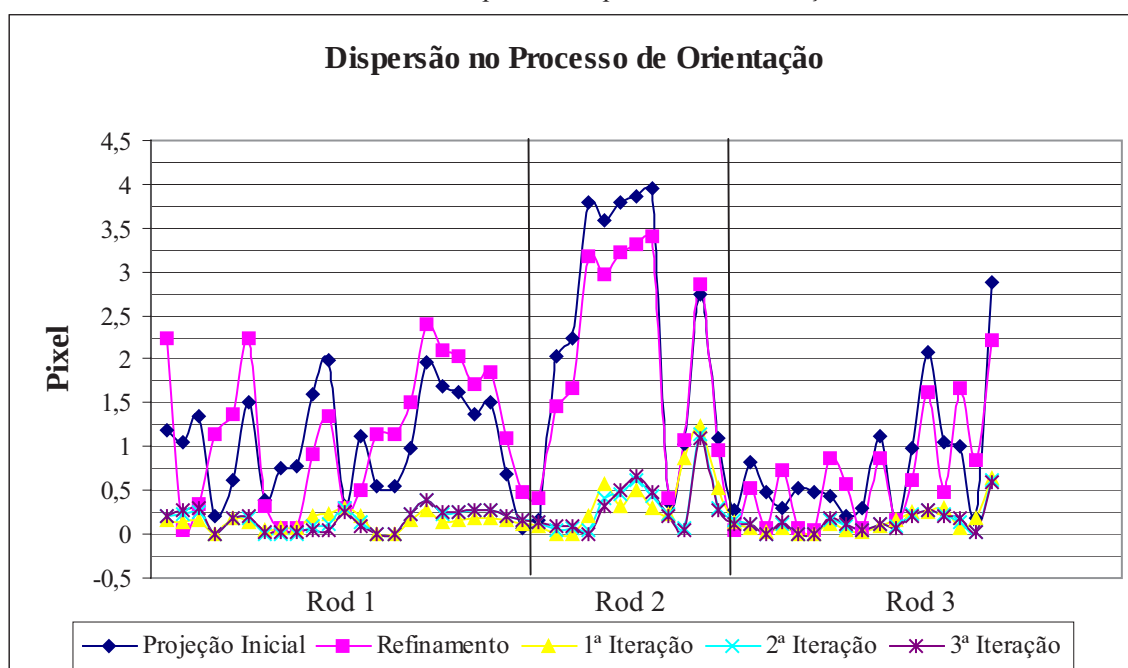
	Proj. Inicial	Refinamento	1ª Iteração	2ª Iteração	3ª Iteração
Rodovia 1 (d_1)	1,5245	1,4845	<u>0,1721</u>	0,1954	0,1964
Rodovia 2 (d_2)	1,3135	1,3271	0,7157	0,4298	<u>0,4088</u>
Rodovia 3 (d_3)	0,7847	0,6763	0,1467	0,1419	<u>0,1397</u>
Global (D)	1,2664	1,2082	0,2056	0,1959	0,1942

onde, d_i , $i = 1, 2 \text{ e } 3$ – distância média da rodovia

Na Tabela 7 a rodovia 1 obteve a distância média (d) mínima antes da convergência do processo, porém, como já foi dito anteriormente, a análise sempre é feita em cima da distância média global (D) e, como se pode ver D é mínima após a 3ª iteração. Além disso, o mencionado valor mínimo ocorreu porque a malha de rodovia projetada encontrou posteriormente posição e forma mais favorável para o encaixe global com a correspondente malha extraída. Isto é, este ajuste foi ligeiramente desfavorável para a rodovia 1.

O Gráfico 3 mostra as discrepâncias dos vértices das rodovias em cada uma das iterações do processo de orientação.

Gráfico 3. Discrepâncias no processo de orientação.



O Gráfico 3 mostra que as discrepâncias após o refinamento tem uma certa queda e que após a 1ª Iteração tem uma queda abrupta, permanecendo neste patamar até o fim do processo.

4.3.2.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação

Nesta avaliação, foi utilizado um trecho de rodovia, o qual é mostrado na Figura 20. Esse trecho de rodovia foi projetado do espaço objeto para o espaço imagem utilizando os parâmetros da DLT determinados na orientação. Os resultados obtidos no processo de avaliação da orientação são apresentados na Figura 23. Verifica-se visualmente que as rodovias (extraída e projetada), em quase todo o trecho, estão sobrepostas, ou seja, visualmente não se consegue fazer uma separação entre elas, logo, pode-se esperar que a distância entre elas seja muito pequena.

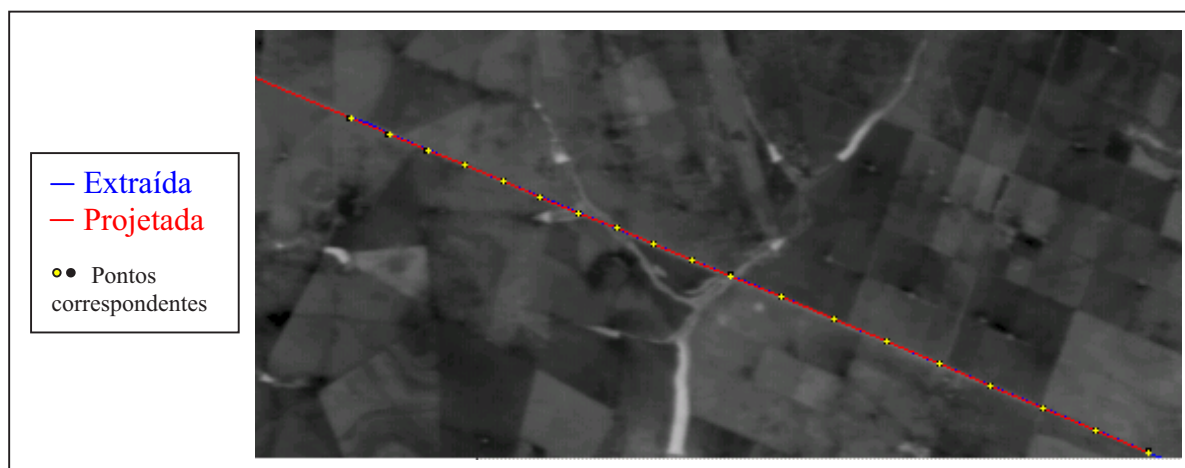


Figura 23 – Experimento 2: Avaliação Externa: Rodovia Controle 1.

A Tabela 8 mostra a distância média do trecho de rodovia utilizado na avaliação externa do processo de orientação.

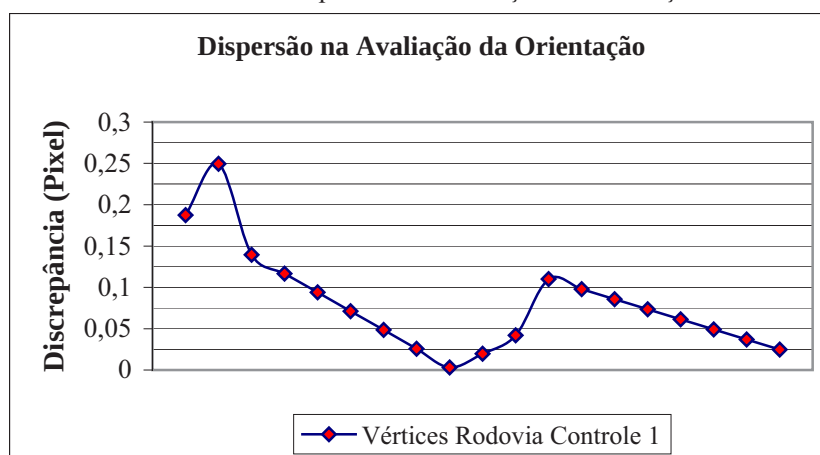
Tabela 8 – Experimento 2: avaliação externa da orientação.

Avaliação	Distância
Controle 1 (d_1)	0,0809

onde, d_1 – distância média da rodovia

Como se pode ver, a distância média nesta avaliação foi de 0,0809 pixels, sendo um valor muitíssimo pequeno e confirmando o que foi previsto na análise visual. Logo, pode-se concluir que por esta avaliação este processo obteve um resultado excelente.

O Gráfico 4 mostra a discrepância dos pontos na rodovia 1.

Gráfico 4. Discrepâncias na Avaliação da Orientação.

O Gráfico 4 mostra que a discrepância entre as rodovias (extraída e projetada), em todos os pontos, mesmo nos dois primeiros, é muito pequena. Logo, como foi observado na Figura 23, não é possível fazer uma separação visual entre essas rodovias.

4.3.2.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias

A Tabela 9 mostra a distância média entre as rodovias extraídas manualmente (referência) e as rodovias extraídas semi-automaticamente pelo algoritmo de programação dinâmica.

Tabela 9 – Experimento 2: avaliação da extração.

Avaliação	Distâncias
Rodovia 1 (d_1)	0,5002
Rodovia 2 (d_2)	0,3934
Rodovia 3 (d_3)	0,5591
Controle 1 (d_4)	0,1453
Global (D)	0,4867

onde, d_i , $i = 1, 2, \dots, 4$ – distância média da rodovia

Observando a Tabela 9 observa-se que a distância média global (D) é de 0,4867 pixels. Considerando, novamente, que, na média, a largura das rodovias é de 1,5 pixels, verifica-se que as rodovias, globalmente, foram extraídas com uma qualidade muito boa para este caso, visto que a distância média global é menor que 1/3 da largura da rodovia.

4.3.3 Experimento – 3

Este experimento foi realizado com base num recorte obtido junto à parte inferior esquerda da imagem, área 3 da Figura 15. Foram utilizadas três rodovias no processo de orientação, um trecho de rodovia na avaliação do processo de orientação e três pontos (em amarelo) para a orientação inicial via transformação afim (Figura 24).



Figura 24 – Parte inferior esquerda da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.

4.3.3.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação

A Figura 25 mostra algumas partes da área 3 e alguns trechos de rodovias utilizados no experimento. As rodovias extraídas estão representadas em azul, as projetadas em vermelho e o refinamento da projeção inicial em branco.



Figura 25 – Experimento 3: início do processo de orientação.

A Figura 25 mostra que, no início do processo, as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas em alguns lugares estão próximas, mas em outros lugares elas estão distantes. E após realizar o refinamento percebe-se que em alguns lugares a distância entre as rodovias diminui e em outros lugares ela aumenta. Isso ocorre em alguns casos, pois o refinamento tem como objetivo minimizar globalmente a distância entre as rodovias e não minimizar localmente essa distância.

No início do processo a distância média global (D) é de 4,3225 pixels. Após o refinamento esse valor passa para 2,1849 pixels. Em seguida são realizadas a

correspondência pontual entre as feições e a orientação via DLT. Neste experimento, assim como nos anteriores, o processo converge após a terceira iteração.

A Figura 26 mostra algumas partes da imagem, onde se têm os seguintes trechos de rodovias: as extraídas representadas pela cor azul e as projetadas, obtidas através dos parâmetros de orientação no final do processo, representadas pela cor vermelha.



Figura 26 – Experimento 3: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.

Através da análise visual na Figura 26 pode-se ver que as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas, após a convergência do processo, em boa parte dos trechos

possuem um deslocamento muito pequeno entre si, sendo que, em apenas alguns lugares é possível fazer uma separação visual das mesmas.

A análise numérica dos resultados confirma as observações acima. A distância média global (D) ao final do processo de orientação é de 0,3570 pixels, significando que o processo obteve um resultado satisfatório.

A Tabela 10 mostra a distância média (d) de cada rodovia e a distância média global (D) em cada uma das iterações do processo de orientação.

Tabela 10 – Experimento 3: distâncias médias no processo de orientação.

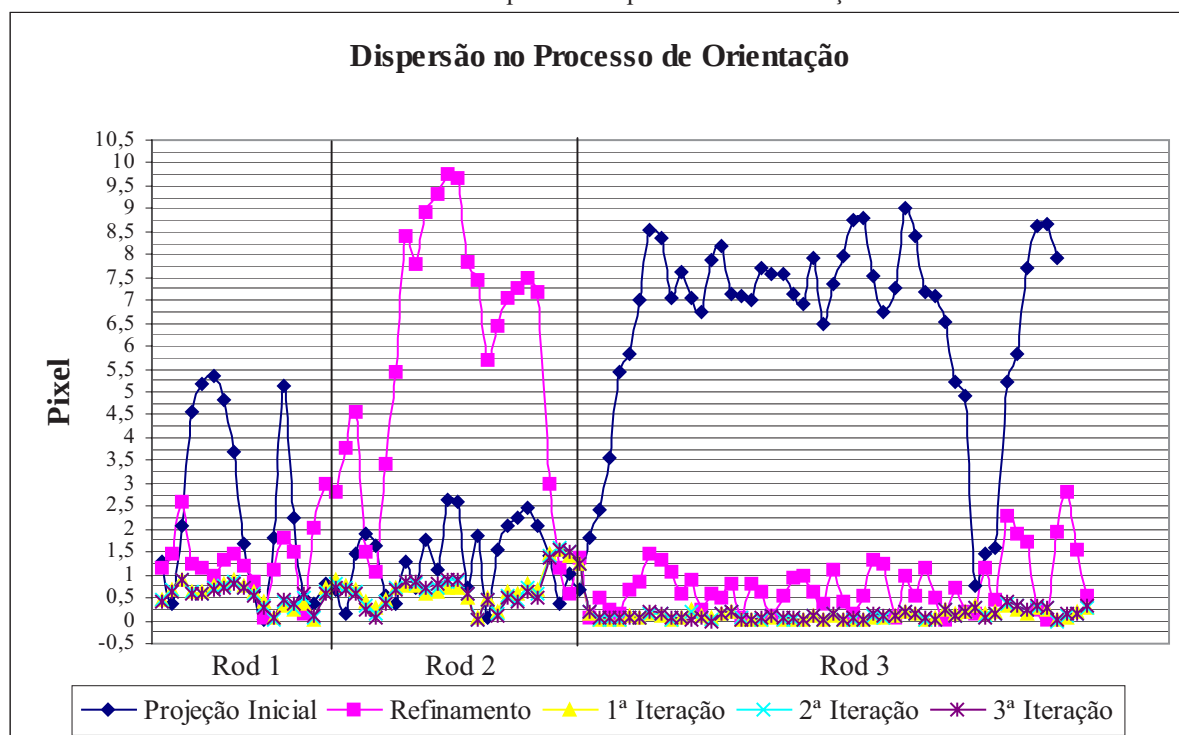
	Proj. Inicial	Refinamento	1ª Iteração	2ª Iteração	3ª Iteração
Rodovia 1 (d_1)	2,8193	1,2591	0,6081	0,5877	<u>0,5728</u>
Rodovia 2 (d_2)	1,2915	<u>5,0250</u>	0,6672	0,6636	<u>0,6578</u>
Rodovia 3 (d_3)	6,6084	0,7783	<u>0,1169</u>	0,1233	0,1264
Global (D)	4,3224	2,1849	0,3598	0,3592	0,3570

onde, d_i , $i = 1, 2 \text{ e } 3$ – distância média da rodovia

Novamente em alguns casos, como se pode perceber pela Tabela 10, após o refinamento a distância média (d) de algumas rodovias ao invés de diminuir, aumenta, (por exemplo, a rodovia 2). Pode-se perceber também que em alguns casos (por exemplo, a rodovia 3) a distância média (d) mínima é encontrada antes da convergência do processo porém, como já foi dito anteriormente, a análise do processo sempre é feita em cima da distância média global (D) e nunca em cima das distâncias médias (d_i). E após a terceira iteração D é mínima.

O Gráfico 5 mostra as discrepâncias dos vértices das rodovias em cada uma das iterações do processo de orientação.

Gráfico 5. Discrepâncias no processo de orientação.



O Gráfico 5 mostra que em alguns locais após o refinamento a discrepância aumenta ao invés de diminuir. Pode-se perceber também que após 1ª iteração a discrepância cai bruscamente e permanece no mesmo patamar até o fim do processo.

4.3.3.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação

Nesta avaliação, o trecho de rodovia, o qual é mostrado na Figura 24, foi projetado do espaço objeto para o espaço imagem utilizando os parâmetros da DLT determinados na orientação. Os resultados obtidos no processo de avaliação da orientação são apresentados na Figura 27. Esta figura mostra que as rodovias em quase todos os trechos, não estão tão próximas e visualmente é possível fazer uma separação entre elas, sendo que essa separação é mais acentuada na parte em destaque.

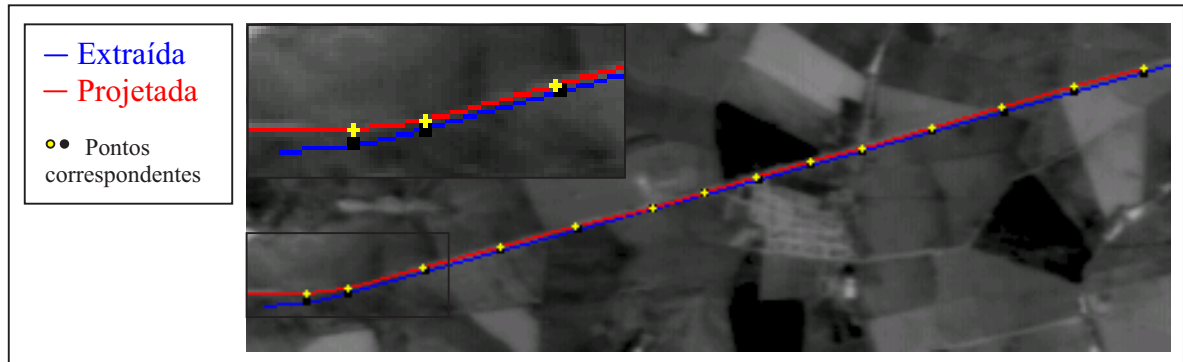


Figura 27 – Experimento 3: Avaliação Externa: Rodovia Controle 1.

A Tabela 11 mostra a distância média da rodovia utilizada na avaliação do processo de orientação. Nesta avaliação a distância média foi de 1,3461 pixels, resultado já previsto visualmente. Entretanto, pode-se concluir que o processo obteve um resultado satisfatório, visto que a distância está relativamente próxima de 1 pixel.

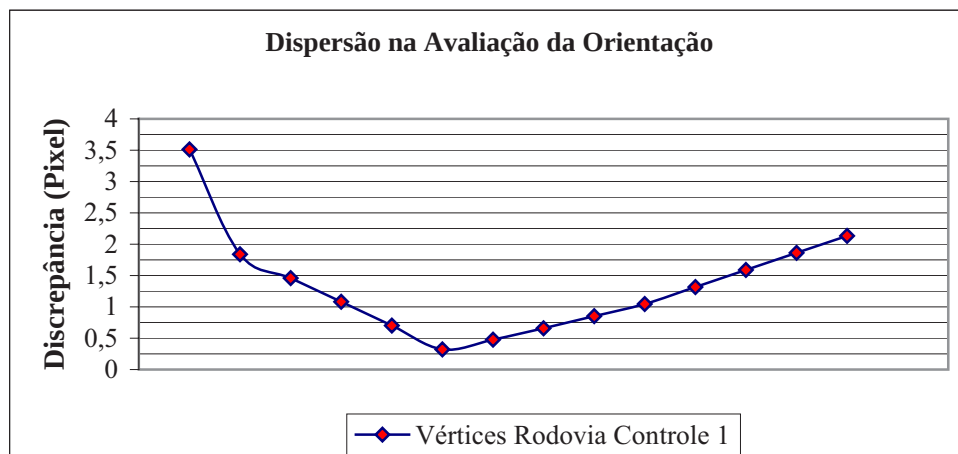
Tabela 11 – Experimento 3: avaliação externa da orientação.

Avaliação	Distância
Controle 1 (d_1)	1,3461

onde, d_1 – distância média da rodovia

O Gráfico 6 mostra a discrepância da rodovia na Avaliação da Orientação.

Gráfico 6. Discrepâncias na Avaliação da Orientação.



Verifica-se pelo Gráfico 6 que o primeiro vértice da rodovia possui uma discrepância acima de 3 pixels, os vértices centrais da rodovia possuem uma discrepância abaixo de 1 pixel e os dois últimos vértices possuem uma discrepância acima de 2 pixels. Isto pode ser observado na Figura 27, onde as rodovias (extraída e projetada) estão bem afastadas na parte inicial, muito próximas na parte central e um pouco mais afastadas na parte final.

4.3.3.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias

A Tabela 12 mostra a distância média de todas rodovias extraídas manualmente e as extraídas através do método de extração. A Tabela 12 mostra que a distância média global (D) neste caso é de 0,4418 pixels. E se for considerado, novamente, que a largura das rodovias, na média, é de 1,5 pixels, pode-se concluir que as rodovias, globalmente, foram extraídas com uma qualidade muito boa para este caso, visto que D é inferior a 1/3 da largura das rodovias.

Tabela 12 – Experimento 3: avaliação da extração.

Avaliação	Distâncias
Rodovia 1 (d_1)	0,3018
Rodovia 2 (d_2)	0,6057
Rodovia 3 (d_3)	0,4607
Controle 1 (d_4)	0,3804
Global (D)	0,4418

onde, d_i , $i = 1, 2, \dots, 4$ – distância média da rodovia

4.3.4 Experimento – 4

Este experimento foi realizado com base num recorte obtido junto à parte inferior direita da imagem, área 4 da Figura 15. Foram utilizadas três rodovias no processo de

orientação, um trecho de rodovia na avaliação externa do processo de orientação e três pontos (em amarelo) para a orientação inicial via transformação afim (Figura 28).

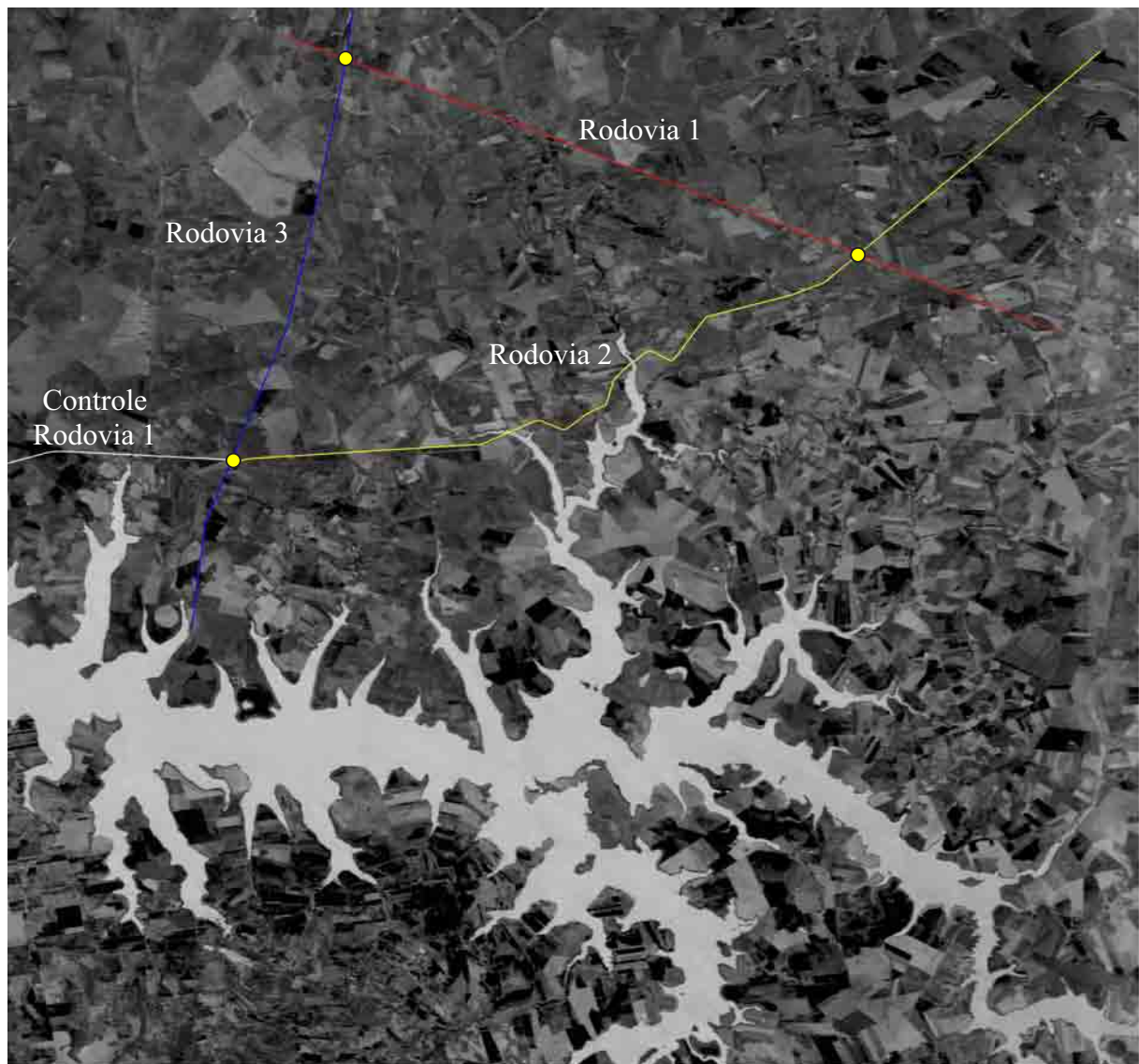


Figura 28 – Parte inferior direita da imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.

4.3.4.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação

A Figura 29 mostra algumas partes da imagem e alguns trechos de rodovias utilizados neste experimento. As rodovias extraídas estão representadas em azul, as projetadas em vermelho e o refinamento da projeção inicial em branco.



Figura 29 – Experimento 4: início do processo de orientação.

Na Figura 29, pode-se notar que, em algumas partes, as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas estão bem próximas, mas em outras partes elas estão um pouco distantes. Já após a aplicação do refinamento é possível notar que em alguns lugares a distância entre as rodovias diminuiu e em outros lugares aumentou. Isso mostra que, como era de se esperar, as distorções na imagem se comportam de forma diferente ao longo da imagem. A expectativa é que a DLT modele melhor estas distorções nas iterações que seguem.

A distância média global (D) no início do processo, que é propiciado pela orientação aproximada usando a transformação afim, é de 2,6677 pixels. Após o refinamento esse valor passa para 1,7972 pixels. Como poderá ser visto a seguir, o processo de orientação se estabiliza novamente após a realização da terceira iteração.

A Figura 30 mostra as mesmas partes mostradas na Figura 29, sendo que as rodovias extraídas são mostradas em azul e as projetadas em vermelho. Esta projeção foi realizada com os parâmetros da DLT obtidos após a convergência do processo de orientação.



Figura 30 – Experimento 4: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação.

Na Figura 30 pode-se ver que as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas estão sobrepostas ou quase sobrepostas, possuindo então um deslocamento muito pequeno entre si, sendo muito difícil fazer uma separação visual entre elas.

Ao final do processo de orientação, após a 3ª iteração, a distância média global (D) é de 0,1233 pixels. Este resultado confirma as observações acima, podendo-se dizer que o processo obteve um resultado satisfatório.

A Tabela 13 mostra a distância média de cada rodovia e a distância média global em cada uma das iterações do processo de orientação.

Tabela 13 – Experimento 4: distâncias médias no processo de orientação.

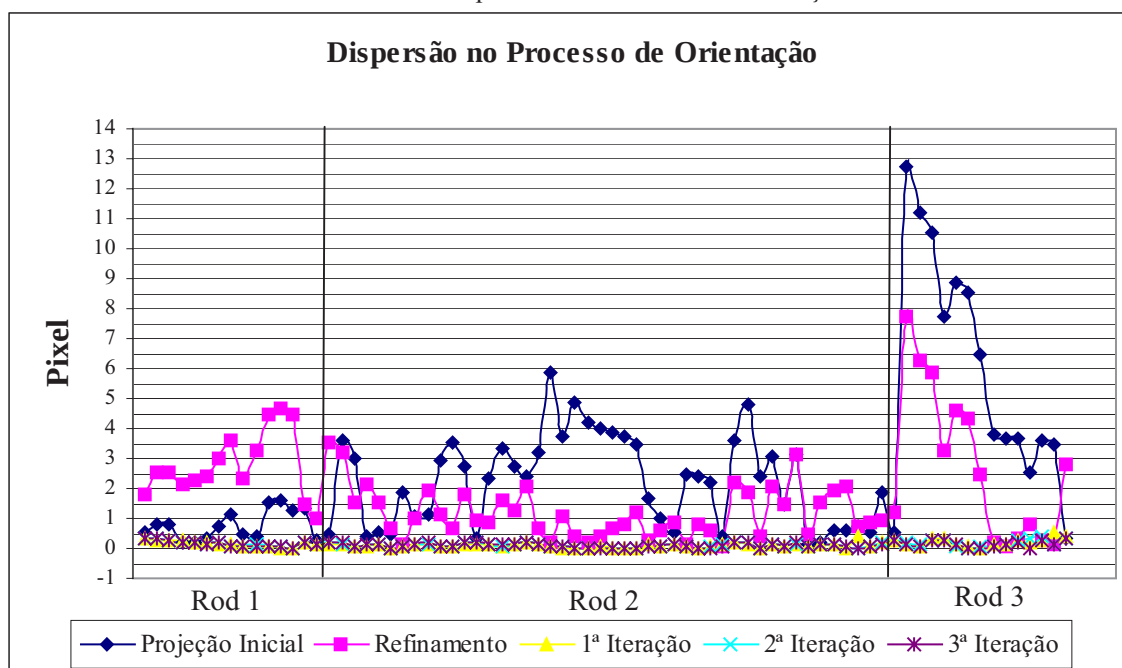
	Proj. Inicial	Refinamento	1ª Iteração	2ª Iteração	3ª Iteração
Rodovia 1 (d_1)	0,8143	<u>3,0395</u>	<u>0,1509</u>	0,1633	0,1660
Rodovia 2 (d_2)	2,1712	1,1832	0,0997	<u>0,0987</u>	0,1033
Rodovia 3 (d_3)	6,2233	2,7929	0,2064	0,1959	<u>0,1540</u>
Global (D)	2,6677	1,7972	0,1294	0,1277	0,1233

onde, d_i , $i = 1, 2 \text{ e } 3$ – distância média da rodovia

A Tabela 13 mostra, que em alguns casos, assim como no experimento anterior, após o refinamento a distância média (d) de algumas rodovias ao invés de diminuir, aumenta (por exemplo, a rodovia 1). Pode-se perceber também que em alguns casos (por exemplo, as rodovias 1 e 2) a distância média (d) mínima é encontrada antes da convergência do processo, porém como já foi dito anteriormente a análise do processo sempre é feita em cima da distância média global (D) e nunca em cima das distâncias médias (d_i). A distância média global D é mínima após a 3ª iteração.

O Gráfico 7 mostra as discrepâncias dos vértices das rodovias em cada uma das iterações do processo de orientação.

Gráfico 7. Discrepâncias no Processo de Orientação.



O Gráfico 7 mostra que em alguns locais, após o refinamento, a discrepância aumenta ao invés de diminuir e que globalmente após o refinamento D diminui. Nota-se também que após 1ª iteração D cai bruscamente e mantendo nessa ordem até o fim do processo.

4.3.4.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação

Nesta avaliação, o trecho de rodovia utilizado (Figura 27) foi projetado do espaço objeto para o espaço imagem utilizando os parâmetros da DLT determinados na orientação. Os resultados obtidos no processo de avaliação da orientação são apresentados na Figura 31. Verifica-se que as rodovias, em quase todo o trecho, estão sobrepostas. Visualmente não é possível perceber uma separação entre elas.

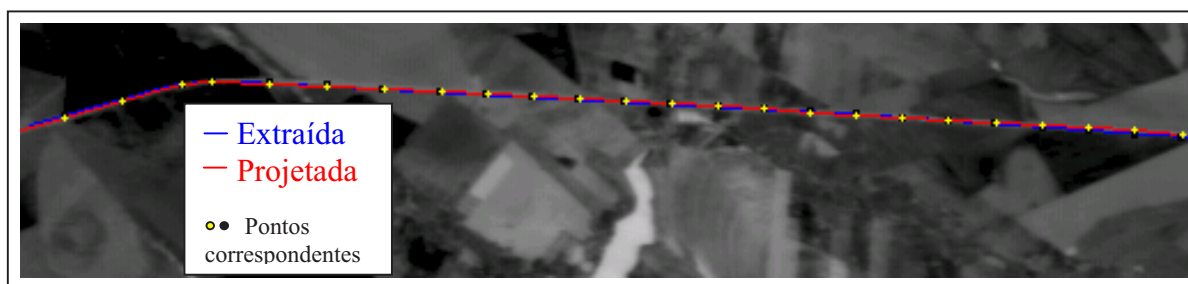


Figura 31 – Experimento 4: Avaliação Externa: Rodovia Controle 1.

A Tabela 14 mostra a distância média do trecho de rodovia utilizada na avaliação externa da orientação.

Tabela 14 – Experimento 4: avaliação externa da orientação.

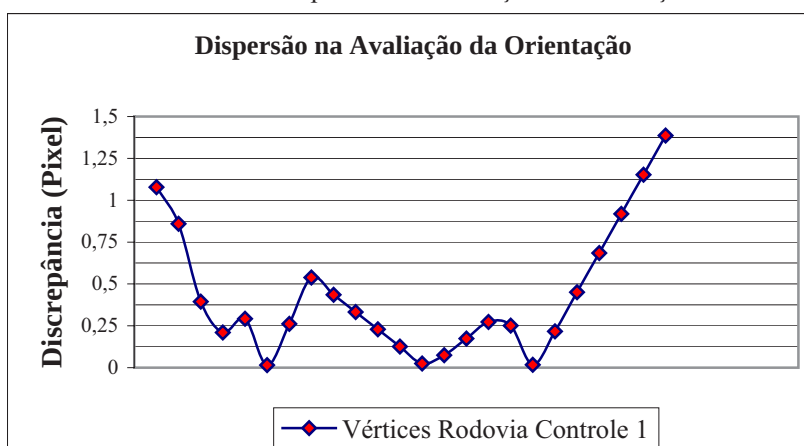
Avaliação	Distância
Controle 1 (d_1)	0,4330

onde, d_1 – distância média da rodovia

Através da Tabela 14, pode-se ver que nesta avaliação a distância média foi de 0,4330 pixels, resultado que confirma as conclusões obtidas visualmente. Portanto, o resultado obtido pode ser considerado satisfatório.

O Gráfico 8 mostra as discrepâncias dos vértices do trecho de rodovia utilizada na avaliação da orientação. Nota-se que em três casos as distâncias entre os vértices das rodovias extraídas e projetadas é zero, significando que ambas entidades se confundem naqueles locais. E a maior parte dos vértices possui uma discrepância abaixo de 0,5 pixel. As discrepâncias são maiores no primeiro e nos dois últimos vértices da rodovia, ficando acima de 1,0 pixel.

Gráfico 8. Discrepâncias na Avaliação da Orientação.



4.3.4.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias

A Tabela 15 mostra as distâncias médias entre as rodovias extraídas manualmente e as correspondentes extraídas através do método de extração por programação dinâmica. Conforme mostra a Tabela 15, a distância média global (D) é de 0,4867 pixels. Logo, tendo em vista que a largura média das rodovias é de 1,5 pixels, conclui-se que as rodovias, globalmente, foram extraídas novamente com uma qualidade muito boa para este caso, pois D é menor que 1/3 da largura das rodovias.

Tabela 15 – Experimento 4: avaliação da extração.

Avaliação	Distâncias
Rodovia 1 (d_1)	0,5431
Rodovia 2 (d_2)	0,5009
Rodovia 3 (d_3)	0,48829
Controle 1 (d_4)	0,3309
Global (D)	0,4867

onde, d_i , $i = 1, 2, \dots, 4$ – distância média da rodovia

4.3.5 Experimento – 5

Este experimento é diferente dos demais no senso de que não foi feito em recortes da imagem e sim na imagem inteira. Foram utilizadas oito rodovias no processo de orientação e outras três rodovias na avaliação externa do processo orientação. Foram também utilizados quatro pontos (em amarelo) para a orientação inicial da imagem via transformação afim (Figura 32). Vale ressaltar que é suficiente coletar estes pontos de forma aproximada ou grosseira.

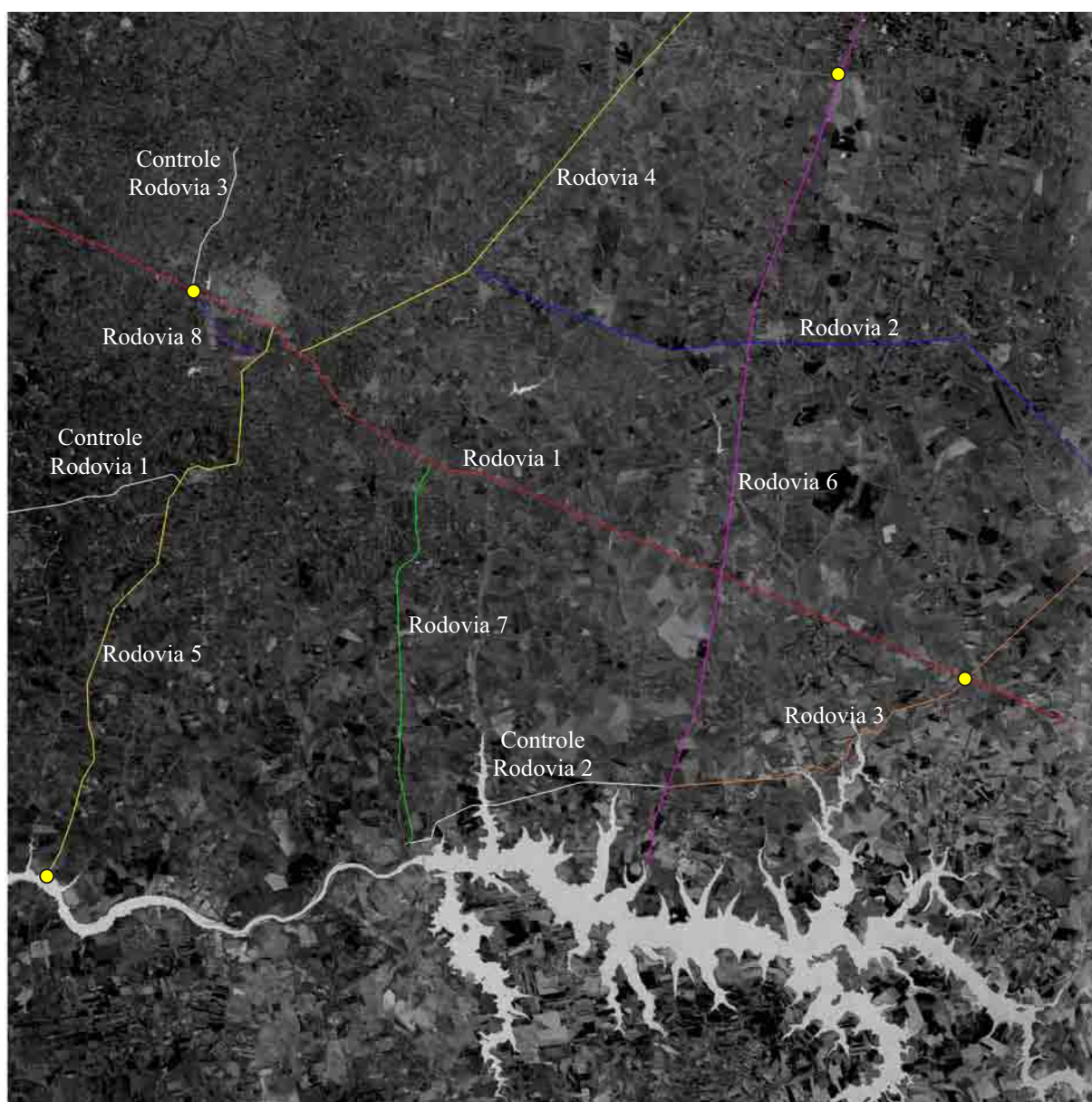


Figura 32 – Toda imagem e as rodovias utilizadas no processo de orientação e na avaliação.

4.3.5.1 Avaliação Interna do Processo de Orientação

As Figuras 33, 34 e 35 mostram algumas partes da imagem e alguns trechos de rodovias utilizados neste experimento. As rodovias extraídas estão representadas em azul, as projetadas em vermelho e o refinamento da projeção inicial em branco.

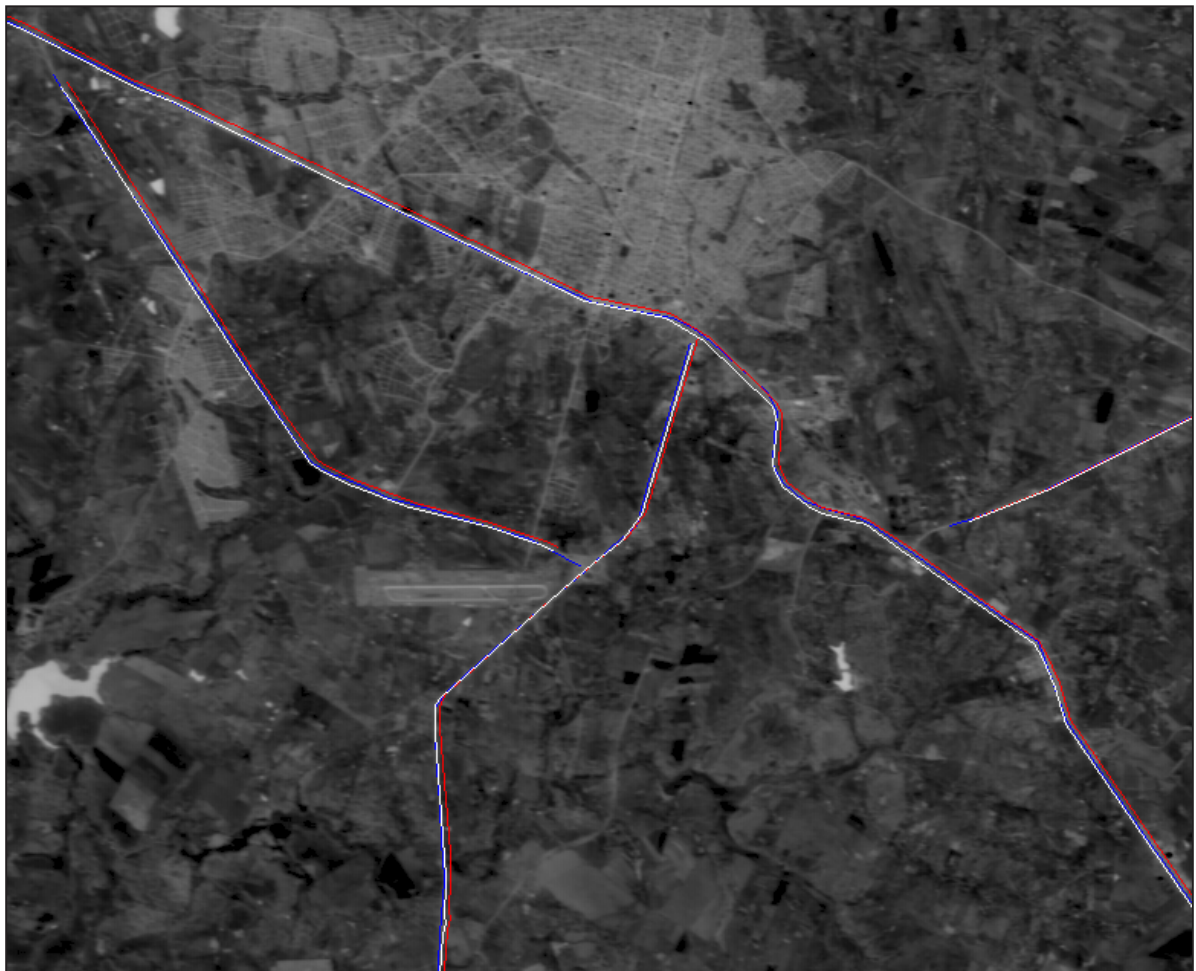


Figura 33 – Experimento 5: início do processo de orientação (recorte 1).



Figura 34 – Experimento 5: início do processo de orientação (recorte 2).



Figura 35 – Experimento 5: início do processo de orientação (recorte 3).

As Figuras 33, 34 e 35 mostram que, no início do processo e a exemplo do que se verificou nos experimentos anteriores, as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas em alguns lugares estão próximas, mas em outros lugares elas estão um pouco distantes. A aplicação do refinamento possibilitou em alguns lugares uma melhor coincidência entre as rodovias, mais em outros trechos ocorreu o contrário. Como já foi mencionado anteriormente, isso ocorre em alguns casos, pois o refinamento tem como objetivo, minimizar globalmente a distância entre as rodovias e não minimizar localmente essa distância. De fato, no início do processo a distância média global (D) é de 2,5577 pixels e após o refinamento, esse valor passa para 1,7782 pixels.

As Figuras 36, 37 e 38 mostram os resultados obtidos após a convergência do processo para algumas partes da imagem, onde as rodovias extraídas estão em azul e as correspondentes projetadas em vermelho.

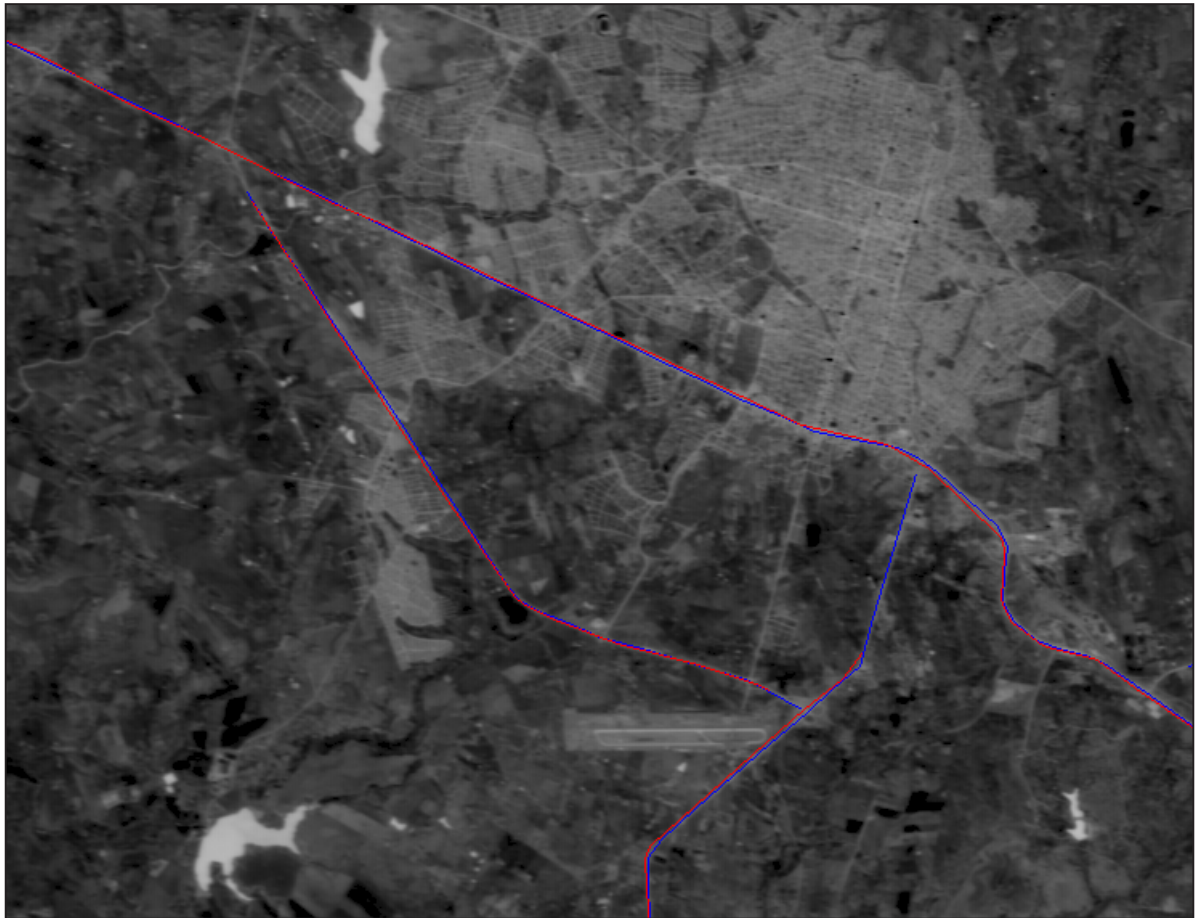


Figura 36 – Experimento 5: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação (recorte 1).



Figura 37 – Experimento 5: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação (recorte 2).

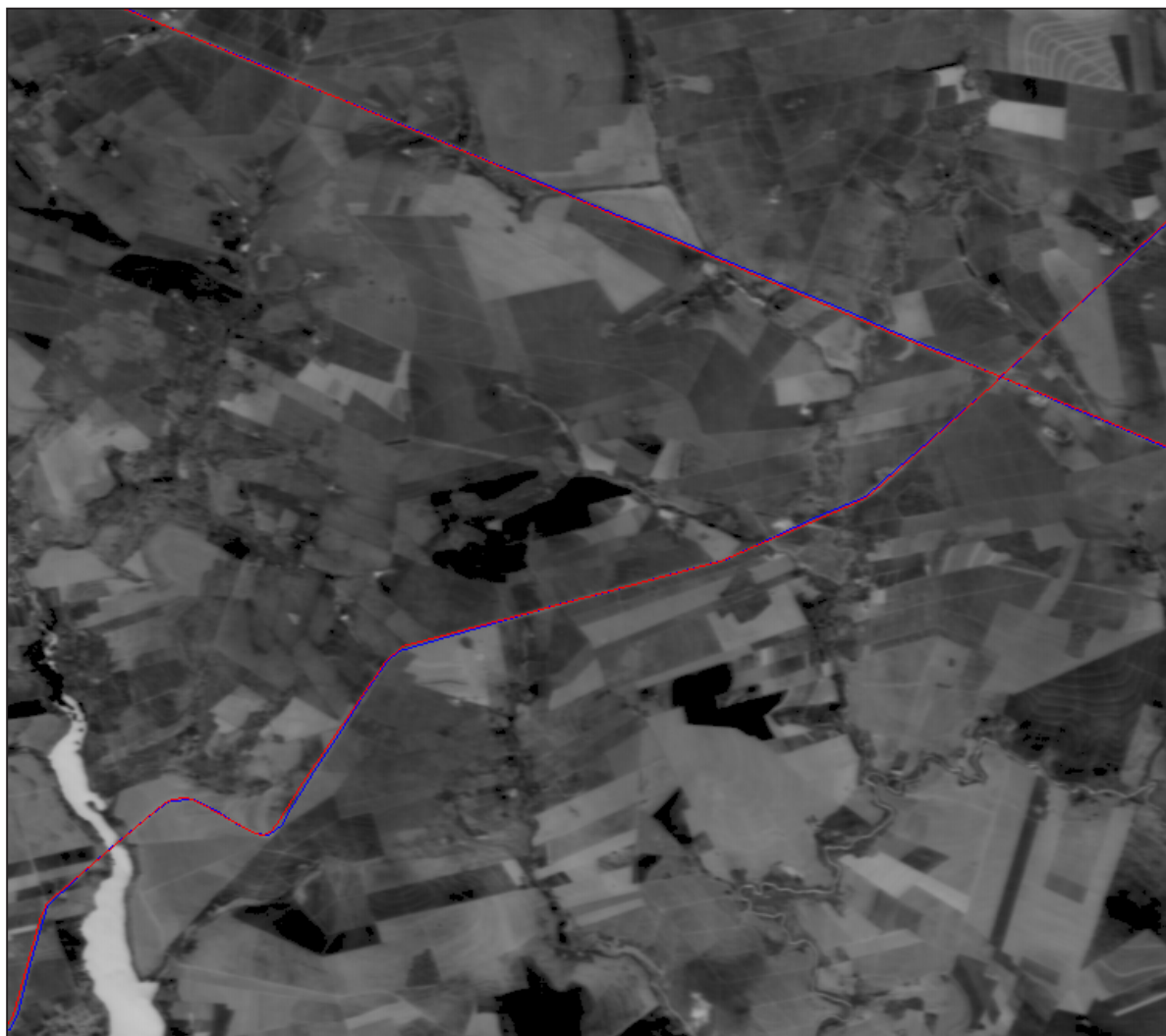


Figura 38 – Experimento 5: rodovias extraídas e as correspondentes projetadas após a convergência do processo de orientação (recorte 3).

Através da análise visual nas Figuras 36, 37 e 38 pode-se ver que as rodovias extraídas e suas correspondentes projetadas em boa parte dos trechos possuem um deslocamento muito pequeno entre si, ou estão sobrepostas ou quase sobrepostas, sendo que, em apenas alguns lugares é possível fazer uma separação visual das mesmas.

Ao final do processo de orientação, que converge na 6ª iteração, a distância média global (D) encontrada foi de 0,7739 pixels. Embora este resultado seja inferior a 1,0 pixel, ele é relativamente superior aos valores encontrados nos experimentos anteriores. Isto ocorreu porque neste experimento é utilizada toda imagem, em vez de recortes, que é o caso

dos experimentos anteriores. Isto é, quanto maior a imagem, mais difícil é o ajustamento global das malhas extraídas e projetadas, já que normalmente as distorções variam mais em diferentes regiões da imagem.

A Tabela 16 mostra a distância média de cada rodovia e a distância média global obtida em cada uma das iterações do processo de orientação.

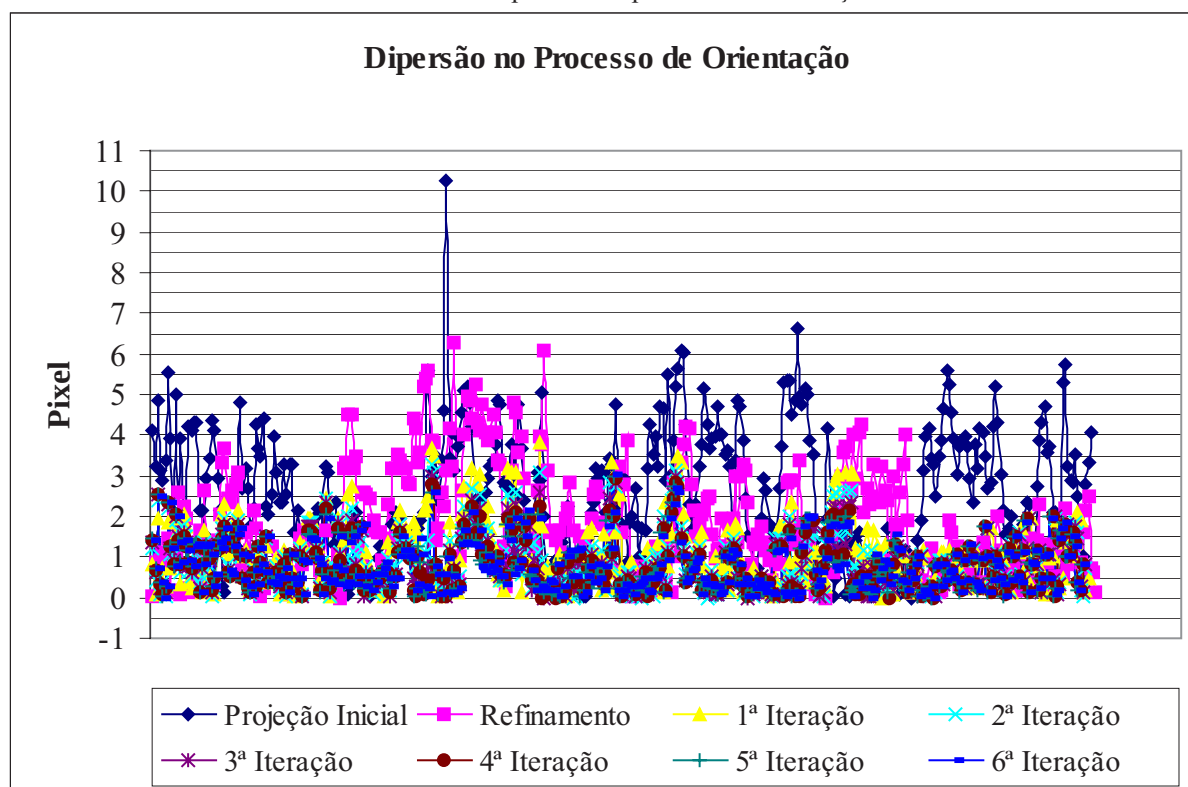
Tabela 16 – Experimento 5: distâncias médias no processo de orientação.

	Proj. Inicial	Refinamento	1ª Iteração	2ª Iteração	3ª Iteração	4ª Iteração	5ª Iteração	6ª Iteração
Rodovia 1	2,7131	1,1309	0,9798	0,9477	0,9369	0,9223	0,9082	0,8912
Rodovia 2	1,0408	2,9735	1,2948	0,8843	0,7551	0,7094	0,7123	0,7251
Rodovia 3	3,5013	3,2915	1,6851	1,3836	1,2083	1,1080	1,0125	0,9716
Rodovia 4	1,6512	1,6568	0,8278	0,5990	0,5419	0,5370	0,5453	0,5521
Rodovia 5	3,1901	1,5478	0,9504	0,7746	0,7328	0,7149	0,7071	0,7003
Rodovia 6	0,7824	2,6916	1,4818	1,1500	0,9338	0,8316	0,7923	0,7852
Rodovia 7	2,8024	0,7764	0,7126	0,6838	0,6751	0,6723	0,6709	0,6697
Rodovia 8	3,2345	1,2493	1,0459	0,9781	0,9691	0,9598	0,9558	0,9582
Global (D)	2,5577	1,7782	1,0753	0,9039	0,8352	0,8024	0,7827	0,7739

A Tabela 16 mostra novamente que, em alguns casos, após o refinamento, a distância média (d) de algumas rodovias ao invés de diminuir, aumenta, (por exemplo, as rodovias 2 e 6). Pode-se perceber também que em outros casos (por exemplo, as rodovias 2, 4 e 8) a distância média (d) mínima é encontrada antes da convergência do processo. Porém a análise do processo sempre é feita em cima da distância média global (D) e nunca em cima das distâncias médias (d_i).

O Gráfico 9 mostra a discrepâncias dos vértices das rodovias em cada uma das iterações do processo de orientação.

Gráfico 9. Discrepâncias no processo de orientação.



Pelo Gráfico 9, percebe-se que em alguns trechos após o refinamento a discrepância aumenta ao invés de diminuir. Pode-se notar também que após 1ª iteração a discrepância diminui, não bruscamente como nos experimentos anteriores, e vai diminuindo aos poucos até o fim do processo.

4.3.5.2 Avaliação Externa do Processo de Orientação

Nesta avaliação, os trechos de rodovia de verificação (Figura 32), foram projetados do espaço objeto para o espaço imagem utilizando os parâmetros da DLT obtidos após a convergência do processo de orientação. Os resultados obtidos no processo de avaliação da orientação são apresentados nas Figuras 39 e 40.

Na Figura 39 (a), é possível verificar que as rodovias em grande parte do percurso estão bem próximas e em um trecho elas estão totalmente sobrepostas. Na Figura 39

(b), percebe-se que as rodovias possuem uma separação um pouco maior que a verificada anteriormente, sendo que em um pequeno trecho elas possuem uma separação mais acentuada (Figura 39 (b₁)). Na Figura 39 (c), tem-se um deslocamento de magnitude um pouco maior que o deslocamento verificado na Figura 39 (b). Já na Figura 40, tem-se a comparação para a rodovia de controle 3. Nota-se que a separação entre as rodovias extraídas e projetadas é compatível à verificada com a rodovia de controle 1 (Figura 39 (a)). Apenas num pequeno trecho a separação é relativamente maior. De uma forma geral, os resultados obtidos com as rodovias de controle 1 e 3 são um pouco melhores que o obtido com a rodovia 2.

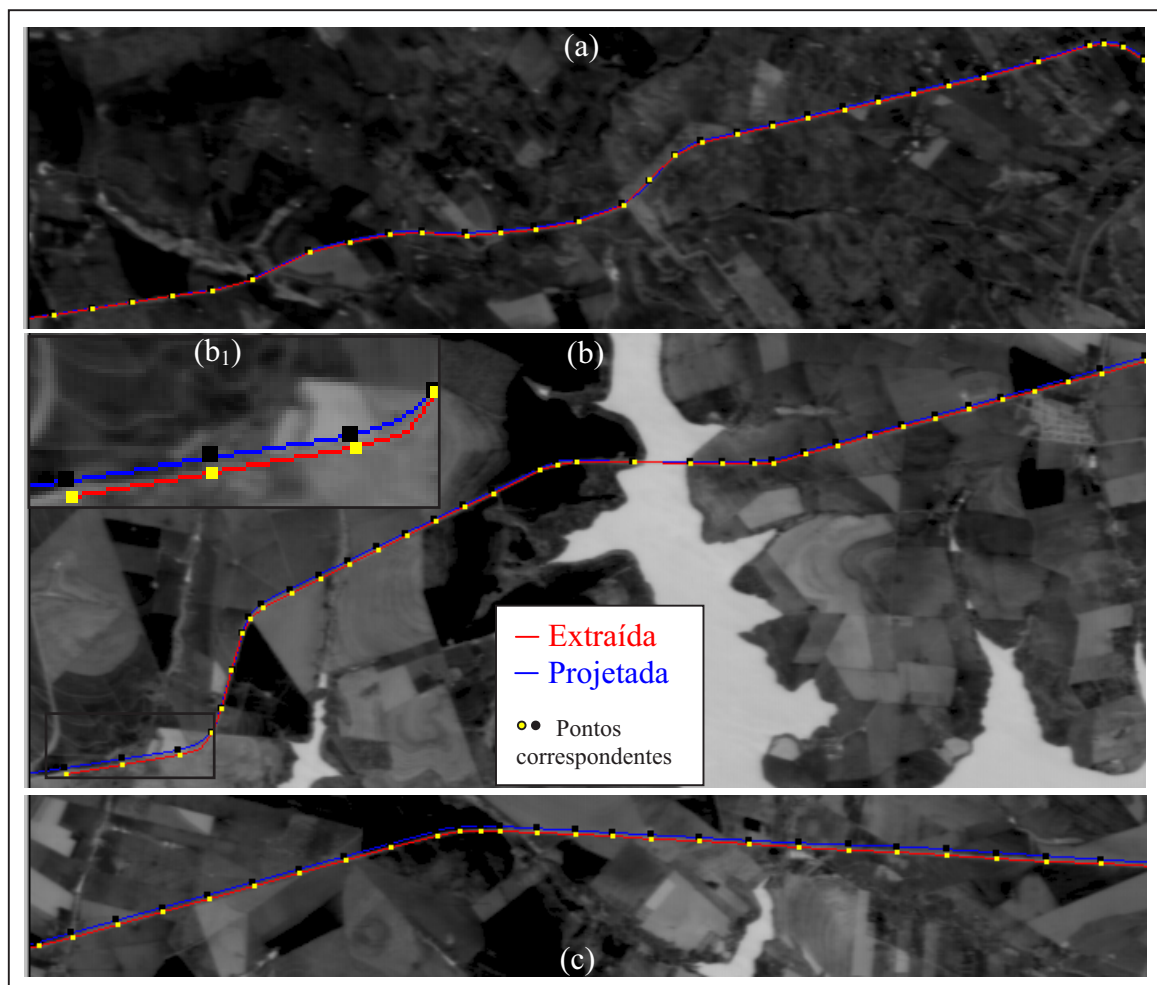


Figura 39 – Experimento 5: Avaliação Externa: (a) Controle 1; (b) Controle 2 Trecho 1; (b₁) Detalhe do Controle 2 Trecho 1 e (c) Controle 2 Trecho2.

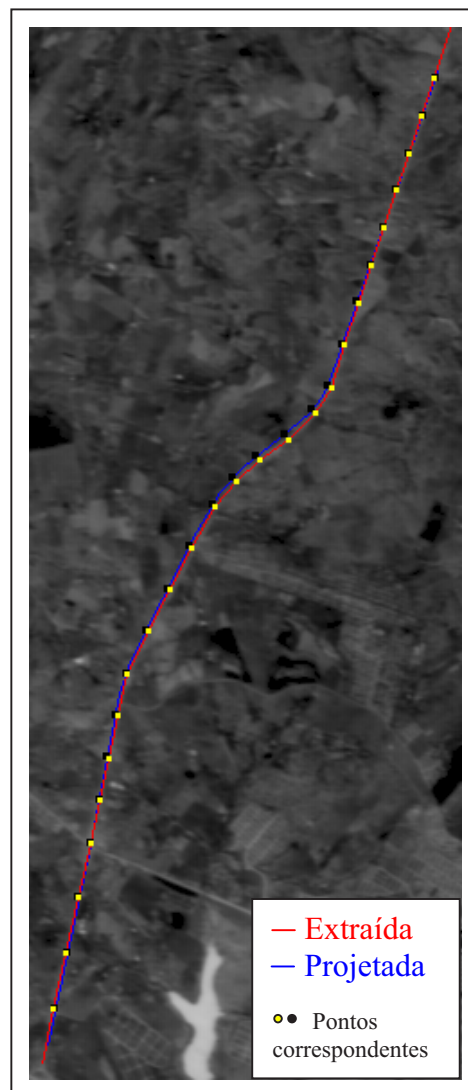


Figura 40 – Experimento 5: Avaliação Externa: Controle 3.

A Tabela 17 mostra a distância média de cada rodovia e a distância média global obtida na avaliação externa do processo de orientação.

Tabela 17 – Experimento 5: avaliação externa da orientação.

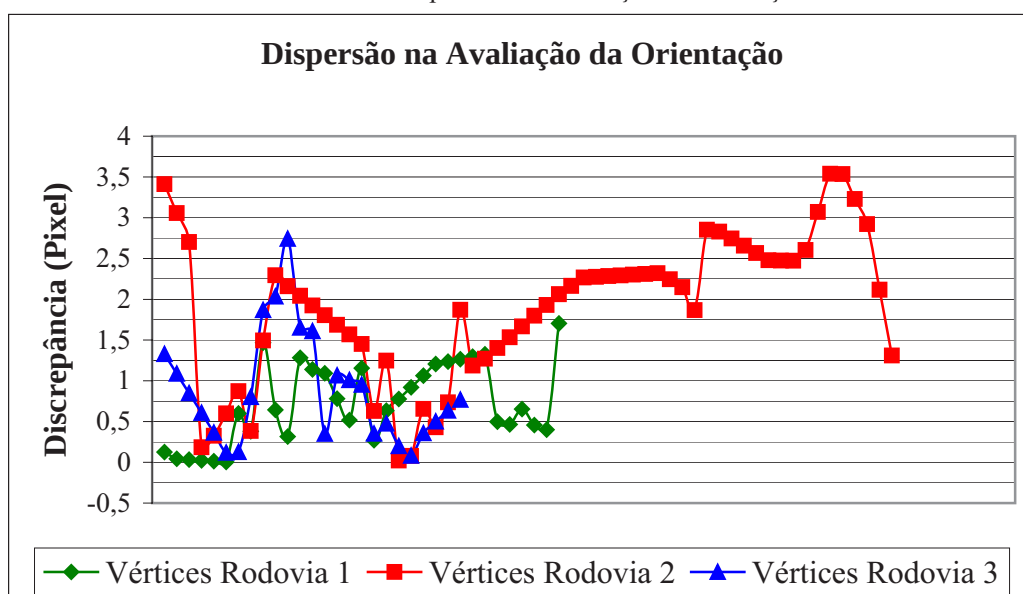
Avaliação	Distâncias
Controle 1 (d_1)	0,7212
Controle 2 (d_2)	1,9059
Controle 3 (d_3)	0,8767
Global (D)	1,3566

onde, d_i , $i = 1, 2 \text{ e } 3$ – distância média da rodovia

A Tabela 17 mostra que a rodovia controle 1 possui a menor distância média (0,7212 pixels), seguida pela rodovia controle 3 (0,8767 pixels) e, como já tinha sido previsto visualmente, a rodovia controle 2 é a que possui a maior distância média (1,9059 pixels). A distância média global (D) é de 1,3566 pixels. Este resultado mostra claramente a dificuldade maior de orientar toda imagem. A orientação por partes da imagem possibilitou a obtenção de um resultado consideravelmente melhor, visto que uma precisão ao nível do pixel foi obtida.

O Gráfico 10 mostra as discrepâncias dos vértices das rodovias na avaliação do processo de orientação.

Gráfico 10. Discrepâncias na Avaliação de orientação.



Verifica-se pelo Gráfico 10 que grande parte dos vértices pertencentes à rodovia 2 possuem uma discrepância acima de 2 pixels. Conseqüentemente, o erro nesta rodovia contribuiu significativamente com a discrepância global (D). A maioria dos vértices pertencentes as rodovias 1 e 3 possui uma discrepância abaixo de 1,5 pixels.

4.3.5.3 Avaliação do Processo de Extração das Rodovias

A Tabela 18 mostra a distância média entre as rodovias extraídas manualmente e das extraídas através do método de extração por programação dinâmica.

Tabela 18 – Experimento 5: avaliação da extração.

Avaliação	Distâncias
Rodovia 1 (d_1)	0,4433
Rodovia 2 (d_2)	0,4700
Rodovia 3 (d_3)	0,5009
Rodovia 4 (d_4)	0,3064
Rodovia 5 (d_5)	0,6285
Rodovia 6 (d_6)	0,5023
Rodovia 7 (d_7)	0,4790
Rodovia 8 (d_8)	0,5912
Controle 1 (d_9)	0,5495
Controle 2 (d_{10})	0,3497
Controle 3 (d_{11})	0,8363
Global (D)	0,4846

onde, d_i , $i = 1, 2, \dots, 11$ – distância média da rodovia

A distância média global (D), como pode ser vista na Tabela 18, é de 0,4846 pixels. Como em todos os casos anteriores, a precisão global das rodovias extraídas são de qualidade muito boa para este caso, pois D é da ordem de 1/3 da largura das rodovias.

4.4. Síntese

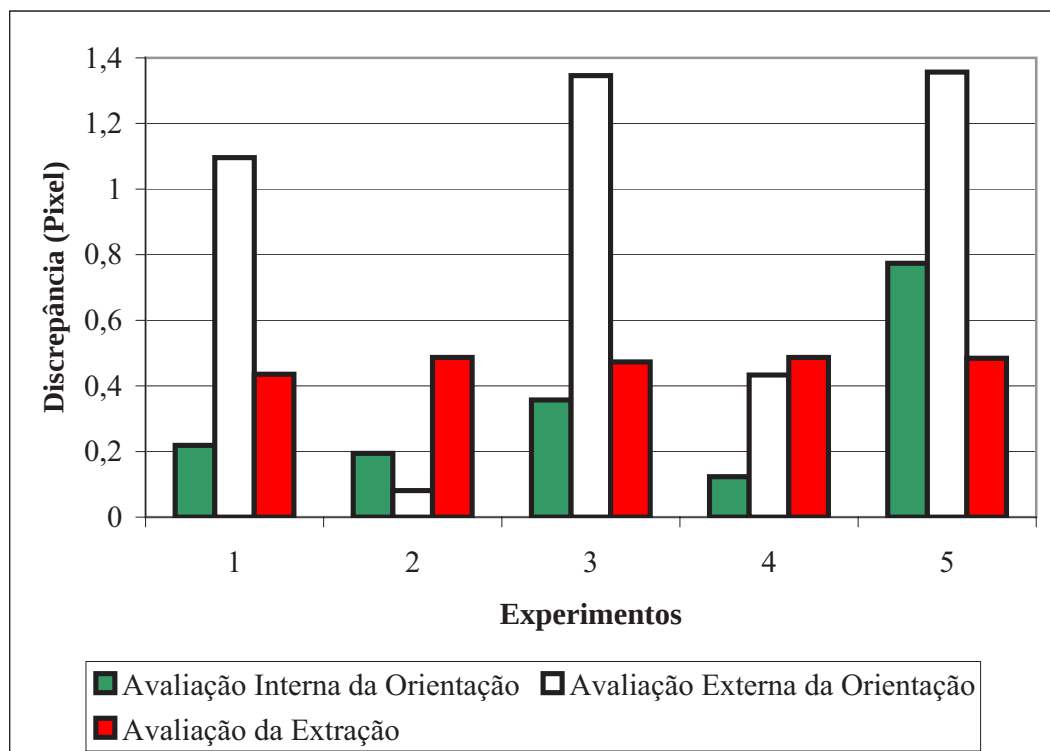
A seguir a Tabela 19 mostra um resumo da distância média global obtida nos processos de cada experimento.

Tabela 19 – Distâncias médias globais obtidas nos experimentos.

Experimentos	Distância Média Global (D)		
	Avaliação Interna	Avaliação Externa	Avaliação Extração
1	0,2190	1,0959	0,4355
2	0,1942	0,0809	0,4867
3	0,3570	1,3461	0,4418
4	0,1233	0,4330	0,4867
5	0,7739	1,3566	0,4846

O Gráfico 11 mostra as discrepâncias em cada experimento.

Gráfico 11. Discrepâncias nos experimentos.



5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Dois objetivos foram propostos para a presente pesquisa. O primeiro refere-se ao desenvolvimento e implementação de uma metodologia para orientação semi-automática de imagens CBERS usando a Transformação Linear Direta (DLT) e rodovias como controle de campo. O segundo envolve a avaliação experimental do método com dados reais.

Com relação ao primeiro objetivo, como visto no Capítulo 3, a orientação da imagem CBERS é realizada através de uma estratégia iterativa envolvendo três etapas básicas, isto é: 1 – extração semi-automática de rodovias; 2 – estabelecimento das correspondências pontuais entre as rodovias georreferenciadas e as correspondentes rodovias extraídas; e 3 – orientação da imagem. Referente a primeira etapa do método, foi visto que o algoritmo de programação dinâmica é utilizado para extrair as rodovias na imagem, onde o operador identifica na imagem as rodovias georreferenciadas que serão utilizadas como controle de campo e fornece alguns pontos sementes, distribuídos grosseira e esparsamente ao longo ou nas imediações das rodovias. Com relação a segunda etapa, ou seja, o estabelecimento da correspondência pontual entre as rodovias georreferenciadas e as correspondentes extraídas, a estratégia de estabelecimento de correspondência desenvolvida opera no espaço bidimensional. Assim as rodovias georreferenciadas, definidas por seqüências de vértices tridimensionais, necessitam ser transformadas para o referencial da imagem. Para possibilitar esta transformação no início do processo, a imagem é orientada aproximadamente através da Transformação Afim (2D). As correspondências pontuais são obtidas através da projeção ortogonal dos vértices das rodovias georreferenciadas projetadas nas correspondentes rodovias extraídas na imagem. Essa estratégia de correspondência não fornece bons

resultados, principalmente, no início do processo de orientação devido ao posicionamento aproximado das rodovias georreferenciadas projetadas. Esse problema é contornado através da definição de um espaço 3D discreto de busca, envolvendo duas translações e uma rotação em suas dimensões. Esse espaço de busca é utilizado para controlar o deslizamento das rodovias georreferenciadas projetadas sobre as rodovias extraídas, sendo que para cada posição de deslizamento são calculadas as correspondências pontuais e a distância euclidiana média (D_{em}) entre os pontos correspondentes. As correspondências aceitas, entre as rodovias georreferenciadas projetadas e as correspondentes extraídas na imagem, são tais que o valor de D_{em} seja mínimo. Esses resultados permitem obter de imediato as correspondências pontuais entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias georreferenciadas. Na terceira e última etapa do método as correspondências pontuais são utilizadas para orientar a imagem usando a Transformação Linear Direta (DLT). As duas últimas etapas do método são iteradas até que se verifique a estabilização do processo de orientação.

No que diz respeito ao segundo objetivo, cinco experimentos foram conduzidos a partir de uma imagem CBERS, de dados planimétrico das rodovias e de dados de altimetria.

Tendo por base as interpretações dos resultados do Capítulo 4 e da Tabela 19 e do Gráfico 11, as principais conclusões são:

- A discrepância global interna é geralmente bem menor que a externa, mostrando que o método proposto possibilitou a melhora da geometria interna da imagem na região controlada pelas rodovias.
- A discrepância da extração é maior que a discrepância interna da orientação. Isso mostra que o maior valor para a discrepância da extração vem principalmente da dificuldade do operador em apontar

para o centro de rodovias com largura média de 1,5 pixels (imagens de baixa resolução espacial).

- O processo de extração via algoritmo de programação dinâmica se mostrou bastante acurado, visto que a discrepância média para todas as rodovias foi da ordem de 0,5 pixel.
- Os resultados obtidos para os recortes da imagem são bem melhores que o resultado obtido para toda a imagem, o que é decorrente do modelo matemático utilizado no refinamento da correspondência (2 translações e 1 rotação) e do modelo matemático utilizado na modelagem da geometria da imagem (DLT). Em outras palavras, estes modelos matemáticos permitem uma melhor modelagem de recortes menores da imagem.

Com base, principalmente, nas conclusões acima, algumas conclusões mais gerais podem ser apresentadas, quais sejam:

- o Na etapa de extração das rodovias, verificou-se que, no geral, os eixos de rodovia extraídos encontram-se compatíveis com os eixos de rodovia de referência, sendo que a precisão da extração foi aproximadamente de 1/3 da largura da rodovia, mostrando que o método obteve um bom resultado na extração semi-automática de rodovias através do algoritmo de programação dinâmica.
- o Na avaliação interna do processo de orientação, os experimentos com os recortes da imagem obtiveram resultados melhores que o resultado do experimento com a imagem inteira. Isso é devido aos modelos matemáticos utilizados na orientação da imagem, os quais fazem um ajuste melhor para regiões menores.

As principais vantagens da metodologia desenvolvida são:

1. a dependência do operador é apenas em tarefas de alto nível, como o reconhecimento das rodovias e o fornecimento de poucos pontos de forma aproximada;
2. é possível a determinação numérica de uma grande quantidade de pontos de apoio, muito além do que é normalmente possível através da identificação visual de pontos de apoio na imagem.

Os resultados experimentais obtidos permitiram uma avaliação global bastante positiva da metodologia.

5.2 Recomendações

Outros trabalhos poderão dar continuidade à presente pesquisa de forma a aperfeiçoar os métodos utilizados. Alguns aperfeiçoamentos seriam:

- utilizar modelos matemáticos mais rigorosos para realizar o refinamento da correspondência;
- utilizar modelos matemáticos mais rigorosos para modelagem da geometria da imagem;
- utilizar técnicas de multiresolução no refinamento da correspondência para reduzir gradativamente o espaço de busca;
- investigar possibilidades de automação completa da metodologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. *Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry*. Proceedings of the AUI/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, 1-18, 1971.
- BARAKAT, H. F.; EMAM, H. A.; ABDEL-WAHAB, M. S. *Assessment of a Developed Combined Point/Line-Based Projective Equations*. In: ISPRS 2004: proceedings of the XXth ISPRS congress: Geo-imagery bridging continents, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. Comm. III, pp. 184-190.
- BOCCARDO, P.; MONDINO, E. B.; TONOLO, F. G.; LÍNGUA, A. *Orthorectification of High Resolution Satellite Images*. In: ISPRS 2004: proceedings of the XXth ISPRS congress: Geo-imagery bridging continents, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. Comm. I, pp. 30-36.
- DAL POZ, A. P. *Auto-Calibração de Câmeras Não-Métricas: Uma Abordagem Teórica*. In: Anais do 14º Congresso Brasileiro de Cartografia, Gramado-RS, pp. 37-43, 1989.
- DAL POZ, A. P. *Aplicação do Filtro de Kalman na Correção Geométrica de Imagens HRV-SPOT no Nível 2B*. Seminário – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, UFPR, 1991.
- DAL POZ, A. P. *Processo Automático para Reconhecer e Extrair Rodovias Georreferenciadas de uma Fotografia Aérea Digitalizada*. Relatório de Pesquisa de Pós-Doutorado, Department of Spatial Information Science and Engineering, University of Maine, Orono-Maine, EUA, pp.225, 2000.
- DAL POZ, A. P. *Modelos e Estratégias para a Extração da Malha Viária em Imagens Digitais*. Capítulo do Livro "Séries em Geodésia", Ed. UFPR, 2001.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. *Um Algoritmo de Otimização Global para a Extração de Rodovias de Imagens Digitais*. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- DOWMAN, I.; TAO, V. *An Update on the use of Rational Functions for Photogrammetric Restitution*. ISPRS Highlights, 2002, p. 22-29.
- DOWMAN, I. J.; MICHALIS, P. *Generic Rigorous Model for along Track Stereo Satellite Sensors*. ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, 2003, Hannover, 4-6 October (on CDROM.).
- EL-MANADILI, Y.; NOVAK, K. *Precision Rectification of SPOT Imagery using the Direct Linear Transformation Model*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 62, pp. 67-72, 1996.
- FERREIRA, L. F.; CINTRA, J. P. *Quantificação de Discrepância entre Feições Lineares por Retângulos Equivalentes*. Revista Brasileira de Cartografia, (51): 1-8, 1999.
- FRITSCH, D.; STALLMANN, D. *Rigorous Photogrammetric Modelling Processing of High-Resolution Satellite Imagery*. IAPRS, Vol.33, Part B1, Amsterdam, 2000, pp.313-321.

GALO, M.; DAL POZ, A. P.; FERREIRA, F. M. *O Uso de Feições no Controle de Qualidade em Cartografia*. In: XIX Congresso Brasileiro de Cartografia. Porto Alegre, 2001.

GEMAEL, C. *Introdução ao Ajustamento das Observações*. Editora UFPR, Curitiba, 1994.

GONÇALVES, J.; DOWMAN, I. *Precise Orientation of SPOT Panchromatic Images with Tie Points to a SAR Image*. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34 (3A) p. 125-130, 2002.

GRODECKI, J.; DIAL, G. *IKONOS Geometric Accuracy*. ISPR Joint Workshop "High Resolution Mapping from Space". Hannover, Germany, 2001.

HABIB, A.; MORAN, M.; KIM, E. M.; CHENG, R. *Linear Features in Photogrammetric Activities*. In: ISPRS 2004: proceeding of the XXth ISPRS congress: Geo-imagery bridging continents, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. Comm. II, pp. 170-176.

HANLEY, H.B.; FRASER, C.S. *Geopositioning Accuracy of IKONOS Imagery: Indications from 2D Transformations*. Photogrammetric Record, 17(98), 2001, 317-329.

HATTORI, S.; ONO, T.; FRASER, C.S.; HASEGAWA, H. *Orientation of High-Resolution Satellite Images based on Affine Projection*. IAPRS, Vol. 33, Part 1, Amsterdam, 2000, pp. 359-366.

KARARA, H. M. *Non-Topographic Photogrammetry*. Falls Church, Virginia, USA, 445p., 1989.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Imagem CBERS*. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 05 de janeiro de 2006.

LI, H. *Semi-Automatic Road Extraction from Satellite and Aerial Images*. PhD thesis, Report No. 61, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland, 161p., 1997.

LUGNANI, J.B. *Estimativa de Qualidade de Feições Digitalizadas – Um Novo Método*. Revista Brasileira de Cartografia, (39): 26-29, 1986.

LUGNANI, J. B. *Introdução à Fototriangulação*. Curitiba: [s.n.], 1987, 134p.

MAIA, J. L. *Metodologia para Avaliação de Rodovias Extraídas Computacionalmente em Imagens Digitais*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2003.

MIKHAIL, E; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 479 p.

MITISHITA, E. A. *Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D, para fins de Mapeamento na Área Florestal*. Curitiba. 253p. Tese de doutorado em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1997.

MITISHITA, E. A.; SARAIVA, C. S. *Modelos Matemáticos para fins de Monorestituição de Imagens de Alta Resolução IKONOS 2 – GEO*. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, p.278-286, 2002.

OKAMOTO, A.; FRASER, C.; HATTORI, S.; HASEGAWA, S.; ONO, T. *An Alternative Approach to the Triangulation of SPOT Imagery*. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, pp. 457-462, 1998.

OKAMOTO, A.; ONO, T.; AKAMATSU, S.; FRASER, C.; HATTORI, S.; HASEGAWA, S. *Geometric Characteristics of Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery*. In: 1999 Annual Conference, 1999, CD-ROM.

OLIVEIRA, R.M.S. *Reconstrução da Malha Viária Fragmentada usando SNAKES*. Relatório de Qualificação apresentado à Seção de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, nível de Mestrado FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2002.

ORUN, A. B.; NATARAJAN, K. *A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, pp. 1431-1437.

POLI, D. *Orientation of Satellite and Airborne Imagery from Multi-Line Pushbroom Sensors with a Rigorous Sensor Model*. In: ISPRS 2004: proceedings of the XXth ISPRS congress: Geo-imagery bridging continents, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. Comm. I, pp. 130-136.

SADEGHIAN, S.; DELVAR, M. R. *An Investigation of Geometric Correction and Uncertainty Assessment of High Resolution Images*. Second International Symposium on Spatial Data Quality. March, Hong Kong, The Hong Kong Polytechnic University, pp. 89-99. 2003.

SILVA, M. A. O. *Verificação Automática da Malha Viária Georreferenciada em Imagens Digitais*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2005.

TAO, C. V.; HU, Y.; MERCER, J. B.; SCHNICK, S.; ZHANG, Y. *Image Rectification using a Generic Sensor Model - Rational Function Model*. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, pp. 874-881, 2000.

TAO, C. V.; HU, Y. *3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(7): 705-714, 2002.

TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M. *Modernas Tecnologias de Aquisição de Imagens em Fotogrametria*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 6, n. 1, p. 49-64, 2000.

TOUTIN, T. *Error Tracking in IKONOS Geometric Processing using a 3D Parametric Modelling*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 68, 8 pages, in press, 2002.

VALADAN, Z. M. J.; SADEGHIAN, S. *Rigorous and Non-Rigorous Photogrammetric Processing of IKONOS Geo Image*. Join Workshop of ISPRS WG I/2, I/5, IC WG II/IV, High Resolution Mapping from Space. 6-8 October, Hannover, Germany, 2003.

VALE, G. M. *Extração Semi-Automática do Eixo de Rodovia em Imagens de Média e Alta Resolução Usando Programação Dinâmica*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT-UNESP, Presidente Prudente, 2003.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. *Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS*. 3.ed., Boston: McGraw-Hill, 2000. 608 p.

YANG, X. *Accuracy of Rational Function Approximation in Photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Annual Conference Proceeding, 2000.

ZOEJ, M. J. V.; PETRIE, G. *Mathematical Modelling and Accuracy Testing of SPOT Level-1B Stereo-Pairs*, Photogrammetric Record, 16 (91), p. 67-82, 1998.