

RODRIGO BEZERRA DE ARAÚJO GALLIS

EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DA MALHA
VIÁRIA EM IMAGENS AÉREAS DIGITAIS DE
ÁREAS RURAIS UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR
PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NO ESPAÇO
OBJETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente da UNESP, para a obtenção do título de Doutor em Ciências (Área de concentração: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais).

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Custódio da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

Presidente Prudente
2006

À Deus por tudo o que me proporcionou

Aos meus pais, Carlos e Fátima

À minha irmã, Ana (Cacá)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela educação, amor, conselhos e carinho. Nos momentos mais difíceis era com eles que buscava apoio e segurança. À minha irmã Ana Carolina, pela companheira que sempre foi.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. João Fernando Custódio da Silva e Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, pelo permanente incentivo nas horas em que desanimava. Professor Aluir, obrigado pela confiança em mim depositada e depois desses quatro anos de convívio, além dos conhecimentos adquiridos nessa jornada, levo como exemplos à integridade e a competência que o senhor possui e procurou transmitir.

Professor João Fernando, não tenho como agradecer-lo por tudo que fez por mim durante esses sete anos e meio em que trabalhamos juntos. Sei que em alguns momentos deveria ter me dedicado mais. Mas no final, o que conta é a amizade, o carinho e o grande respeito que tenho pelo senhor. Enfim, faltam palavras, mas sobra gratidão. Obrigado.

Aos professores do programa de pós-graduação em Ciências Cartográficas e do departamento de Cartografia. Ao Professor Otávio (Tavico), péssimo pescador, grande companheiro. Ao Professor Messias Meneguette, pela simplicidade e amizade.

Ao meu grande amigo Ricardo Luis Barbosa, pelos conselhos, pelo companheirismo, pela estima, pela humildade e pelas horas em que deixava de fazer suas atividades para me ajudar com meu trabalho. Aos amigos Giovane Maia do Vale e Marco Aurélio de Oliveira pela ajuda, opiniões e cessão de dados e algoritmos utilizados neste trabalho.

A todos os amigos feitos durante essa jornada e que estiveram presentes nos momentos importantes de minha vida. A Capes pelo financiamento da pesquisa através da bolsa de doutorado.

*“Quem já passou por esta vida e não viveu
Pode ser mais, mas sabe menos do que eu
Porque a vida só se dá pra quem se deu
Pra quem amou, pra quem chorou,
pra quem sofreu.”*

Vinicius de Moraes

RESUMO

Este trabalho propõe uma nova metodologia para extração de rodovias utilizando imagens aéreas digitais. A inovação baseia-se no algoritmo de Programação dinâmica (PD), que nesta metodologia realiza o processo de otimização no espaço objeto, e não no espaço imagem como as metodologias tradicionais de extração de rodovias por PD. A feição rodovia é extraída no espaço objeto, o qual implica um rigoroso modelo matemático, que é necessário para estabelecer os pontos entre o espaço imagem e objeto. Necessita-se que o operador forneça alguns pontos sementes no espaço imagem para descrever grosseiramente a rodovia, e estes pontos devem ser transformados para o espaço objeto para inicialização do processo de otimização por PD. Esta metodologia pode operar em diferentes modos (modo mono e estéreo), e com diversos tipos de imagens, incluindo imagens multisensores. Este trabalho apresenta detalhes da metodologia mono e estéreo e também os experimentos realizados e os resultados obtidos.

Palavras-chave: Programação dinâmica, modelo de rodovia, extração de feições, extração de rodovias, imagens aéreas.

ABSTRACT

This work proposes a novel road extraction methodology from digital images. The innovation is based on the dynamic programming (DP) algorithm to carry out the optimisation process in the object space, instead of doing it in the image space such as the DP traditional methodologies. Road features are traced in the object space, which implies that a rigorous mathematical model is necessary to be established between image and object space points. It is required that the operator measures a few seed points in the image space to describe sparsely and coarsely the roads, which must be transformed into the object space to make possible the initialisation of the DP optimisation process. Although the methodology can operate in different modes (mono-plotting or stereo-plotting), and with several image types, including multisensor images, this work presents details of our single and stereo image methodology, along with the experimental results.

Keywords: Dynamic Programming, road model, feature extraction, road extraction, aerial images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Problema Clássico de Programação Dinâmica (Adaptado de DAL POZ; VALE, 2004)	28
Figura 2 - Representação dos custos máximos $f_1(e_2)$	35
Figura 3 - Representação dos custos parciais $g_2(e_2, e_3)$	35
Figura 4 – Feição rodovia presente em uma imagem pancromática (Adaptada de Dal Poz, 2001)	38
Figura 5 – Segmento de eixo de rodovia (Fonte: Vale e Dal Poz, 2003)	43
Figura 6 – Esquema para dois pontos de bordas anti-paralelas: (a) direção dos vetores gradiente; e (b) magnitude dos vetores gradiente (Fonte: Vale e Dal Poz, 2003)	44
Figura 7 – Determinação do triângulo contendo o ponto (Fonte: Adaptado de Barbosa et al.,2003)	50
Figura 8 – Princípio geral do método	55
Figura 9 – Esquema da inserção e retirada dinâmica de vértices	57
Figura 10 – Curva de reflectância espectral para asfalto e outras coberturas terrestres	58
Figura 11 – Fluxograma com as fases de extração da metodologia proposta	59
Figura 12 – Extração da rodovia no espaço objeto (caso de uma única imagem)	66
Figura 13 – Extração da rodovia no espaço objeto (caso para duas ou mais imagens)	70
Figura 14 – Imagem aérea utilizada nos experimentos	74
Figura 15 – MDT utilizado	74
Figura 16 – Programas e rotinas desenvolvidas	76
Figura 17 – Visualização do eixo extraído na imagem	79
Figura 18 – Exemplos de pontos favoráveis e desfavoráveis à utilização da metodologia de extração de rodovias	81
Figura 19 – Imagens utilizadas	84
Figura 20 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)	85
Figura 21 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)	85
Figura 22 – Visualização do eixo extraído e do eixo de referência na imagem	86
Figura 23 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)	87
Figura 24 – Perfil da rodovia no caso mono	87
Figura 25 – Perfil da rodovia no caso estéreo	88
Figura 26 – Comparação entre perfis mono e estéreo	88
Figura 27 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo	89
Figura 28 – Problemas encontradas na extração do eixo	89
Figura 29 – Imagens utilizadas no teste 2	90
Figura 30 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)	91

Figura 31 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)	92
Figura 32 – Perfil da rodovia no caso mono	93
Figura 33 – Perfil da rodovia no caso estéreo	93
Figura 34 – Comparação entre perfis mono e estéreo	94
Figura 35 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo	94
Figura 36 – Problemas encontradas na extração do eixo	95
Figura 37 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)	96
Figura 38 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)	97
Figura 39 – Perfil da rodovia no caso mono	97
Figura 40 – Perfil da rodovia no caso estéreo	98
Figura 41 – Comparação entre perfis mono e estéreo	98
Figura 42 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo	99
Figura 43 – Problemas encontradas na extração do eixo	99
Figura 44 – Imagens utilizadas no experimento 4	100
Figura 45 – Visualização do eixo extraído na imagem	101
Figura 46 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)	101
Figura 47 – Perfil da rodovia no caso mono	102
Figura 48 – Perfil da rodovia no caso estéreo	102
Figura 49 – Comparação entre perfis mono e estéreo	102
Figura 50 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo	103
Figura 51 – Visualização tridimensional das imagens	104
Figura 52 – Visualização do mapa digital da malha viária	105
Figura 53 – Visualização do eixo extraído e do eixo de referencia	106
Figura 54 – Visualização do mapa digital da malha viária com destaque para rodovia utilizada no experimento	107
Figura 55 – Visualização do eixo extraído e do eixo de referencia	108
Figura 56 – Discrepância média das extrações realizadas nos testes mono e estéreo	109
Figura 57 – Diferença entre as discrepâncias médias mono e estéreo	110
Figura 58 – Eixos extraídos mesmo com obstruções presentes nas cenas	111
Figura 59 – Eixos extraídos por programação dinâmica	112

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Solução do problema da viagem usando enumeração exaustiva	32
Tabela 2 - Solução do problema da viagem usando Programação Dinâmica	33
Tabela 3 - Tabela da matriz de custos parciais	34
Tabela 4 - Tabela da matriz de custos máximos $f_1(e_2)$	35
Tabela 5 - Tabela da matriz de custos parciais $\rightarrow g_2(e_2, e_3)$	35
Tabela 6 - Tabela da matriz de custos acumulados $\rightarrow f_1(e_2) + g_2(e_2, e_3)$	36
Tabela 7 - Tabela da matriz de custos máximos	36
Tabela 8 - Última tabela da matriz de custos máximos	36
Tabela 9 - Caminho Inverso com a superposição de 1 nó	37
Tabela 10 - Tabela com as características das imagens utilizadas nos experimentos	73
Tabela 11 - Características dos modelos digitais de terreno utilizados	73
Tabela 12 - Classificação das rodovias existentes nas imagens	82
Tabela 13 - Classificação da extração do eixo através da análise visual	83

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Considerações iniciais	14
1.2 Justificativa do Trabalho	20
1.3 Objetivos	21
1.4 Estrutura do trabalho	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Programação Dinâmica	23
2.2 Elementos de Programação Dinâmica	24
2.3 Algoritmo de Programação Dinâmica	26
2.3.1 Princípios do Algoritmo de Programação Dinâmica	27
2.4 Modelo genérico de rodovias para imagens de baixa resolução	37
2.5 Modelo genérico de rodovias para imagens de média e alta resolução	42
2.6 Interpolação em um modelo digital do terreno utilizando <i>thin plate splines</i>	48
2.7 Thin Plate Spline	50
3 METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS EM IMAGENS DIGITAIS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO DINÂMICA COM OTIMIZAÇÃO NO ESPAÇO OBJETO	53
3.1 Introdução	53
3.2 Metodologia existente para extração de rodovias usando Programação Dinâmica	53
3.2.1 Estratégia para extração de rodovias usando programação dinâmica	54
3.3 Proposta Metodológica	57
3.4 Modelo para extração 3D	62
3.5 Modelo de rodovia para extração utilizando uma única imagem	63
3.5.1 Inserção e eliminação de vértices da linha poligonal representando a rodovia	66
3.6 Modelo para extração de multiplas imagens	67
4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 Considerações Iniciais	71
4.2 Ambiente computacional	72
4.3 Dados utilizados nos experimentos	72
4.4 Programas desenvolvidos na metodologia de extração de rodovias	75
4.4.1 Coleta de coordenadas nas imagens	77

4.4.2	Transformação das coordenadas de pixel para milímetro	77
4.4.3	Correções dos erros sistemáticos	77
4.4.4	Transformação de referencial	78
4.4.5	Interseção Fotogramétrica	78
4.4.6	Programação Dinâmica	79
4.4.7	Transformação de coordenadas do espaço objeto para imagem bruta	79
4.5	Experimentos realizados e análise dos resultados obtidos	80
4.5.1	Experimento 1	84
4.5.2	Experimento 2	90
4.5.3	Experimento 3	95
4.5.4	Experimento 4	100
4.6	Visualização Tridimensional	103
4.7	Testes utilizando uma malha viária digitalizada como dado de entrada	105
4.8	Discussão dos resultados	109
5	CONCLUSÕES.....	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
	APÊNDICES.....	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As imagens aéreas e orbitais são fontes principais para extração de objetos topográficos como rodovias ou edificações para atualização de bases cartográficas e Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Nestes sistemas, as rodovias são de grande importância para aplicações como sistemas de guias para polícia, bombeiros e atendimentos emergenciais. Informações cartográficas atualizadas e acuradas a respeito da malha viária são um importante recurso para diversas áreas de atuação como roteamento e análise ambiental, sendo de crucial importância para gerenciamento, planejamento e tomada de decisões.

A aquisição de dados para mapeamento e SIG utilizando técnicas fotogramétricas é tradicionalmente realizada através de extração manual das feições cartográficas em imagens aéreas de escalas que variam de 1:3000 a 1:90000 (SOWMYA; TRINDER, 2000). Mas, apesar de eficiente, a extração manual de rodovias, por exemplo, consome muito tempo, por isso a comunidade científica das áreas de Fotogrametria Digital e Visão Computacional tem investido, há mais de duas décadas, grandes esforços na busca por métodos de extração automática e semi-automática de objetos utilizando imagens aéreas (DAL POZ, 2002).

O processo de extração tem como finalidade isolar feições para a interpretação e classificação, determinando sua distribuição espacial. Os processos automatizados de extração de feições são valiosos em separar feições construídas pelo homem (*man-made features*), tais como rodovias e construções. Pesquisas na área de extração automática de rodovia iniciaram na época que as imagens de satélite tornaram-se disponíveis no formato digital, isto é, no início da década de 70. Um trabalho pioneiro nesta área é

encontrado em BAJCSA; TAVAKOLI (1976), quando foram usadas imagens de baixa resolução do sensor MSS/LANDSAT-1. Nestas imagens, as rodovias eram imageadas como feições lineares de 1 a 3 pixels.

Os métodos de extração de rodovias diferem quanto ao tipo de imagem utilizada (em geral se é de baixa, média ou de alta resolução), primitivas empregadas (bordas, perfis transversais ao eixo da rodovia) e estruturas de controle (ZLOTNICK; CARNINI, 1993). O processo de extração de rodovias pode ser realizado de diversas formas. A resolução da imagem é a chave determinante para escolha de qual procedimento deverá ser aplicado (FORTIER et al., 1999). Baseado na literatura (BAUMGARTNER et al., 1999), imagens de alta resolução são definidas como sendo imagens que possuem pixels menores que 0,7 metros, imagens de média resolução (pixels de 0,7 – 2,0 metros) e imagens de baixa resolução as que possuem pixels maiores que 2 metros. Vários processos de extração foram desenvolvidos, aplicados e avaliados para estas faixas de resolução. Um aspecto comum aos métodos desenvolvidos é a ausência de um modelo geral e unificado de malha viária. Conseqüentemente, é grande a diversidade de métodos encontrados na literatura.

Outro critério muito utilizado para a classificação tanto dos modelos quanto das estratégias de reconhecimento e extração está relacionado com o grau de conhecimento sobre a malha viária neles incorporados, resultando em dois grandes grupos (DAL POZ; SILVA, 2002, AMINI et al., 2002, MENA, 2003).

Num primeiro grupo encontram-se os modelos mais simples, normalmente ligados às propriedades geométricas e radiométricas das rodovias. Estes tipos de modelo propiciam bons resultados quando a estratégia de solução for semi-automática, caso em que o operador realiza as tarefas de reconhecimento e o algoritmo computacional as tarefas de medida. Normalmente são explorados dois esquemas básicos de extração. Num primeiro

esquema, o operador necessita fornecer a posição e a direção da rodovia em um ponto inicial, a partir do qual o restante da rodovia é extraído. Normalmente se empregam algoritmos baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia ou na análise de bordas anti-paralelas (QUAM, 1978, MCKEOWN; DELINGER, 1988, MENDES; DAL POZ, 2002, KIM et al., 2004). Num segundo esquema, o operador necessita fornecer alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e posição da rodovia. O polígono inicial pode então ser refinado através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica ou no princípio do contorno ativo ou *snakes* (GRUEN; LI, 1997, LI, 1997, DAL POZ; AGOURIS, 2000, DAL POZ, 2001, DAL POZ ; VALE 2003).

Modelos mais complexos envolvendo topologia e contexto, além da radiometria e geometria, fazem parte do segundo grupo e são mais apropriados para dar suporte a estratégias automáticas de reconhecimento e extração da malha viária. Os métodos automáticos caracterizam-se por não haver a interferência do operador, tornando-os difíceis de serem resolvidos e, conseqüentemente, implicando num desenvolvimento lento de metodologias. Devido a imperfeições na fase de aquisição da imagem e complexidades encontradas nas cenas, a automação total na extração de rodovias em imagens aéreas e de satélites é ainda difícil de ser realizada. Várias soluções podem ser encontradas nas literaturas das áreas de Fotogrametria Digital e de Visão Computacional como, por exemplo, as desenvolvidas em SHUFELT E MCKEOWN (1993), STILLA (1995), BORDES et al., (1996), BAUMGARTNER et al.,(1999) e DAL POZ (2002). Dentre os sistemas que oferecem facilidades para o desenvolvimento de métodos para extração automática de rodovias, pode-se citar o *Halcon*. Trata-se de uma biblioteca de operadores computacionais que constitui uma ferramenta de propósito geral para visão computacional de grande flexibilidade. Providencia um grande número de métodos (mais de 900 operadores) para solucionar problemas e pode

ser adaptado para qualquer aplicação. O sistema permite a construção de aplicativos de alto desempenho e grande flexibilidade. Interpretando com facilidade informações na imagem utilizando técnicas de segmentação, extrai rodovias de imagens aéreas com alto grau de complexidade ajudando na atualização de mapas. Baumgartner et al. (1997) apresentaram um método automático para extração da malha viária rural em imagens de média e alta resoluções onde utilizou algumas funcionalidades do *Halcon*. O método explora quase que integralmente o modelo de malha viária existente, sendo que o único componente não explorado é o topológico. São duas as etapas básicas: 1 – segmentação da imagem; e 2 – extração da malha viária. A primeira etapa utiliza conhecimentos sobre a malha viária para realçar somente as bordas das rodovias. Na segunda etapa os objetos semânticos são extraídos e combinados para gerar a malha viária. Há uma categoria de métodos com abordagem automática que é baseada em técnicas de otimização. Um exemplo é encontrado em Stoica et al. (2004), onde foi proposto um método para extrair rodovias em imagens de satélite baseado em geometria estocástica e Métodos de Monte Carlo baseados em Cadeias de Markov (MCMC). A rede viária é aproximada pela conexão de segmentos de linhas, resultando em um modelo probabilístico que pode ser resolvido por uma estimação Máxima a Posteriori (MAP).

Atualmente, a tendência para pesquisa na extração automática de rodovias é o uso de dados de novos sensores em auxílio à extração utilizando imagens aéreas ou de satélites pancromáticos como fonte de dados. Clode et al. (2004) usou informações altimétricas e de intensidade do LIDAR para extrair rodovias.

A fusão de dados é outro aspecto importante na extração automática de rodovias. Nestes casos, as fontes de dados são imagens multiespectrais, ortoimagens pancromáticas de alta resolução, e dados de interferometria SAR.

Zhu et al., (2004) extraiu feições lineares utilizando dados de varredura a laser como guia para a extração de rodovias em imagens aéreas. Hu et al., (2004) também

combinou informações de sensores LIDAR e imagens aéreas na extração de rodovias, tentando minimizar as incertezas no processo de extração. Gao e Wu (2004) usaram imagens multiespectrais do satélite Ikonos para classificar os pixels que pertenciam a rodovias e também os pixels que não pertenciam. As rodovias foram então extraídas da imagem previamente classificada.

Pesquisas recentes direcionam as metodologias de extração de rodovias para a extração da malha viária urbana utilizando imagens orbitais de alta resolução. Lee (2005) utilizou um algoritmo que possui três etapas: na primeira etapa na qual define uma máscara (janela de busca) sobre a malha viária para determinar os candidatos a rodovia (susceptível a sombras e interrupções), na segunda etapa determina pontos sementes para delinear a malha a ser extraída e na terceira etapa é aplicado um algoritmo de crescimento de regiões que identifica e extrai a área candidata a malha viária.

Cabe salientar que, até então, nenhuma solução automática provou ser competitiva frente à habilidade natural do operador humano. Soluções semi-automáticas têm sido propostas, combinando a habilidade natural do operador humano de interpretação com a capacidade dos algoritmos computacionais em realizar medidas precisas e que consomem muito tempo. Prevê-se que a curto e médio prazo, as metodologias semi-automáticas são as que têm um potencial bem maior de serem incorporadas em sistemas fotogramétricos comercialmente disponíveis, tornando-os menos dependentes do operador humano e mais produtivos (DAL POZ, 2000).

É necessário que, ao aplicar uma metodologia, as características físicas da rodovia estejam claramente definidas para se assegurar a integridade e exatidão no processo. De acordo com BAUMGARTNER (1997), as características físicas como a superfície, inclinação, largura, curvatura e conexões influenciam nas propriedades visuais e espectrais das rodovias. Os algoritmos devem ser desenvolvidos para compensar sombras, variações e

problemas de geometria como a largura, inclinação e curvatura. Entretanto, os algoritmos devem basear-se em conhecimentos específicos ou descrições das rodovias que incluem: paralelismo das bordas da rodovia, características de reflectância, estrutura da malha viária e relação com outros objetos (BAUMGARTNER, 1997, HELLER; PAKZAD, 2005). Adicionalmente, sub-modelos separados podem ser criados para extrair características únicas no contexto particular referentes às rodovias.

Destacando especificamente os trabalhos realizados sobre extração de feições utilizando a metodologia de Programação Dinâmica (PD), ressalta-se que nos últimos 30 anos inúmeras pesquisas nas mais diversas áreas do conhecimento vêm sendo desenvolvidas. A introdução da PD no reconhecimento de padrões data dos anos 60, e é atribuída a KOVALEVSKII (1967), onde a técnica foi utilizada para reconhecimento de caracteres em imagens altamente ruidosas. Desde então, a técnica tem sido usada para processamento de imagens (por exemplo MONTANARI (1970), e também em símbolos que são baseados em um alto nível de representação (FISCHLER et al., (1981); GEMAN; JEDYNAK, (1996)). YAMADA et al., (1988), utilizaram a PD em imagens médicas para detecção de glomérulos (nodos renais), Mortensen e Barret (1995) desenvolveram uma ferramenta chamada de *Intelligent Scissors* (Tesouras Inteligentes) para delineamento de contorno de objetos em imagens digitais; e Li (1997); Gruen e Li (1997); Dal Poz e Agouris (2000); Dal Poz (2001); Barros (2001); Vale e Dal Poz (2003) e Silva (2005) utilizaram PD na extração da malha viária em imagens digitais.

As metodologias existentes para a extração de feições rodoviárias foram concebidas para analisar apenas os dados de imagem. Isto segue o conceito fundamental de mapeamento a partir de imagens, pelo qual se extrai as feições de interesse na imagem e depois se faz o georreferenciamento das mesmas.

Este trabalho inova exatamente neste ponto, pois propõe uma metodologia que integra ambas as etapas convencionais de mapeamento. Isto é realizado através de um processo de otimização no espaço objeto, em vez do procedimento tradicional, realizado no espaço imagem. De certa forma a metodologia proposta neste trabalho resgata o princípio de funcionamento dos convencionais restituidores fotogramétricos.

Gruen e Li (1997) também desenvolveram uma metodologia de extração de rodovias similar que utiliza estéreopares de imagens digitais e extração das rodovias através do algoritmo LSB-Snakes, onde o resultado final era as coordenadas 3D dos vértices das rodovias extraídas.

Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos com a metodologia de extração de rodovias utilizando otimização por PD no espaço objeto. A metodologia possui duas estratégias de extração: 1 – modo mono da metodologia, onde se realiza a extração das rodovias tendo por base uma foto isolada, parâmetros de orientação interior e exterior e um Modelo Digital do Terreno (MDT) da região correspondente; e 2 - modo estéreo da metodologia onde se utiliza pares de imagens, de posse de seus parâmetros de orientação interior e exterior.

1.2 Justificativa do Trabalho

A aquisição de dados planimétricos, por exemplo a malha viária, a partir de imagens aéreas ou de satélite, tem sido realizada por extração manual nas empresas e órgãos que produzem mapas e cartas no Brasil. Entretanto, as metodologias que visam a extração de feições a partir de imagens digitais vêm migrando para abordagens semi-automáticas e automáticas.

A relevância do trabalho em questão pode ser evidenciada através dos seguintes pontos de vista:

1. Relevância Científica: comprovada principalmente pela importância que a Comissão III – “*Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis*” (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) têm dado ao tema de extração automática da malha viária;
2. Relevância Tecnológica: pode ser uma ferramenta útil para minimizar o tempo de captura de extração da malha viária. Segundo dados do Departamento de Estradas de Rodagem (DER) do Estado de São Paulo, a malha viária estadual constitui um complexo estimado em aproximadamente 200.000 Km;
3. Ineditismo: não se conhece na literatura metodologia de extração semi-automática de rodovias que utilize estratégia semelhante à descrita no Capítulo 4, possibilitando a integração de dados multisensores (imagens aéreas e de satélite, dados laser, radar) num único processo;
4. Redução do esforço operacional, aumento da produtividade, redução de erros provocados pela fadiga operacional.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é apresentar, implementar, testar, experimentar, avaliar e propor uma metodologia semi-automática de extração de rodovias em imagens digitais baseada na otimização por programação dinâmica no espaço objeto. Esta metodologia apresenta vários aspectos inovadores, mas o principal deles é que possibilita a extração de rodovias no espaço objeto num único processo, evitando o tradicional processo seqüencial de extração de feições. O trabalho será focado

especificamente em dois métodos de extração utilizando o algoritmo da programação dinâmica que será aplicado em casos de uma única imagem (mono) e em casos de múltiplas imagens (estéreo).

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro, como já pode ter sido notado, apresenta-se uma breve explanação a respeito dos métodos existentes de extração automática de rodovias em imagens digitais procurando posicionar o leitor dentro do contexto do problema e ainda os objetivos da realização deste trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos matemáticos do algoritmo de programação dinâmica.

No terceiro capítulo será apresentada a metodologia utilizada incluindo a modelagem de rodovias no espaço imagem, os princípios para a solução do modelo matemático de rodovias empregando programação dinâmica, a modelagem para extração de rodovias no espaço objeto no caso mono (uma imagem apenas) e o caso envolvendo múltiplas imagens.

No quarto capítulo são apresentados os experimentos, resultados e as discussões.

No capítulo cinco, são apresentadas as considerações finais e as conclusões.

Finalizando o trabalho, no apêndice A é apresentada fundamentação teórica e os aspectos matemáticos relacionados com a transformação de um ponto no sistema de coordenadas de mapa (Universal Transversa de Mercator) para a imagem digital bruta.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os fundamentos matemáticos do algoritmo de programação dinâmica, o modelo genérico de rodovias no espaço imagem, a metodologia de programação dinâmica para extração de rodovias em imagens de alta e média resolução e a técnica de interpolação *thin plate spline* utilizada neste trabalho para obtenção da coordenada altimétrica no modelo digital do terreno no caso de extração de rodovias utilizando apenas uma imagem.

2.1 Programação Dinâmica

Richard Bellman, um matemático americano, começou o estudo sistemático de programação dinâmica em 1955 (CORMEN et al., 2002). A palavra programação, tanto aqui quanto em programação linear, se refere ao uso de um método de solução tabular. Embora as técnicas de otimização incorporando elementos de programação dinâmica fossem conhecidas antes, Bellman proporcionou à área uma sólida base matemática. O termo programação dinâmica é utilizado para descrever processos de solução de problemas, onde a melhor decisão ou solução para cada estágio deste problema, é resolvida seqüencialmente, estágio após estágio (CORMEN et al., 2002).

A programação dinâmica, como método de dividir e conquistar, resolve problemas combinando as soluções para subproblemas (nesse contexto, o termo programação se refere a um método tabular, não ao processo de escrita de código de computador). Os algoritmos de dividir e conquistar particionam o problema em subproblemas independentes, resolvem os subproblemas recursivamente, e então combinam suas soluções para resolver o problema original. Em contraste, a programação dinâmica é aplicável quando os subproblemas não são independentes, isto é, quando os subproblemas compartilham

subproblemas. Nesse contexto, um algoritmo de dividir e conquistar trabalha mais que o necessário, resolvendo repetidamente subproblemas comuns. Um algoritmo de programação dinâmica resolve cada subproblema uma vez só e então grava sua resposta em uma tabela, evitando assim o trabalho de recalcular a resposta toda vez que o subproblema é encontrado (CORMEN et al.,2002).

Esta técnica, também chamada de otimização recursiva ou seqüenciada, é um método exato, e se aplica a problemas combinatórios que podem ser decompostos numa seqüência de etapas. Cada etapa possui um conjunto de estados, que descreve o seu resultado parcial (DREYFUS; LAW, 1977).

A programação dinâmica possui diversas aplicações, como por exemplo, em problemas de roteamento na área de transportes, em problemas de reservatório na área de hidrologia e em finanças na área de economia (BARROS, 2001).

2.2 Elementos de Programação Dinâmica

A programação dinâmica em geral é aplicada em problemas de otimização. Em tais problemas, pode haver muitas soluções possíveis. Cada solução tem um valor, e deseja-se encontrar uma solução com um valor ótimo (mínimo ou máximo). O desenvolvimento de um algoritmo de programação dinâmica pode ser desmembrado em uma seqüência de etapas.

- 1 – Caracterizar a estrutura de uma solução ótima;
- 2 - Definir recursivamente o valor de uma solução ótima;
- 3 – Calcular o valor de uma solução ótima em um processo de baixo para cima (*bottom-up*);
- 4 - Construir uma solução ótima a partir de informações calculadas.

Antes de conceituar e resolver um exemplo de programação dinâmica deve-se definir os seus elementos fundamentais (BARROS, 2001):

- Problema complexo – problema que se deseja resolver através da Programação Dinâmica, e que será dividido em diversos subproblemas parciais;
- Variável de Etapa (X_i) - corresponde a cada estágio em que o problema complexo foi dividido;
- Variável de Estado (Y_i) - corresponde a cada possibilidade de uma dada etapa (X_i);
- Nó ($N_{X,Y}$) – cada nó é representado por uma variável de etapa (X_i) e por uma variável de estado (Y_i);
- Etapa Inicial – corresponde à primeira etapa, que geralmente apresenta apenas um estado;
- Etapa Final – corresponde à última etapa, que geralmente apresenta apenas um estado;
- Custo Parcial – corresponde ao custo de deslocamento para ir de um estado pertencente a uma etapa, para outro estado de uma etapa subsequente, ou seja, é valoração da função-objetivo entre dois nós consecutivos;
- Grafo – corresponde ao conjunto de nós e seus custos associados;
- Função-objetivo, função mérito ou função custo – função matemática que deve ser aplicada entre dois nós;
- Equação de recursividade – corresponde a uma relação de recorrência em que uma função é solicitada por ela mesma. Geralmente toda equação de recursividade possui uma condição inicial, para que o processo seja inicializado;
- Custo Máximo de um nó – corresponde ao maior custo de todos aqueles que chegam a um determinado nó;
- Custo Mínimo de um nó – corresponde ao menor custo de todos aqueles que chegam a um determinado nó;

- Custo Acumulado – corresponde à soma do custo máximo (ou mínimo) que chega a um nó aos custos parciais que partem daquele nó;
- Melhor Decisão – consiste na verificação do par de nós que obtiveram o custo acumulado máximo (ou mínimo);
- Estratégia Ótima – corresponde à seqüência de nós que maximizam (ou minimizam) a função-objetivo.

2.3 Algoritmo de Programação Dinâmica

Um algoritmo é um procedimento computacional bem definido que toma algum valor ou conjunto de valores como entrada e produz algum valor ou conjunto de valores como saída. Portanto, um algoritmo é uma seqüência de passos computacionais que transformam a entrada na saída (CORMEN et al., 2002). Também pode-se visualizar um algoritmo como uma ferramenta para resolver um problema computacional especificado. O enunciado do problema especifica em termos gerais o relacionamento entre a entrada e a saída desejada. O algoritmo descreve um procedimento computacional específico para se alcançar esse relacionamento da entrada com a saída (CORMEN et al., 2002).

Programação Dinâmica (PD) é freqüentemente utilizada na extração da malha viária e foi descrita em detalhes por Gruen e Li (1996), Dal Poz e Agouris, (2000), Dal Poz (2001), Barros (2001), Vale (2003), Silva (2005) e Gallis et al. (2005).

A resolução de um problema envolvendo PD conduz à decomposição daquele numa seqüência de problemas isolados (mais simples) ligados entre si por via recursiva. Em regra, um problema é susceptível de ser abordado com programação dinâmica se nele forem identificadas três características básicas (SILVA; TELHADA, 2001):

- É um problema decomponível em etapas de decisão distintas;

Exemplos: um problema de investimentos anuais pode ser separado (para tomada de decisões) pelos vários anos em questão; um problema de caminhamento de um local para outro pode ser decomposto nos vários pontos intermediários do itinerário (níveis de decisão);

- Em cada etapa da decisão é possível definir o estado da solução;
Exemplo: no problema do caminhamento, o estado em cada etapa correspondente ao vértice que se pode estar (situação) como consequência da decisão tomada na etapa anterior;
- Em cada etapa decide-se, para cada estado, qual estado da etapa seguinte oferece melhor retorno para a solução do problema (mudança de estado). Deste modo, estabelece-se um fio condutor que liga a melhor seqüência de decisões ainda que em qualquer momento do processo sejam adotadas decisões menos corretas.

Em regra os problemas de PD são resolvidos, iniciando o processo de cálculo na última etapa do problema (última decisão) e deduzindo a partir desta, sucessivamente, as decisões ótimas das etapas antecessoras até atingir a etapa inicial.

2.3.1 Princípios do Algoritmo de Programação Dinâmica

Quando em um problema de otimização, nem todas as variáveis envolvidas estão inter-relacionadas simultaneamente, a solução pode ser eficientemente encontrada através de uma técnica conhecida como programação dinâmica (BALLARD; BROWN, 1982).

A figura 1 mostra o problema clássico da programação dinâmica (DAL POZ; VALE, 2004). A idéia básica é encontrar o caminho ótimo em um grafo, entre os nós

$N_{1,1}$ e $N_{5,1}$, cuja solução pode ser encontrada sequencialmente. No primeiro estágio, é necessário escolher um dos caminhos entre o nó $N_{1,1}$ e os nós $N_{2,1}$, $N_{2,2}$ ou $N_{2,3}$. Supondo que o nó $N_{2,1}$ é a melhor escolha, a próxima decisão deve ser tomada entre os nós $N_{3,1}$, $N_{3,2}$ ou $N_{3,3}$. Esta estratégia vai sendo repetida até que o nó $N_{5,1}$ seja alcançado. O caminho definido pelos nós $N_{5,1} \rightarrow N_{4,3} \rightarrow N_{3,1} \rightarrow N_{2,3} \rightarrow N_{1,1}$ é o caminho ótimo procurado, correspondendo à trajetória de custo mínimo (DAL POZ; VALE, 2004).

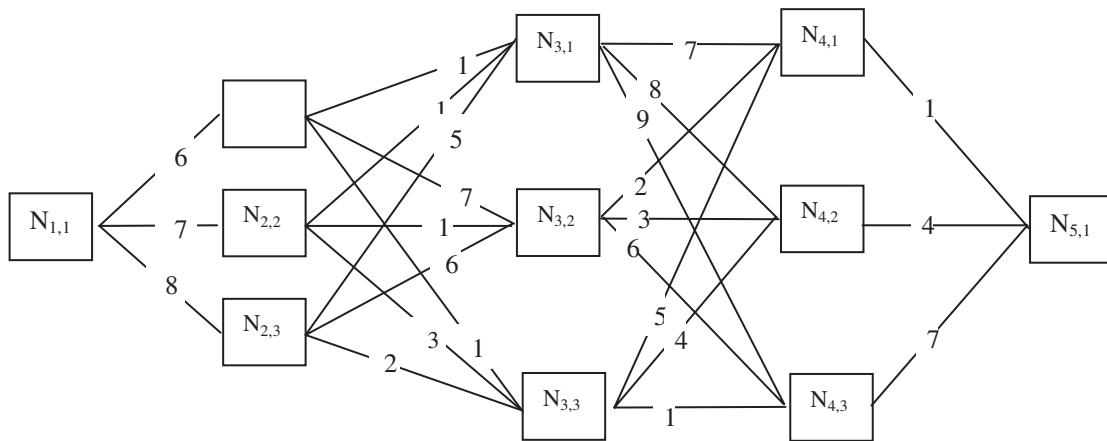


Figura 1 - Problema Clássico de Programação Dinâmica (Adaptado de DAL POZ; VALE, 2004)

A seguir, o problema é apresentado de maneira mais formal (DAL POZ; VALE, 2004).

Sejam $\{P_i\}$, $i= 1, 2, \dots, n$, um conjunto de nós e $[C_{ij}]$ uma matriz custo, onde C_{ij} é o custo para ir do nó P_i para o nó P_j .

O caminho ótimo é tal que o custo para ir do nó inicial P_A para o nó final P_N seja mínimo. Sejam agora $g(i,j)$ a função que descreve o custo para mover do nó P_i para o nó P_j e s os nós ao longo do caminho. Pode-se escrever,

$$g(i,j)=g(i,s)+g(s,j) \quad (1)$$

Para encontrar o caminho ótimo entre os nós P_i e P_j é necessário encontrar $g(i,j)$ e um conjunto s que satisfaça,

$$g(i,j)=\min_s [g(i,s) + g(s,j)] \quad (2)$$

Se nenhuma restrição for imposta, a expressão 2 estabelece um problema geral de busca em grafo. Entretanto, se o grafo for similar àquele apresentado na figura 1,

onde apenas alguns nós estão diretamente conectados, então a busca pelo caminho ótimo envolve um procedimento de otimização seqüencial e, como tal, um algoritmo eficiente para resolver o problema é o da programação dinâmica. Considerar o problema de encontrar o máximo M da função,

$$g=g(x_1,x_2,\dots,x_n) \quad (3)$$

Portanto, o objetivo é encontrar a n -upla $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ que maximiza a função 3. Se esta função for analiticamente desconhecida e se as variáveis independentes (x_1, \dots, x_n) assumirem valores discretos, a solução poderá ser encontrada através da combinação exaustiva dessas variáveis. Contudo, se nem todas as variáveis são simultaneamente interrelacionadas, então um algoritmo de programação dinâmica pode ser aplicado para resolver o problema. Supor então, que,

$$g(x_1,x_2,\dots,x_n)= g_1(x_1,x_2,x_3) + g_2(x_2, x_3, x_4)\dots + g_{n-2}(x_{n-2}, x_{n-1}, x_n) \quad (4)$$

onde a função g_1 depende apenas de x_1, x_2 e x_3 , a função g_2 apenas de x_2, x_3 , e x_4 , e assim por diante. Assim posto o problema, o valor máximo da função 4 pode ser encontrado através de um processo de eliminação seqüencial das variáveis envolvidas.

O processo inicia então 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 realização do par (x_2, x_3) , isto é,

$$f_1(x_2,x_3)=\max_{x_1} [g_1(x_1,x_2,x_3)] \quad (5)$$

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

$$f_2(x_3, x_4)= \max_{x_2} [f_1(x_2, x_3) + g_1(x_2, x_3, x_4)] \quad (6)$$

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

$$f_{n-1}(x_n) = \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}, x_n)] \quad (7)$$

$$M = \max(g) = \max_{x_n} [f_{n-1}(x_n)] \quad (8)$$

Finalmente, pode-se generalizar o algoritmo descrito acima através das seguintes equações recursivas,

$$f_0(x_1, x_2) = 0 \quad (9)$$

$$f_k(x_{k+1}, x_{k+2}) = \max_{x_k} [f_{k-1}(x_k, x_{k+1}) + g_k(x_k, x_{k+1}, x_{k+2})] \quad (10)$$

$$f_{n-1}(x_n) = \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}, x_n)] \quad (11)$$

$$M = \max[g] = \max_{x_n} [f_{n-1}(x_n)] \quad (12)$$

O princípio representado pelas equações 5, 6, 7 e 8 é usado para construir uma série de tabelas, possibilitando posteriormente a obtenção da n-upla $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ que maximiza a função 4 (DAL POZ; VALE, 2004).

Como já mostrado na figura 1, um dos problemas clássicos da programação dinâmica denomina-se problema da viagem, que consiste em encontrar o caminho mínimo para ir de uma cidade representada pelo nó $N_{1,1}$ para outra cidade representada pelo nó $N_{5,1}$ passando necessariamente pelas cidades intermediárias. Como o objetivo é o caminho mínimo, uma primeira idéia para resolver este problema é escolher sempre a viagem de distância menor. Entretanto, este critério conduz a um resultado que não corresponde ao caminho mínimo global.

O problema pode ser resolvido pela técnica da enumeração exaustiva, que é a realização da combinação de todos os caminhos possíveis através do teste de todas as

opções disponíveis ou através da abordagem por programação dinâmica. As duas soluções são apresentadas a seguir (Barros, 2001):

1ª Solução: Enumeração Exaustiva – como neste problema existem 5 etapas e 3 estados, tem-se um total de 27 combinações possíveis, conforme mostrado na Tabela 1.

Este problema da viagem pode ser dividido nas seguintes partes:

- Viagem do nó $N_{1,1}$ até o nó ($N_{2,1}$, $N_{2,2}$ ou $N_{2,3}$)
- Viagem do nó ($N_{2,1}$, $N_{2,2}$ ou $N_{2,3}$) até o nó ($N_{3,1}$, $N_{3,2}$ ou $N_{3,3}$)
- Viagem do nó ($N_{3,1}$, $N_{3,2}$ ou $N_{3,3}$) até o nó ($N_{4,1}$, $N_{4,2}$ ou $N_{4,3}$)
- Viagem do nó ($N_{4,1}$, $N_{4,2}$ ou $N_{4,3}$) até o nó $N_{5,1}$

Tabela 1 - Solução do problema da viagem usando enumeração exaustiva.

1ª Cidade (1 opção)	2ª Cidade (3 opções)	3ª Cidade (3 opções)	4ª Cidade (3 opções)	5ª Cidade (1 opção)	Custo Total
			$N_{4,1}$		$6+1+7+1=15$
		$N_{3,1}$	$N_{4,2}$		$6+1+9+4=20$
			$N_{4,3}$		$6+1+8+7=22$
			$N_{4,1}$		$6+7+2+1=16$
	$N_{2,1}$	$N_{3,2}$	$N_{4,2}$		$6+7+3+4=20$
			$N_{4,3}$		$6+7+6+7=26$
			$N_{4,1}$		$6+1+5+1=13$
		$N_{3,3}$	$N_{4,2}$		$6+1+4+4=15$
			$N_{4,3}$		$6+1+7+1=15$
			$N_{4,1}$		$7+1+7+1=16$
		$N_{3,1}$	$N_{4,2}$		$7+1+9+4=21$
			$N_{4,3}$		$7+1+8+7=23$
			$N_{4,1}$		$7+1+2+1=11$
$N_{1,1}$	$N_{2,2}$	$N_{3,2}$	$N_{4,2}$	$N_{5,1}$	$7+1+3+4=14$
			$N_{4,3}$		$7+1+6+7=21$
			$N_{4,1}$		$7+3+5+1=16$
		$N_{3,3}$	$N_{4,2}$		$7+3+4+4=18$
			$N_{4,3}$		$7+3+1+7=18$
			$N_{4,1}$		$8+5+7+1=21$
		$N_{3,1}$	$N_{4,2}$		$8+5+9+4=26$
			$N_{4,3}$		$8+5+8+7=28$
			$N_{4,1}$		$8+6+2+1=17$
	$N_{2,3}$	$N_{3,2}$	$N_{4,2}$		$8+6+3+4=21$
			$N_{4,3}$		$8+6+6+7=27$
			$N_{4,1}$		$8+2+5+1=16$
		$N_{3,3}$	$N_{4,2}$		$8+2+4+4=18$
			$N_{4,3}$		$8+2+1+7=18$

2ª Solução: Programação Dinâmica – Supondo um problema com m etapas e n estados entre 2 nós consecutivos N_{X_i, Y_i} e $N_{X_{i+1}, Y_{i+1}}$ haverá m^2 possibilidades. As 2 únicas exceções são entre a 1ª e 2ª etapas, e a $(n-1)^a$ e a n^a etapas que terão m possibilidades.

Como no exemplo apresentado na figura 1, tem-se 5 etapas e 3 estados, haverá 3 custos para as 2 primeiras etapas, 9 custos para as etapas intermediárias, e 3 custos para as 2 últimas etapas. Assim, o propósito da Programação Dinâmica é selecionar os custos

máximos (ou mínimos) a cada par de etapas, e esses custos máximos serão adicionados aos custos parciais subseqüentes. A solução do problema da viagem apresentada na Tabela 2 com a diferença de que neste item se desejará a maximização da função-objetivo.

Tabela 2 - Solução do problema da viagem usando Programação Dinâmica.

(X_{i+1}, Y_{i+1})	(X_i, Y_i)	Custos Parciais	Mínimo Anterior	Custos Acumulados	Mínimo Atualizado	Melhor Decisão
$N_{2,1}$		6	0	6	6	
$N_{2,2}$	$N_{1,1}$	7	0	7	7	$N_{1,1}$
$N_{2,3}$		8	0	8	8	
	$N_{2,1}$	1	6	7		
$N_{3,1}$	$N_{2,2}$	1	7	8	7	$N_{2,1}$
	$N_{2,3}$	5	8	13		
	$N_{2,1}$	7	6	13		
$N_{3,2}$	$N_{2,2}$	1	7	8	8	$N_{2,3}$
	$N_{2,3}$	6	8	14		
	$N_{2,1}$	1	6	7		
$N_{3,3}$	$N_{2,2}$	3	7	10	7	$N_{2,1}$
	$N_{2,3}$	2	8	10		
	$N_{3,1}$	7	7	14		
$N_{4,1}$	$N_{3,2}$	2	8	10	10	$N_{3,2}$
	$N_{3,3}$	5	7	12		
	$N_{3,1}$	9	7	16		
$N_{4,2}$	$N_{3,2}$	3	8	11	11	$N_{3,2}$
	$N_{3,3}$	4	7	11		
	$N_{3,1}$	8	7	15		
$N_{4,3}$	$N_{3,2}$	6	8	14	8	$N_{3,3}$
	$N_{3,3}$	1	7	8		
	$N_{4,1}$	1	10	11		
$N_{5,1}$	$N_{4,2}$	4	11	15	11	$N_{4,1}$
	$N_{4,3}$	7	8	15		

Mapeamento da função-objetivo

A função-objetivo para resolver o problema apresentado na figura 1 depende apenas de 2 variáveis de estado. Portanto, a função-objetivo pode ser convertida em

um somatório de subfunções que dependam de 2 variáveis, conforme a equação 13 (NÓBREGA,1976).

$$g(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n) = g_1(e_1, e_2) + g_2(e_3, e_3) + \dots + g_{n-1}(e_{n-1}, e_n) \quad (13)$$

O mapeamento (ou valoração) da função-objetivo consiste no cálculo dos custos aplicados aos estados de 2 etapas consecutivas. Supondo n estados, haverá um total de n^2 custos. Estes custos são armazenados em tabelas denominadas “custos parciais”. No exemplo da tabela 3, são considerados 3 estados, totalizando 9 custos, que ficam armazenados em uma matriz quadrada de dimensões 3 por 3.

Tabela 3 - Tabela da matriz de custos parciais.

e_2, e_3	$N_{3,1}$	$N_{3,2}$	$N_{3,3}$
$N_{2,1}$	1	7	1
$N_{2,2}$	1	1	3
$N_{2,3}$	5	6	2

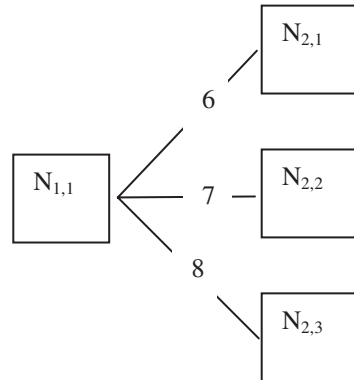
Maximização da função-objetivo

A Programação Dinâmica pode ser usada para maximização ou minimização de uma função-objetivo. Daqui para frente será discutida somente a maximização da função-objetivo. Entretanto, tratamento análogo poderia ser dado à minimização da função-objetivo (BALLARD E BROWN, 1986). A maximização da função-objetivo consiste na verificação dos valores máximos que chegam na etapa seguinte. O processo de maximização da função-objetivo pode ser dividido em 2 partes:

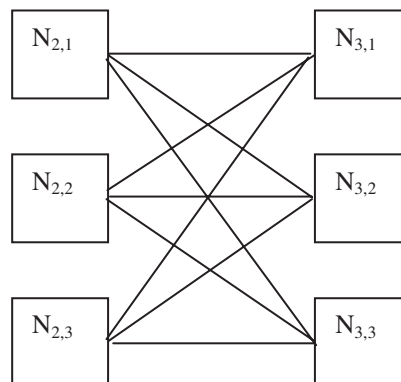
1ª Parte: Obtenção da matriz quadrada de custos acumulados. A matriz de custos acumulados é dada pela equação 10.

Tabela 4 - Tabela da matriz de custos máximos $f_1(e_2)$

Nó anterior	Custo	Nó posterior
$N_{1,1}$	6	$N_{2,1}$
$N_{1,1}$	7	$N_{2,2}$
$N_{1,1}$	8	$N_{2,3}$

Figura 2 - Representação dos custos máximos $f_1(e_2)$ Tabela 5 - Tabela da matriz de custos parciais $\rightarrow g_2(e_2, e_3)$

Nó anterior	$N_{3,1}$	$N_{3,2}$	$N_{3,3}$
$N_{1,1}$	1	7	1
$N_{1,1}$	1	1	3
$N_{1,1}$	5	6	2

Figura 3 - Representação dos custos parciais $g_2(e_2, e_3)$

A matriz de custos acumulados (Tabela 6) é obtida, somando-se cada linha da matriz de custos parciais (Tabela 5) ao elemento correspondente da matriz coluna de custos máximos (Tabela 4).

Tabela 6 - Tabela da matriz de custos acumulados $\rightarrow f_1(e_2) + g_2(e_2, e_3)$

Nó posterior Nó anterior	$N_{3,1}$	$N_{3,2}$	$N_{3,3}$
$N_{2,1}$	7	13	7
$N_{2,2}$	8	8	10
$N_{2,3}$	13	14	10

2ª Parte: Obtenção da matriz coluna de custos máximos. A matriz coluna de custos máximos (Tabela 7) é obtida, verificando-se dentro de cada coluna da matriz de custos acumulados qual é o maior elemento. Na tabela 7, o elemento máximo que chega em $N_{3,2}$ vale 14, e parte de $N_{2,3}$.

Tabela7 - Tabela da matriz de custos máximos.

Nó anterior	Custo	Nó posterior
$N_{2,3}$	13	$N_{3,1}$
$N_{2,3}$	14	$N_{3,2}$
$N_{2,3}$	10	$N_{3,3}$

Caminho inverso (*tracing back*)

O caminho inverso consiste em fazer a busca dos custos máximos e seus respectivos nós de trás para frente. Verifica-se na tabela 7 qual o custo máximo e os seus respectivos nós. Parece redundante, mas o que se deseja realmente é o custo máximo dentre todos os custos máximos.

Tabela 8 - Última tabela da matriz de custos máximos.

Nó posterior Nó anterior	$N_{5,1}$
$N_{4,1}$	21
$N_{4,2}$	26
$N_{4,3}$	28

Verifica-se que o custo máximo dentre todos os máximos é 28, e que os nós envolvidos são (5,1) e (4,3). A partir daí, pesquisa-se na tabela de custos máximos anterior o

nó (4,3), e assim constrói-se o caminho inverso até a primeira tabela. Isto pode ser feito porque existe a superposição de um nó entre as tabelas de custos máximos.

Tabela 9 - Caminho Inverso com a superposição de 1 nó.

Etapa posterior	Estado posterior	Custo máximo	Etapa anterior	Estado anterior
5	1	28	4	3
4	3	21	3	1
3	1	13	2	3
2	3	8	1	1

Sequência de nós do caminho inverso:

$$N_{5,1} \rightarrow N_{4,3} \rightarrow N_{3,1} \rightarrow N_{2,3} \rightarrow N_{1,1}$$

2.4 Modelo genérico de rodovias para imagens de baixa resolução

Técnicas de extração semi-automáticas utilizam conhecimentos de baixa ordem sobre a malha viária, normalmente relacionados com geometria e radiometria. As rodovias em geral possuem características próprias como sua geometria (largura, curvatura etc.), sua radiometria (reflectância) e sua topologia. Estas três características constituem o modelo geométrico, radiométrico e topológico de rodovias (DAL POZ, 2000).

Um modelo genérico de rodovia é necessário para descrever a aparência, assim como atributos das rodovias nas imagens digitais. Seja ξ uma curva da imagem matricial, correspondente à feição rodovia no espaço objeto. Esta curva pode ser representada por uma função vetorial $f(s)$ que mapeia cada comprimento de arco s a um ponto da imagem (x,y) , como mostra a figura 4. Sendo assim, pode-se fazer as seguintes observações (GRUEN; LI, 1997):

- A curva ξ possui derivadas contínuas e o vetor unitário $n(s)$ é normal à função $f(s)$;
- A imagem matricial é representada pela função $G(x,y)$ que mapeia cada ponto (x,y) da imagem à intensidade G do nível de cinza neste ponto.

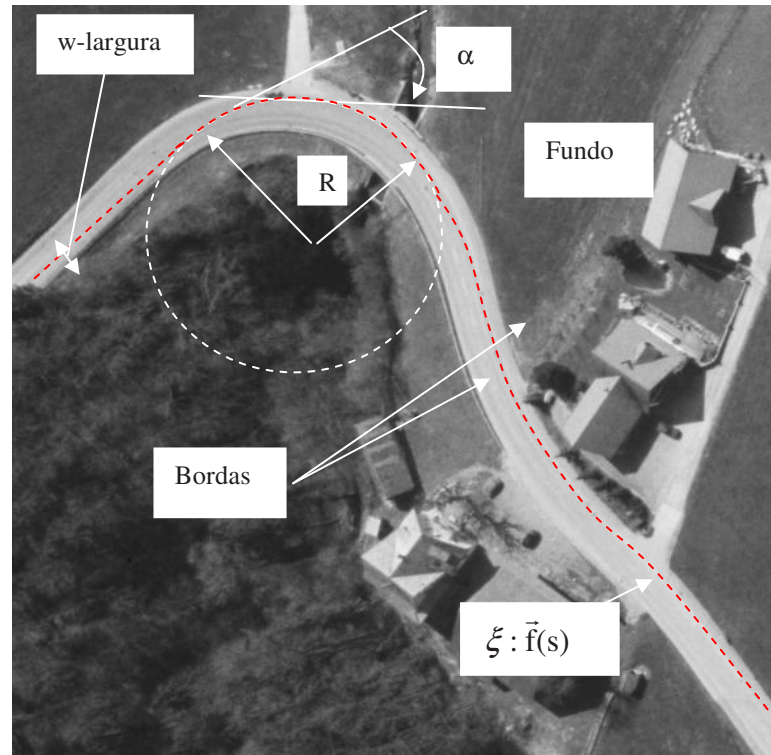


Figura 4 – Feição rodovia presente em uma imagem pancromática

(Adaptada de Dal Poz, 2001)

Em se tratando de uma imagem de baixa resolução, a largura (w) será de aproximadamente 1 pixel e a rodovia terá a aparência de uma feição linear. Porém, se a imagem for de média ou alta resolução, a rodovia será vista como uma faixa estreita.

O modelo genérico da feição rodovia foi proposto originalmente por Li (1997). Este modelo genérico é constituído por três propriedades radiométricas e 3 propriedades geométricas, de acordo com o conhecimento a respeito da feição rodovia (LI, 1997; GRUEN; LI, 1997; DAL POZ, 2000):

Propriedade Radiométrica n° 1 – Contraste: O contraste de uma imagem pode ser definido como sendo a diferença do nível de cinza entre as feições da imagem, sendo diretamente proporcional a esta diferença. Nas imagens pancromáticas, verifica-se que feições cartográficas como construções e rodovias apresentam contraste com as outras feições circunvizinhas. Esta propriedade estabelece que a soma dos quadrados dos níveis de cinza dos pixels ao longo da rodovia tende a ser máxima.

$$Ep_1 = \int [G_c(\vec{f}(s))]^2 ds \rightarrow \text{Máximo} \quad (14)$$

A versão discreta é dada por:

$$Ep_1 = \sum_i G_d^2(x_i, y_i) \rightarrow \text{Máximo} \quad (15)$$

Propriedade Radiométrica n° 2 - Homogeneidade: A rodovia tende a apresentar intensidades de níveis de cinza bastante próximas em distâncias curtas. Esta propriedade estabelece que a diferença entre as intensidades de níveis de cinza dos pixels adjacentes ao longo da rodovia tende a ser mínima.

$$Ep_2 = \sum_i \int_{\Delta S_i} [G_c(\vec{f}(s)) - G_c^m(\Delta S_i)]^2 ds \rightarrow \text{Mínimo} \quad (16)$$

Sendo $G_m(\Delta S_i) = \int_{\Delta S_i} G(f(s)) ds / |\Delta S_i|$ o valor médio de G em ΔS_i

A versão discreta é dada por:

$$Ep_2 = \sum_i \sum_j [G_d(x_j, y_j) - G_{d^m}^{\Delta S_i}]^2 \rightarrow \text{Mínimo} \quad (17)$$

Propriedade Radiométrica n° 3 – Esta propriedade é uma generalização das duas propriedades anteriores (contraste e homogeneidade). Ela estabelece que a rodovia é uma feição linear de elevado nível de cinza.

$$Ep_3 = \int w(d(s)) [G_c(\vec{f}(s) + d(s) \vec{n}(s))]^2 ds \rightarrow \text{Máximo} \quad (18)$$

- $d(s)$ é a distância entre um ponto qualquer e a feição rodovia,
- $n(s)$ é o vetor unitário normal à função $f(s)$,
- $w(s)$ é uma função gaussiana que diminui com o aumento da distância $d(s)$.

A versão discreta da fórmula 16 utilizada neste trabalho é dada a seguir,

$$E_{p_3} = \sum_i e^{-d_i^2} G_d^2(x_i, y_i) \quad (19)$$

onde,

- $e^{-d_i^2}$ é uma função gaussiana, correspondente à função $w(d(s))$ (eq.18); e
- d_i é a distância entre um ponto (x_i, y_i) e a curva discreta representando a rodovia.

Propriedade geométrica n° 1 – Suavidade: Esta propriedade estabelece que geralmente as rodovias apresentam suavidade entre os seus diversos trechos, havendo uma concatenação entre os trechos retos e os trechos curvilíneos.

$$E_{g_1} = \int |f''(s)| ds \rightarrow \text{Mínimo} \quad (20)$$

onde, $f''(s)$ é a derivada segunda de $f'(s)$. Li (1997) apresenta a seguinte fórmula para o caso discreto

$$E_{g_1} = \sum_i [2 - 2\cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i \rightarrow \text{Mínimo} \quad (21)$$

onde,

- $\alpha_i + \alpha_{i+1}$ 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 $i+1$.

Propriedade geométrica n° 2 – Curvatura Local: Esta propriedade estabelece que a curvatura local da rodovia possui um limite máximo, ou seja, o ângulo de deflexão deve ser inferior a um determinado limiar.

Para o caso discreto a fórmula pode ser aproximada por,

$$C_{gi} = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < \text{Limiar} \quad (22)$$

Propriedade geométrica n° 3 – Largura: Esta propriedade estabelece que a rodovia não possui grandes variações em sua largura. Não há nenhuma formulação para esta propriedade, entretanto ela está relacionada à propriedade radiométrica n° 3.

O uso da programação dinâmica requer necessariamente que todas as propriedades que compõem o modelo sejam discretizadas, ou seja, passe do universo contínuo para o universo discreto. A feição rodovia, que antes era uma curva, passa a ser representada por uma linha poligonal. Considerando apenas o caso de interesse, isto é, o discreto, no qual a rodovia é representada por uma linha poligonal de n vértices, o seguinte modelo matemático geral, composto de uma equação e uma injunção, pode ser escrito (LI, 1997; DAL POZ et al., 2000; DAL POZ; AGOURIS, 2000).

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((\beta p_1 - \beta p_2 + \gamma p_3) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})]) / \Delta S_i = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (23)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, i=1, \dots, n-1 \quad (24)$$

onde, β e γ são duas constantes positivas.

Portanto, o modelo matemático é composto por duas funções:

- E : corresponde à função objetivo (eq. 23), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia; e
- C_i : devido a sua definição (eq. 24), também é denominada de injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$.

O modelo matemático é resolvido seqüencialmente através do algoritmo de programação dinâmica. Isso é possível e também altamente recomendado, porque a estrutura da equação 23 é do mesmo tipo da equação 4. A diferença é que a equação 23 relaciona simultaneamente seis variáveis, contra três da equação 4.

2.5 Modelo genérico de rodovias para imagens de média e alta resolução

Na seção 2.4 foi apresentado o modelo de rodovias de baixa resolução. Este modelo é utilizado para extração de rodovias em imagens de baixa resolução, onde as feições de interesse possuem aparência linear. Quando o algoritmo de programação dinâmica é usado em imagens de média ou de alta resoluções, o eixo extraído não corresponde necessariamente ao eixo verdadeiro, sendo que nas regiões de maior curvatura tal problema se mostra de forma nítida (DAL POZ, 2000). Vale e Dal Poz (2003) resolveram este problema através de uma modificação no modelo de rodovia (função objetivo, eq. 23), a fim de que o mesmo venha incorporar informações de borda. O princípio de bordas anti-paralelas (NEVATIA E BABU, 1980) é o princípio teórico básico para a modificação proposta. Segundo este princípio, nos pontos mais representativos de borda de rodovia, os vetores do gradiente são aproximadamente paralelos e de mesmo sentido para a mesma borda e, aproximadamente paralelos e de sentido contrário para bordas opostas, sendo, também, em ambos os casos, aproximadamente ortogonais ao eixo da rodovia.

A definição do eixo de rodovia se dá pelo acréscimo de uma injunção à função objetivo (eq. 23) na forma de um triplo produto entre produtos escalares dos vetores gradiente (anti-paralelos) nos pontos de bordas de rodovia (VALE, 2003):

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} \left[Ei(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) - \langle \vec{V}_{i-1}, \vec{V}'_{i-1} \rangle \cdot \langle \vec{V}_i, \vec{V}'_i \rangle \cdot \langle \vec{V}_{i+1}, \vec{V}'_{i+1} \rangle \right] \quad (25)$$

onde $\vec{V}_{i-1}, \vec{V}'_{i-1}$, \vec{V}_i, \vec{V}'_i e $\vec{V}_{i+1}, \vec{V}'_{i+1}$ são, respectivamente, vetores anti-paralelos relacionados com as seções transversais definidas nos pontos p_{i-1} , p_i e p_{i+1} (Fig. 5).

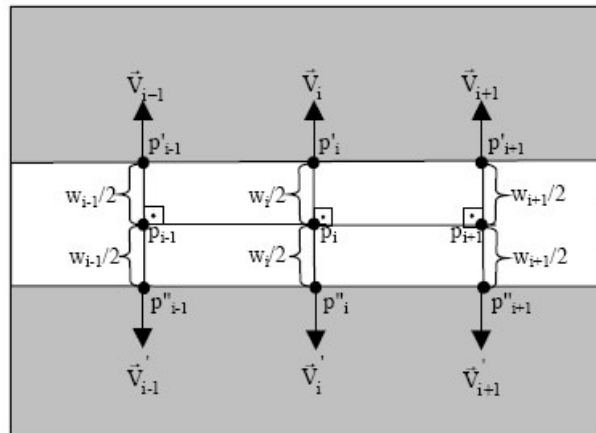


Figura 5 - Segmento de eixo de rodovia (Fonte: Vale e Dal Poz, 2003)

A segunda parcela do somatório da equação 25 é denominada injunção de borda e visa considerar aspectos peculiares às bordas das rodovias, que são:

Anti-paralelismo: esta propriedade baseia-se no fato de que dois vetores gradiente de pixels situados em margens opostas da rodovia e pertencentes ao mesmo corte transversal de rodovia, são aproximadamente anti-paralelos, isto é, eles possuem mesma direção e sentidos opostos; e

Perpendicularismo: vetores gradiente de pixels das bordas das rodovias são aproximadamente perpendiculares ao eixo da rodovia.

Quanto à magnitude dos pixels de borda, de modo geral, Canny (1986) e Vale e Dal Poz (2002) mostram que as bordas devem ser consideradas como um máximo local no resultado da filtragem diferencial. Dessa forma, pode-se caracterizar os pixels de borda de rodovia tanto do ponto de vista do sentido e da direção de seus vetores gradiente quanto do ponto de vista das respectivas magnitudes do gradiente.

Segundo Vale e Dal Poz (2003) é oportuno discutir alguns aspectos relacionados com a equação 25. Dados dois vetores quaisquer \vec{U} e \vec{V} , com $\vec{U} \neq 0$ e $\vec{V} \neq 0$, e θ o ângulo entre \vec{U} e \vec{V} , tem-se que $\langle u, v \rangle = |u| \cdot |v| \cdot \cos \theta$. Levando isso em conta na equação 25, tem-se:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} \left[Ei(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) - |\vec{V}_{i-1}| \cdot |\vec{V}'_{i-1}| \cdot \cos \theta_{i-1} \cdot |\vec{V}_i| \cdot |\vec{V}'_i| \cdot \cos \theta_i \cdot |\vec{V}_{i+1}| \cdot |\vec{V}'_{i+1}| \cdot \cos \theta_{i+1} \right] \quad (26)$$

Considerando que o objetivo básico do processo de otimização por programação dinâmica é o de encontrar o máximo da função objetivo e que o primeiro termo do somatório da equação 25 é positivo, a contribuição do novo termo deve equivaler à adição de uma grande quantidade positiva. Dessa forma, o sinal negativo entre os dois termos se justifica pelo fato de $\theta_{i-1} \cong \theta_i \cong \theta_{i+1} \cong 180^\circ$, implicando em $\cos \theta_{i-1} \cong \cos \theta_i \cong \cos \theta_{i+1} \cong -1$. Considerando também o fato de que a magnitude do gradiente em pontos de borda é máxima, os produtos escalares entre os vetores gradiente $\vec{V}_{i-1}, \vec{V}'_{i-1}$, \vec{V}_i, \vec{V}'_i e $\vec{V}_{i+1}, \vec{V}'_{i+1}$ são máximos quando os vetores gradiente são tomados em pontos de borda de rodovia, conforme ilustra a figura 6. Quando isso ocorrer, a função objetivo receberá uma grande contribuição, fazendo com que os respectivos pontos do eixo (p_{i-1}, p_i e p_{i+1}) sejam posicionados acuradamente (VALE; DAL POZ, 2003).

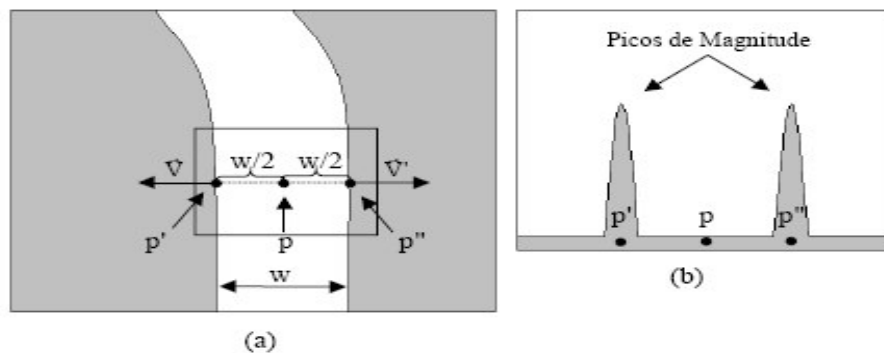


Figura 6 - Esquema para dois pontos de bordas anti-paralelas: (a) direção dos vetores gradiente; e (b) magnitude dos vetores gradiente (Fonte: Vale e Dal Poz, 2003)

A figura 6(a) mostra o caso envolvendo a seção transversal de um ponto p qualquer do eixo da rodovia. Os pontos p' e p'' pertencem às bordas da rodovia e, também, à seção transversal definida em p . Sendo w a largura local da rodovia, então, o ponto p deve estar situado a uma distância $w/2$ pixels dos pontos p' e p'' . Como nesses pontos \vec{V} e \vec{V}' serão aproximadamente anti-paralelos e as respectivas magnitudes serão extremas (Fig. 6(b)), então $\langle \vec{V}, \vec{V}' \rangle$ também assumirá um valor extremo.

Embora a equação 25 expresse o princípio fundamental envolvido, ainda não se encontra numa forma adequada para ser otimizada pelo algoritmo de programação dinâmica. Como as variáveis de interesse são as coordenadas dos pontos do eixo da rodovia, é necessário expressar as coordenadas dos pontos de borda em função dessas variáveis. Os vetores gradiente $\vec{V}_{i-1}, \vec{V}'_{i-1}, \vec{V}_i, \vec{V}'_i$ e $\vec{V}_{i+1}, \vec{V}'_{i+1}$ são definidos, respectivamente, nos pontos $p'_{i-1}, p''_{i-1}, p'_i, p''_i, p'_{i+1}$ e p''_{i+1} cujas coordenadas são expressas em função das coordenadas dos pontos p_{i-1}, p_i e p_{i+1} , isto é (VALE, 2003):

$$p'_{i-1} : \begin{cases} x'_{i-1} = \frac{w_{i-1}}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_{i-1} \\ y'_{i-1} = -\frac{w_{i-1}}{2} + y_{i-1} \end{cases} \quad (27)$$

$$p''_{i-1} : \begin{cases} x''_{i-1} = -\frac{w_{i-1}}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_{i-1} \\ y''_{i-1} = \frac{w_{i-1}}{2} + y_{i-1} \end{cases} \quad (28)$$

$$p'_i : \begin{cases} x'_i = \frac{w_i}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_i \\ y'_i = -\frac{w_i}{2} + y_i \end{cases} \quad (29)$$

$$p''_i : \begin{cases} x''_i = -\frac{w_i}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_i \\ y''_i = \frac{w_i}{2} + y_i \end{cases} \quad (30)$$

$$p'_{i+1} : \begin{cases} x'_{i+1} = \frac{w_{i+1}}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} + x_{i+1} \\ y'_{i+1} = -\frac{w_{i+1}}{2} + y_{i+1} \end{cases} \quad (31)$$

$$p''_{i+1} : \begin{cases} x''_{i+1} = -\frac{w_{i+1}}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} + x_{i+1} \\ y''_{i+1} = \frac{w_{i+1}}{2} + y_{i+1} \end{cases} \quad (32)$$

onde, para $j = i-1, i, i+1$, (x_j, y_j) são as coordenadas dos pontos p_j e os w_j são as larguras locais da rodovia em relação aos pontos p_j .

As equações, de 27 até 32, definem então os pontos nos quais os vetores gradiente serão calculados, por exemplo, usando o algoritmo de Canny, dependendo apenas das coordenadas de pontos p_{i-1} , p_i e p_{i+1} do eixo da rodovia e das respectivas larguras locais (w_{i-1} , w_i e w_{i+1}) da rodovia. As referidas equações impõem a condição geométrica (figura 5)

de que os pontos do eixo devem estar localizados ao longo do centro da rodovia. Em vista do exposto, sendo a parte da função objetivo relativa à injunção de borda, tem-se:

$$\langle \vec{v}_{i-1}, \vec{v}'_{i-1} \rangle \cdot \langle \vec{v}_i, \vec{v}'_i \rangle \cdot \langle \vec{v}_{i+1}, \vec{v}'_{i+1} \rangle = E_i^p(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) \quad (33)$$

Considerando a injunção de borda (eq. 33) na equação 25, tem-se:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) - E_i^p(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1})] \quad (34)$$

ou, substituindo os dois termos da somatória por $E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1})$, chega-se a:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1})] \quad (35)$$

que é a forma completa da função objetivo modificada. Vale ressaltar que, como no caso da função objetivo original (eq. 23), a equação 35 não relaciona simultaneamente todas as variáveis envolvidas. Conseqüentemente, tem-se novamente um problema de otimização global, passível de ser resolvido eficientemente pelo algoritmo de programação dinâmica. Uma importante simplificação pode ser realizada na equação 35, possibilitando uma significativa redução na complexidade computacional da solução algorítmica por programação dinâmica sem, contudo, afetar a qualidade dos resultados. Levando-se em conta que a largura de uma rodovia geralmente não varia muito, é válido supor que $w_{i-1} \cong w_i \cong w_{i+1}$.

Essa suposição é bastante realística porque, à medida que as iterações vão sendo realizadas, o eixo da rodovia vai também sendo refinado e adensado. Isto é, as seções definidas por três pontos sucessivos diminuem com o progresso do processo iterativo, tornando desnecessário o uso de larguras distintas de rodovias nas referidas seções locais de rodovia. Os resultados experimentais a serem mostrados na próxima seção confirmam esta expectativa teórica.

Assim, a função objetivo usada no processo de otimização tem a forma:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_i)] \quad (36)$$

Portanto, o número de incógnitas interrelacionadas simultaneamente na função objetivo modificada é sete, contra seis da versão original do método. Vale finalmente ressaltar que a diferença básica entre a solução preexistente e a modificada é a função objetivo utilizada. Isto é, basta substituir a equação 23 pela 36 e aplicar o mesmo processo de otimização por programação dinâmica (VALE; DAL POZ, 2003).

2.6 Interpolação em um modelo digital do terreno utilizando *thin plate splines*

A representação do relevo ou terreno é uma componente fundamental no processo cartográfico que, em formato digital, recebe o nome de Modelo Digital do Terreno (MDT) e consiste de um conjunto de dados que explicitam as coordenadas (X, Y, Z) do terreno e a forma como os mesmos estão relacionados.

Petrie e Kennie (1990) afirmam que a expressão “modelo digital do terreno” (MDT) apareceu pela primeira vez no artigo *The digital terrain model – theory and applications*, publicado na revista *Photogrammetric Eng. n.3, V.24, pp. 433-442, 1958*, dos autores Charles Miller e R. A. LaFlamme, ambos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), com a seguinte definição: “*The digital terrain model (DTM) is simply a statistical representation of the continuous surface of the ground by a large number of selected points with known X, Y, Z coordinates in an arbitrary coordinate field*” (O modelo digital do terreno (MDT) é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de pontos selecionados com conhecimento de X, Y, Z em um sistema de coordenadas arbitrário).

Alguns autores (ANDRADE, 1998) preferem usar o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) para designar apenas a elevação da superfície e o termo MDT significando um modelo mais completo do terreno, incluindo outras feições, tais como: casas, prédios, vegetação, árvores etc. Na literatura de língua inglesa DTM é a sigla para *Digital*

Terrain Model e DEM é a sigla para *Digital Elevation Model*. Os termos DTM e DEM são usados como sinônimos na Europa (ACKERMANN, 1996).

Na Cartografia, o MDT é utilizado para a geração de ortofotos, mapas topográficos, curvas de nível, etc. O Modelo Digital do Terreno, também tem aplicações em outras áreas, como por exemplo na engenharia civil, mapeamento batimétrico, mapeamento geológico e geofísico, simulação e visualização do terreno, engenharia militar entre outras (BARBOSA et al., 2003).

A escolha da função de interpolação é decisiva para se obter uma boa precisão do MDT. Segundo McCullagh (1988), os requisitos desejáveis para uma função interpoladora são: que reproduza uma superfície contínua; o tempo de computação não seja proibitivo e que tenha propriedades matemáticas de interesse para a aplicação.

Em geral são utilizados dois métodos de interpolação (YAMAMOTO, 1998): global e local. Os globais levam em consideração todos os pontos que foram amostrados, ajustando alguma função que passe por todos esses pontos. Os locais são influenciados por pontos que estejam em uma certa vizinhança, diminuindo sua contribuição à medida em que a distância ao ponto interpolado aumenta.

Existe uma variedade muito grande de métodos de interpolação (LANCASTER; SALKAUSKAS, 1990): linear, quártica, multiquádrica, inverso da distância ponderada etc. Nesse trabalho, foi utilizada a *thin plate spline*.

Para densificar o MDT é gerada uma malha regular no plano e interpola-se os pontos desta malha que são interiores aos triângulos. Para cada ponto da malha, deve-se verificar a qual triângulo ele é interior (figura 7):

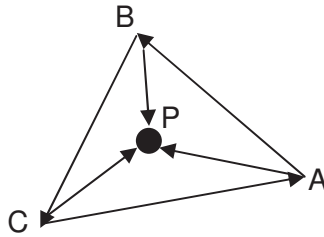


Figura 7 - Determinação do triângulo contendo o ponto

Fonte: (Adaptado de Barbosa et al.,2003)

Se o sinal do determinante dos conjuntos de vetores $(\mathbf{AB}, \mathbf{AP})$, $(\mathbf{BC}, \mathbf{BP})$ e $(\mathbf{CA}, \mathbf{CP})$ for positivo então o ponto \mathbf{P} é interior ao triângulo \mathbf{ABC} . Se for negativo em qualquer um deles, o ponto é exterior a este triângulo.

2.7 Thin plate spline

Um interpolador *thin plate spline* (TPS) pode ser ilustrado fisicamente como sendo uma chapa fina de metal, se estendendo para o infinito, presa em alguns pontos de controle, de tal forma que a energia necessária para isto seja mínima, desprezando-se a energia elástica e a energia gravitacional (BOOKSTEIN, 1989).

O TPS aparece na literatura com outros nomes (YU, 2001): spline de curvatura mínima, splines bi-harmônico e superfície spline. No passado as indústrias de aviação, automobilística e naval, usavam uma régua longa de metal para desenhar curvas e superfícies, que era chamada de spline e cujo equivalente matemático é a spline cúbica natural (BARBOSA et al.,2003).

Dados os pontos de controle (x_i, y_i, z_i) , com $i = 1, 2, \dots, n$, onde x, y são coordenadas conhecidas e z é o valor desejado, a expressão para o TPS é (BARBOSA et al.,2003):

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^n F_i r_i^2 \ln r_i^2$$

com

(37)

$$z(x_k, y_k) = z_k, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

onde

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2, \quad F_i, a_0, a_1 \text{ e } a_2$$

são os $n+3$ coeficientes.

Para gerar uma nova superfície que passa pelos n pontos e tenha todas as derivadas, o termo $r^2 \ln r^2$ pode ser trocado por $r^2 \ln(r_i^2 + \varepsilon)$:

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^n F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \varepsilon) \quad (38)$$

O parâmetro ε geralmente é tomado entre 10^{-2} e 10^{-6} , dependendo do grau da variação da curvatura da superfície (YU, 2001). Os coeficientes são determinados a partir de:

$$z_k = a_0 + a_1x_k + a_2y_k + \sum_{i=1}^n F_i r_{ik}^2 \ln(r_{ik}^2 + \varepsilon) \quad (39)$$

onde

$$r_{ik}^2 = (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2.$$

Na forma matricial:

$$AX = B$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & r_{12}^2 \ln(r_{12}^2) & \cdot & \cdot & r_{12n}^2 \ln(r_{11n}^2 + \varepsilon) & 1 & x_1 & y_1 \\ r_{12}^2 \ln(r_{12}^2) & 0 & \cdot & \cdot & r_{2n}^2 \ln(r_{21n}^2 + \varepsilon) & 1 & x_2 & y_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{1n}^2 \ln(r_{1n}^2 + \varepsilon) & r_{2n}^2 \ln(r_{21n}^2 + \varepsilon) & \cdot & \cdot & 0 & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \cdot & \cdot & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \cdot & \cdot & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \cdot & \cdot & y_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(40)

$$X = [F_1 \quad \dots \quad F_n \quad a_0 \quad a_1 \quad a_2]^T \quad B = [z_1 \quad \dots \quad z_n \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

A matriz A é simétrica, portanto quadrada e os elementos da diagonal principal são nulos. Resolvendo o sistema os coeficientes ficam determinados e conseqüentemente pode-se interpolar qualquer ponto (x, y) (BARBOSA et al.,2003).

3 METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS EM IMAGENS DIGITAIS UTILIZANDO PROGRAMACÃO DINÂMICA COM OTIMIZAÇÃO NO ESPAÇO OBJETO

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado um conjunto de métodos propostos para extração de rodovias no espaço objeto, a partir de uma ou mais imagens digitais. Primeiramente uma metodologia preexistente que serve de ponto de partida para a proposta metodológica desenvolvida nesta tese será apresentada.

3.2 Metodologia existente para extração de rodovias usando Programação Dinâmica

Uma descrição das rodovias no mundo real pode ser derivada através de sua função: rodovias são organizadas como redes conectando todas as áreas habitadas e exploradas. Esta é uma descrição funcional de rodovia, mas que não pode ser aplicada diretamente na extração de rodovias em imagens digitais utilizando algoritmos computacionais (GRUEN; LI, 1997). Quanto mais uma área é habitada e mais intensivamente usada, mais densa é a malha viária desta região. De acordo com sua importância, a malha viária pode ser classificada em uma hierarquia de diferentes categorias e atributos. De acordo com estas diferentes categorias, as rodovias diferem com respeito à largura, ao raio de curvatura mínima e à máxima inclinação. Um atributo importante para a malha viária é o tipo do material da superfície da rodovia.

A aparência das rodovias no imageamento aéreo digital depende fortemente da sensibilidade espectral do sensor e sua resolução no espaço objeto. Em imagens de baixa resolução (mais de 2 metros por pixel), as rodovias geralmente aparecem

como linhas que formam as malhas viárias. Ao contrário disto, as rodovias em imagens com média resolução (pixels de 0,7 – 2 metros) e de alta resolução (menos de 0,7 metros por pixel), são projetadas como longas regiões homogêneas com largura constante. Aqui a resolução geométrica alcançada é melhor, mas objetos de fundo como veículos, árvores ou construções obstruem com mais frequência a extração da rodovia. Em uma imagem suavizada as linhas representando os eixos centrais das rodovias podem ser extraídas de uma maneira fixa sem a presença destes objetos na cena. A suavização elimina veículos ou marcas. Pode ser também interpretada como abstração, isto é, o objeto rodovia é simplificado e suas características fundamentais são enfatizadas, como mostrada em Mayer e Steger (1998).

3.2.1 Estratégia para extração de rodovias usando programação dinâmica

O princípio geral para extração de rodovias através da utilização do algoritmo de programação dinâmica é mostrado na figura 8.

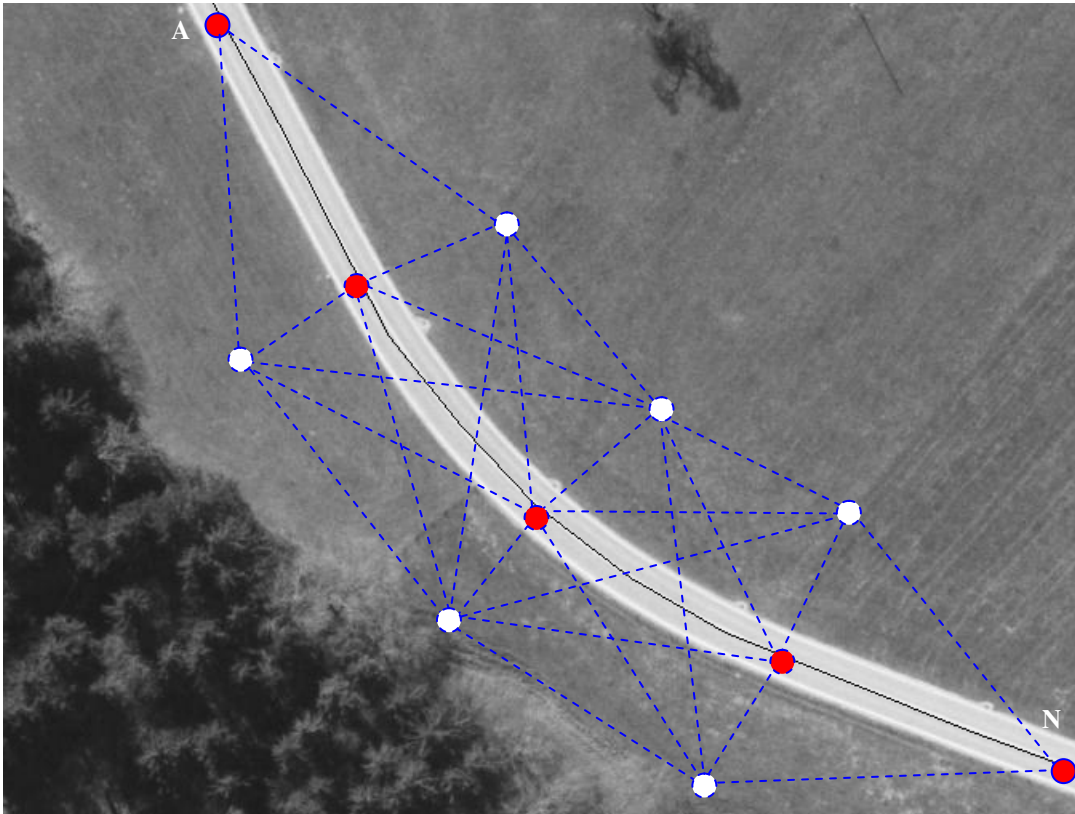


Figura 8 - Princípio geral do método

Como mostra a figura 8, o problema consiste em encontrar o melhor caminho entre A e N. O problema pode, então, ser colocado de forma similar ao problema clássico de programação dinâmica (figura 1), ou seja, pode-se decompor o problema numa seqüência de problemas isolados (mais simples) unidos por via recursiva.

A extração de rodovias utilizando programação dinâmica consiste basicamente em resolver o modelo genérico de rodovia (equação 23 para rodovias presente em imagens de baixa resolução ou 36 para presentes em média e alta) através de uma estratégia de otimização global envolvendo o algoritmo de programação dinâmica (VALE, 2003). Como se trata de um método semi-automático, cabe ao operador identificar a feição rodovia na imagem através de pontos sementes ao longo da mesma, gerando assim uma linha poligonal inicial. Cada ponto ou vértice se move em torno de sua posição inicial em uma janela 5 x 5, formando uma série de linhas poligonais. A linha poligonal para a qual o máximo da função objetivo é alcançado é considerada a rodovia. Esta linha poligonal é então refinada

através de uma estratégia iterativa, combinando um processo de inserção linear de um novo vértice equidistante, a cada par de vértices preexistentes, e a otimização por programação dinâmica de todos os vértices resultantes, inclusive os preexistentes. O processo converge quando novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal, descrevendo a rodovia (VALE, 2003). Para reduzir a complexidade computacional e tornar o algoritmo mais eficiente, o número de vértices usados para aproximar a curva e o número de candidatos para cada vértice deve ser reduzido para menor número possível (GRUEN; LI, 1997). Para descrever a curva como uma linha poligonal, a estratégia mais utilizada é usar vértices equidistantes. Esta estratégia pode não ser eficiente porque os vértices geralmente não estão relacionados com a forma da curva (GRUEN; LI, 1997).

Alguns vértices aproximados são fornecidos pelo operador. Conectando estes pontos, uma linha poligonal inicial é formada. Esta linha poligonal é adensada através da interpolação linear de pontos médios entre cada par de seus vértices. Sobre esta linha poligonal resultante é aplicado o algoritmo de programação dinâmica. Cada novo vértice inserido e otimizado é verificado e estes pontos são retirados se forem colineares com seus dois pontos vizinhos. Esta estratégia é repetida até que a convergência seja alcançada, isto é, até que nenhum novo ponto inserido contribua para o refinamento da linha poligonal representando a rodovia. Esta técnica é conhecida como inserção e retirada dinâmica de vértices (GRUEN; LI, 1997).

Usando esta estratégia de remoção e inserção dinâmica de vértices a complexidade computacional é reduzida e ao mesmo tempo o algoritmo é mais robusto em caso de pequenas interrupções e outras distorções (GRUEN; LI, 1997).

Como mostrado na figura 9 cada vértice interno é checado depois de uma iteração com três condições, isto é.

$$|\Delta s| > T_d; h > T_c; h / |\Delta s| < T_b$$

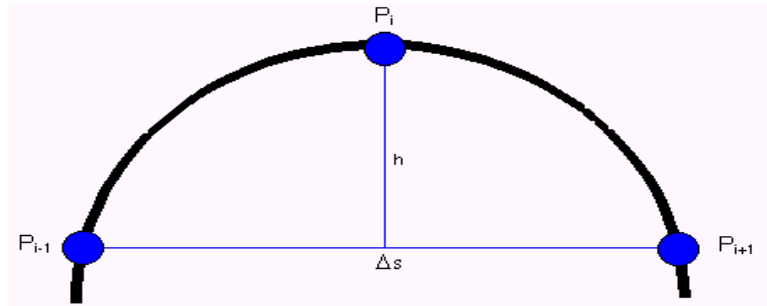


Figura 9 – Esquema da inserção e retirada dinâmica de vértices

Sendo T_d , T_c e T_b limiares, a primeira condição, ($|\Delta s| > T_d$) requer que a distância entre dois vértices vizinhos a um ponto intermediário deve ser maior que o limiar. Já a segunda condição ($h > T_c$) assegura que cada vértice é necessário para a linha poligonal. Finalmente, a terceira condição ($h/|\Delta s| < T_b$), juntamente com a injunção da função objetivo (equação 23 ou 36), assegura que a linha poligonal é uma aproximação de uma curva suave (GRUEN; LI, 1997).

3.3 Proposta Metodológica

Uma rodovia no espaço objeto possui características geométricas e de reflectância peculiares. Em relação às características geométricas, as mesmas suposições que geralmente são feitas para a aparência das rodovias no espaço imagem podem ser feitas para as rodovias no espaço objeto, quais sejam:

- Rodovias são geometricamente suaves;
- Rodovias não mudam abruptamente de direção;
- A largura das rodovias não varia muito.

As características de reflectância resultantes da interação da luz solar com o material da superfície de rolagem e das regiões adjacentes à rodovia permitem diferenciar o objeto rodovia dos demais objetos. Como geralmente o material de rolagem é composto de

asfalto, geralmente a reflectância do objeto rodovia é bastante contrastada em relação aos alvos adjacentes, sobretudo na faixa do infravermelho (ver figura 10).

A reflectância dos objetos presentes na cena são registradas por sensores como uma câmara digital fotogramétrica. Quando a cena possui rodovias, estas geralmente se manifestam na imagem (média e alta resolução) como faixas estreitas e alongadas com grande contraste em relação as adjacências. Esta é a característica fotométrica fundamental do objeto rodovia que, juntamente com as características geométricas mencionadas acima, permitem expressar matematicamente as rodovias no espaço imagem através das equações 23 ou 36 e da inequação 24 do Capítulo 2.

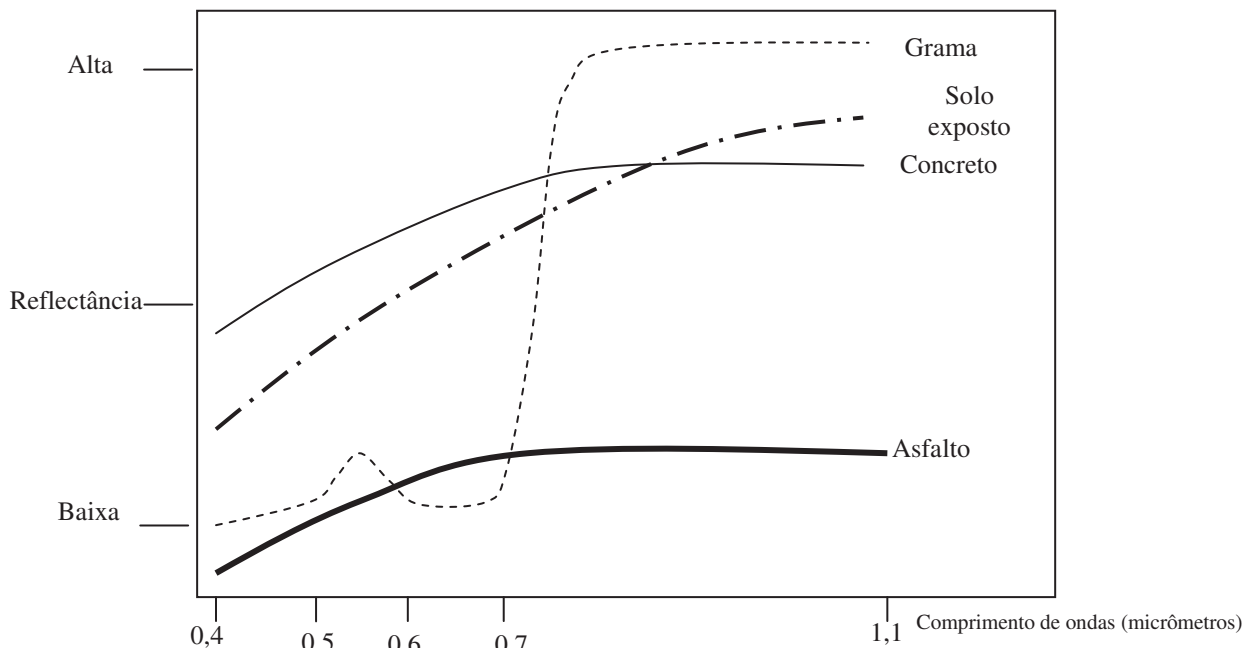


Figura 10 – Curva de reflectância espectral para asfalto e outras coberturas terrestres

O algoritmo de programação dinâmica teve seu modelo modificado, para extrair rodovias diretamente no espaço objeto a partir de um estereopar de imagens aéreas e também a partir de uma única imagem, tendo por base alguns pontos sementes fornecidos por um operador ao longo das rodovias.

A figura 11 mostra uma visão geral das possibilidades propostas de extração semi-automática de rodovias no espaço objeto usando programação dinâmica.

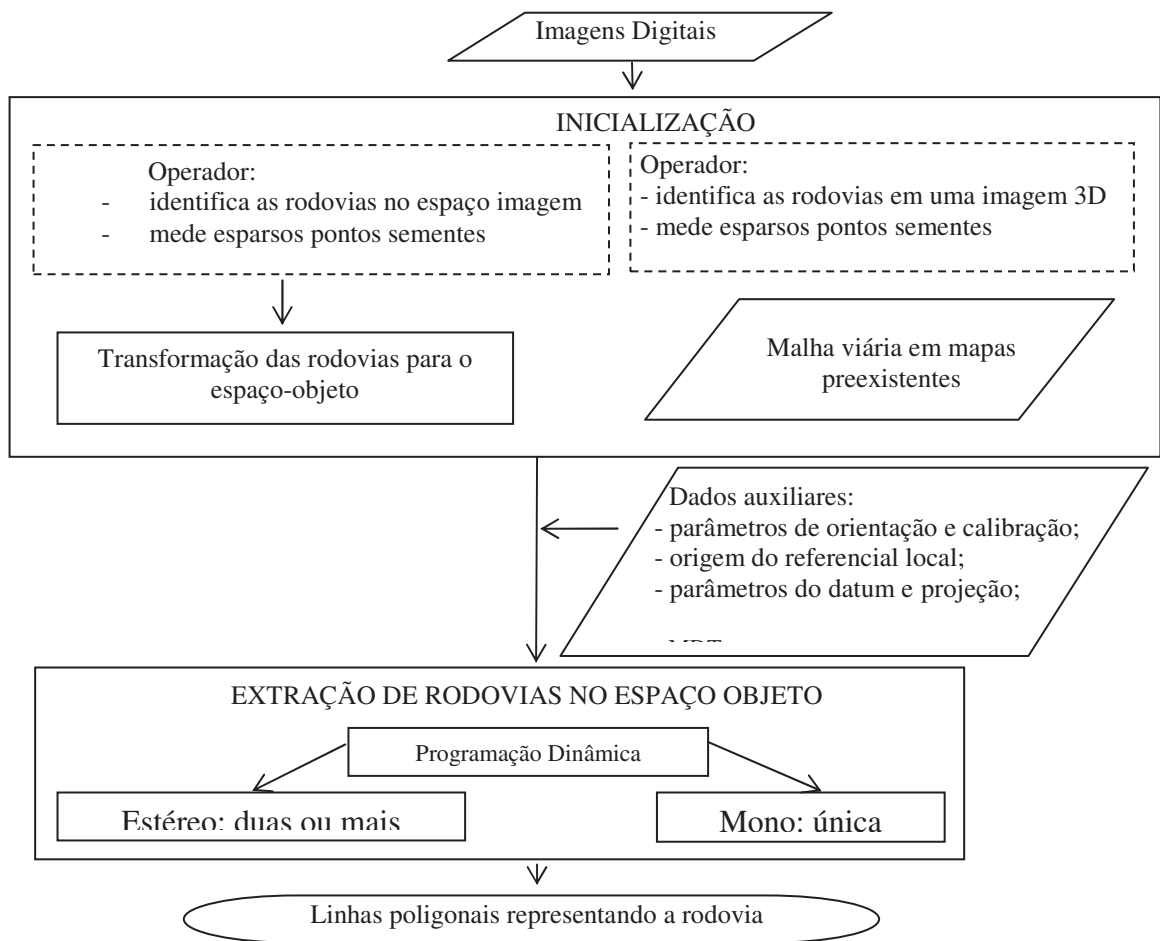


Figura 11 - Fluxograma com as fases de extração da metodologia proposta

A metodologia proposta para a extração de rodovias no espaço objeto depende de uma etapa prévia de preparação, conhecida como inicialização. Qualquer método de concepção semi-automática depende da interferência de um operador para fornecer as informações mínimas para que o método inicie o processo de extração. Como o operador necessita visualizar as rodovias, a fim de identificá-las e medir alguns pontos sementes ao longo das mesmas, uma opção comum é utilizar as próprias imagens de entrada. Estes pontos sementes devem ser transformados para o referencial do espaço objeto onde ocorrerá o processo de extração de feições rodoviárias. Felizmente, o algoritmo de programação dinâmica necessita apenas de posições 3D aproximadas para os pontos sementes, motivo pelo qual é necessário medir os pontos sementes em apenas uma imagem e transformá-los para o

espaço objeto usando a equação de colinearidade inversa, tendo por base apenas uma aproximação topográfica dada por um plano médio.

Uma maneira ainda mais interessante surge quando um Modelo Digital do Terreno (MDT) estiver disponível. Nesse caso, conforme mostrado em Ros et al. (2002), uma ou mais imagens podem ser registradas sobre o MDT a fim de possibilitar a visualização tridimensional das imagens, facilitando ao operador a identificação e a medição dos pontos sementes diretamente no espaço objeto.

Uma outra forma de inicialização, ainda mais atrativa, porque possibilita a inicialização automática é quando a malha viária que se pretende extrair já está georreferenciada, mas com qualidade geométrica inferior a que se pretende gerar. Esse tipo de informação pode ser obtida em mapas preexistentes, em escala menor da que se pretende trabalhar. A inicialização a partir de mapas permite, além da inicialização automática da metodologia proposta, também o refinamento geométrico da malha georreferenciada, podendo então ser compatível com escalas maiores que a original. Todas as possibilidades descritas estão previstas na caixa de inicialização da metodologia.

Como mostra a figura 11, a metodologia de extração de rodovias no espaço objeto necessita, além de pontos sementes descrevendo aproximadamente as rodovias e a própria imagem de entrada, também de outros tipos de dados.

Os parâmetros de orientação interior e exterior são necessários para estabelecer via equação de colinearidade (ou outro modelo matemático) uma rigorosa relação matemática entre os espaços imagem e objeto.

A fim de possibilitar a extração das rodovias diretamente na projeção de mapa, esta relação matemática entre os espaços objeto e imagem deve incluir transformações de coordenadas entre o referencial de projeção de mapa e o referencial cartesiano local, sendo este último geralmente empregado em processos fotogramétricos envolvendo equações de

colinearidade. Portanto, são necessárias as coordenadas de origem do sistema local e os parâmetros do datum e da projeção.

Caso o processo de extração baseie-se em apenas uma imagem, é necessário também um MDT da região.

Na metodologia proposta, pontos sementes advindos de mapas, principalmente em escalas menores do que a que se pretende trabalhar, poderão ser utilizados para inicialização do processo. Nesse caso, o processo de extração passa a ser totalmente automático. Independente da modalidade ser mono ou estéreo, o resultado final é um conjunto de linhas poligonais descrevendo a malha viária.

A figura 11 mostra que a extração de rodovias no espaço objeto pode ser realizada em dois modos básicos, isto é, em mono e estéreo. No modo mono apenas uma imagem é utilizada, aérea ou de satélite. Principalmente no caso de imagens aéreas, é necessário um MDT para uma solução rigorosa. No caso estéreo, o processo de otimização no espaço objeto pode-se basear em duas ou mais imagens aéreas ou de satélite, podendo inclusive fazer combinações entre imagens de diferentes sensores. Os resultados do processo de otimização por PD são linhas poligonais no referencial tridimensional do espaço objeto.

O novo conceito de extração de rodovias no espaço objeto assume dimensões que vão além das que estão relacionadas com o conceito convencional de extração de rodovias no espaço imagem. Algumas das principais diferenças entre as metodologias são:

- a função objetivo deve agora incorporar a relação entre os espaços objeto e imagem, podendo envolver uma imagem ou mais, inclusive de sensores diferentes;
- o processo de otimização é agora realizado no espaço objeto;
- no caso estéreo, um processo de correlação de imagens ocorre simultaneamente com a otimização por PD no espaço objeto;

- a flexibilidade: a-) diferentes modos de extração (mono e estéreo) podem ser implementados; b-) diferentes tipos de imagens (aérea, satélite, radar) podem ser usados, inclusive simultaneamente; c-) diferentes resoluções de imagens (baixa, média, alta) podem ser usadas;
- maior robustez no caso estéreo: por exemplo, uma obstrução perspectiva causada por uma árvore pode estar presente em apenas uma imagem, assim a utilização de um par, em vez de apenas uma imagem, pode ser mais eficiente.

3.4 Modelo para extração 3D

As funções objetivo utilizada por Gruen e Li (1997), Dal Poz (2000), Barros (2001) e Vale e Dal Poz (2003) dependiam de duas variáveis de estado por ponto e tratava o problema utilizando variáveis no domínio da imagem, podendo ser convertida em um somatório de sub-funções que dependem simultaneamente de 6 e 7 variáveis (respectivamente equações 41 e 42).

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1}))] \quad (41)$$

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1}), w_i)] \quad (42)$$

No caso da extração de rodovias em imagens digitais utilizando as funções objetivos mostradas acima tem-se num universo de representação um grafo construído sobre a imagem, (ou pares de imagens) sobre a qual se deseja extrair a feição rodovia. As coordenadas resultantes que representam a feição rodovia extraída são bidimensionais, ainda no espaço imagem (L, C).

A função objetivo utilizada neste trabalho foi modificada. A solução implementada realiza a extração direta no espaço objeto, sendo que o resultado é a terna de

coordenadas (E, N, h) dos pontos extraídos referenciados ao sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) com informações altimétricas. Para a adaptação à equação 42, a fim de que possa ser utilizada na extração da rodovia diretamente no espaço objeto, basta observar que cada ponto no espaço objeto $(P_{(E, N, h)})$ está funcionalmente relacionado com um ponto no espaço imagem $(p_{(L,C)})$. Supondo inicialmente o caso mono, conforme mostra a equação 42, a relação funcional entre os pontos homólogos $p_{(L,C)}$ e $P_{(E, N, h)}$ é conhecida desde que todos os outros parâmetros sejam conhecidos, tais como:

- parâmetros de orientação interior e exterior das imagens;
- parâmetros de calibração;
- parâmetros do datum;
- origem do sistema cartesiano local.

3.5 Modelo de rodovia para extração utilizando uma única imagem

Conforme foi mostrado no Capítulo 2, as coordenadas (L_i, C_i) das equações 42 dependem das seguintes variáveis (V_i) e parâmetros (P_{ar}) :

$$\square P_{ar} = (\lambda_{mc}, a, f_e, \phi_0, \lambda_0, \kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0, A, B, f, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, \epsilon_{45})$$

Onde:

- $\lambda_{mc} \rightarrow$ longitude do meridiano central de um fuso do sistema de coordenadas UTM;
- $a, f_e \rightarrow$ semi-eixo maior e achatamento do elipsóide;
- $\phi_0, \lambda_0 \rightarrow$ origem do sistema geodésico cartesiano local;
- $\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0 \rightarrow$ parâmetros de orientação exterior obtidos previamente através de algum processo de orientação;
- $A, B \rightarrow$ parâmetros de afinidade;
- $f \rightarrow$ distância focal;

- $x_0, y_0 \rightarrow$ coordenadas do ponto principal;
- $K_1, K_2, K_3 \rightarrow$ parâmetros da distorção radial simétrica;
- $P_1, P_2 \rightarrow$ parâmetros da distorção descentrada;
- $\varepsilon_{45} \rightarrow$ coeficiente de refração fotogramétrica;

e,

$$\square V_i = (E_i, N_i, h_i)$$

Assim, sendo p_i um ponto qualquer do espaço imagem, tem-se:

$$\left[\begin{array}{l} L_i(P_{ar}, V_i) \\ C_i(P_{ar}, V_i) \end{array} \right] \rightarrow p_i(L_i(P_{ar}, V_i), C_i(P_{ar}, V_i))$$

Como a terna de parâmetros (P_{ar}) é considerada conhecida, pode-se expressar o ponto imagem p_i apenas em função da incógnita V_i , sendo:

$$p_i(L_i(V_i), C_i(V_i)) \quad \text{ou} \quad p_i(L_i(E_i, N_i, h_i), C_i(E_i, N_i, h_i)) \quad (43)$$

Considerando a expressão 43 na equação 42, pode-se escrever:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(L_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), C_i(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})), p_i(L_i(E_i, N_i, h_i), C_i(E_i, N_i, h_i)), p_{i+1}(L_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), C_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_i)) \quad (44)$$

Onde $Escala = \frac{w}{W}$, w - largura da feição rodovia na imagem e W - largura da rodovia no

espaço objeto, então $w = Escala \times W$.

A equação 44 mostra que a estrutura básica da equação 42 foi preservada. Isto é, apenas três pontos seqüenciais da linha poligonal representando a rodovia no espaço objeto estão inter-relacionados simultaneamente. A diferença é que agora tem-se dez variáveis inter-relacionadas simultaneamente em vez de sete da equação 42.

A equação 43 mostra claramente que a função objetivo depende simultaneamente das coordenadas de três pontos sucessivos da linha poligonal que descreve a rodovia no espaço objeto, isto é : $P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})$, $P_i(E_i, N_i, h_i)$ e $P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})$.

Dessa forma a equação 44 pode ser reescrita na maneira:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_i) \quad (45)$$

A equação 45 não possui solução única, pois pode-se ter infinitos pontos P_i , como também P_{i-1} e P_{i+1} com o mesmo ponto imagem. A equação tem solução única somente se um MDT estiver disponível. De fato a equação 45 torna-se consistente para aplicação se informações de altura forem conhecidas em função das posições planimétricas, isto é $h_i=f(E_i, N_i)$. Nestas condições, a equação 45 é reduzida a expressão:

$$E = \sum_{i=1} [E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}), P_i(E_i, N_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}), W_i)] \quad (46)$$

A equação 46 relaciona simultaneamente apenas sete variáveis, contra dez da equação 45, além dessa redução de variáveis ser atrativa computacionalmente, a equação resultante é a base para o problema de monorestituição semi-automática de rodovias. Entretanto, diferentemente das soluções convencionais para monorestituição (DAL POZ, 1996; MITISHITA et al., 2004), a metodologia proposta integra num único processo as etapas de extração de feições e projeção para o espaço objeto. Além disso, permite resolver o problema diretamente no referencial híbrido (E, N, h), com todo o rigor matemático. Possui também potencial de aplicação mais amplo, como no refinamento geométrico de malha viária preexistente e em escala menor.

A figura 12 ilustra o processo de extração da feição rodovia envolvendo uma única imagem. Nesse caso a coordenada altimétrica h resulta de uma interpolação no MDT disponível. Pode-se dizer que o processo consiste em rastrear a rodovia sobre o

MDT, tendo por base um rigoroso relacionamento matemático entre pontos do espaço objeto e imagem, além das informações fotométricas medidas nas imagens.

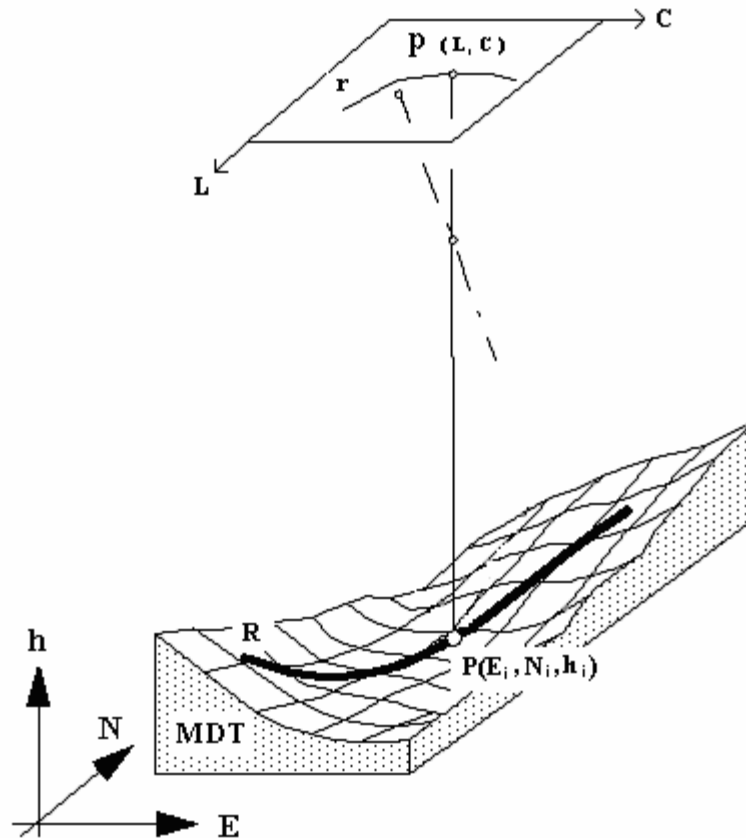


Figura 12 – Extração da rodovia no espaço objeto (caso de uma única imagem)

3.5.1 Inserção e eliminação de vértices da linha poligonal representando a rodovia

Antes do início do processo de otimização para a extração de uma determinada rodovia, esta é aproximada por uma linha poligonal, cujos vértices são os pontos sementes fornecidos pelo operador. Estes pontos sementes são inicialmente coletados sobre a imagem e transformados para o referencial do espaço objeto onde ocorrerá o processo de otimização. Como a quantidade de pontos sementes é geralmente pequena, a simples aplicação do algoritmo de PD não produz uma boa descrição do eixo da rodovia. Assim, é necessário adensar iterativamente a linha poligonal inicial. O primeiro adensamento é realizado na linha poligonal projetada no plano $h=0$. Entre cada par de vértices preexistentes

dessa linha poligonal são interpolados pontos médios, resultando numa linha poligonal adensada e plana. Em cada vértice, são determinadas janelas de busca que se estendem ortogonalmente a esquerda e a direita da linha poligonal plana. Cada janela de busca é constituída por pontos (E_i, N_i) amostrados a uma distância regular entre eles, sendo que para cada ponto (E_i, N_i) é interpolada uma altura h_i , o que equivale a ter $h_i=f(E_i,N_i)$, sendo f uma função de interpolação. Durante o processo de otimização por PD, cada vértice (E_i, N_i) da linha poligonal desliza ao longo das respectivas janelas de busca, parando quando o máximo da função objetivo (equação 46) for encontrado. Vale ressaltar que cada realização do vértice (E_i, N_i) está conectada com a superfície do MDT via altura h_i . Assim, o resultado das primeiras otimizações é uma linha poligonal sobre o MDT.

As otimizações seguintes seguem o mesmo princípio descrito acima. Em cada iteração, primeiramente se realiza um novo adensamento, conforme descrito acima, seguido de nova otimização por PD. Ao longo do processo iterativo de otimização, os vértices colineares aos vizinhos são eliminados, sendo que o processo converge quando novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal representando o eixo da rodovia. A função interpoladora $h_i=f(E_i,N_i)$ utilizada no processo de otimização foi a *thin plate spline* (TPS) que foi descrita detalhadamente no Capítulo 2.

3.6 Modelo para extração de múltiplas imagens

Para o caso de duas ou mais imagens, pode-se desenvolver também uma equação com a mesma estrutura da equação 45, a qual pode ser utilizada diretamente para extrair rodovias no espaço objeto.

Portanto, o algoritmo da programação dinâmica poderá ser aplicado em casos de uma única imagem (mono) ou em casos de múltiplas imagens (estéreo). A solução

para o caso estéreo é mostrada a seguir. A equação 45 pode ser escrita para um par de rodovias homólogas presentes num esteréopar de imagens, como segue:

$$E^e = E^e_1(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2)) + E^e_2(P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), P_3(E_3, N_3, h_3)) + \dots + E^e_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_i) \quad (47)$$

$$E^d = E^d_1(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_1(E_2, N_2, h_2)) + E^d_2(P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), P_3(E_3, N_3, h_3)) + \dots + E^d_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_i) \quad (48)$$

Somando-se as equações 47 e 48, obtém-se:

$$E^T = E^d + E^e$$

$$E^T = [E^e_1(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2)) + E^d_1(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2))] + \dots + [E^e_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_i) + E^d_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), W_i)] \quad (49)$$

Pela equação 49, nota-se que as quantidades entre colchetes dependem de três pontos sucessivos da linha poligonal que descreve a rodovia no espaço objeto. Assim,

$E^e_1(\dots) + E^d_1(\dots)$ depende apenas de P_0, P_1 e P_2 , $E^e_i(\dots) + E^d_i(\dots)$ depende apenas de $P_{i-1}, P_i,$

P_n e P_{i+1} e $E^e_{n-1}(\dots) + E^d_{n-1}(\dots)$ depende de P_{n-2}, P_{n-1}, P_n . Denotando-se estas parcelas por

$E^T_1(P_0(E_0, N_0, h_0), P_i(E_i, N_i, h_i), P_2(E_2, N_2, h_2)), E^T_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}))$ e

$E^T_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n))$ pode-se escrever:

$$\left\{ \begin{array}{l} E^T_1(P_0(E_0, N_0, h_0), P_i(E_i, N_i, h_i), P_2(E_2, N_2, h_2)) = E^e_1(\dots) + E^d_1(\dots) \\ E^T_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})) = E^e_i(\dots) + E^d_i(\dots) \\ E^T_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n)) = E^e_{n-1}(\dots) + E^d_{n-1}(\dots) \end{array} \right. \quad (50)$$

Assim, pode-se escrever a equação 49 na forma:

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E^T_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_i) \quad (51)$$

Esta equação mostra que a estrutura da equação 36 foi preservada podendo ser utilizada diretamente para extração de rodovias no espaço objeto, pois possui uma forma adequada para ser resolvida pelo algoritmo de programação dinâmica.

São várias as justificativas para a definição de E^T como a soma de E^e e E^d .

Por exemplo:

- Como as quantidades E^e e E^d são positivas e máximas para as linhas poligonais homólogas representando rodovias homólogas presentes no estereopar de imagens, o problema a ser resolvido continua sendo o de encontrar o máximo de E^T . Isto é, a linha poligonal no espaço objeto que representa uma determinada rodovia corresponde a um máximo de E^T .
- Outras possibilidades, como o produto entre E^e e E^d manteriam a solução pelo máximo, mas alterariam toda estrutura das equações originais. Assim, o algoritmo de programação dinâmica não seria adequado.

A figura 13 mostra o processo de extração da feição rodovia envolvendo um par estéreo de imagens aéreas. Nesse caso, as rodovias homólogas (r e r') podem ser mapeadas diretamente para o espaço objeto (R) usando o algoritmo de programação dinâmica. Este conceito pode ser facilmente generalizado para casos envolvendo mais de duas imagens. Outra possibilidade é o uso de outros tipos de imagens, como imagens do satélite Ikonos.

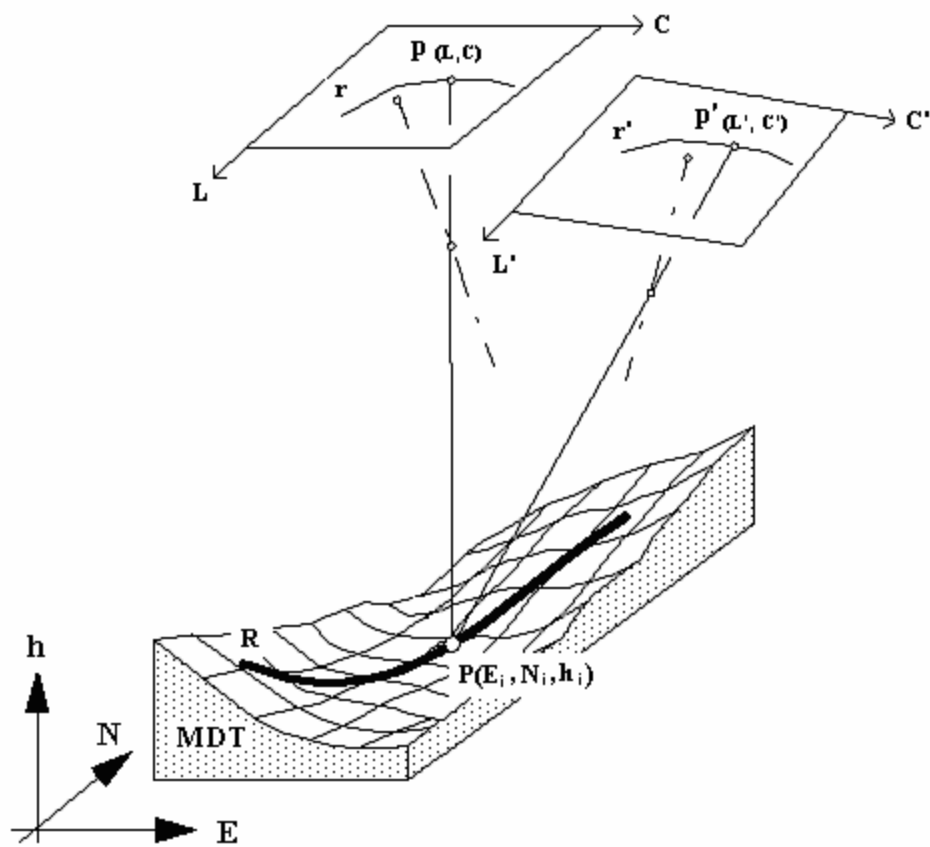


Figura 13 – Extração da rodovia no espaço objeto (caso para duas ou mais imagens)

4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos com o processo de extração de rodovias usando programação dinâmica no espaço objeto, assim como os materiais e equipamentos utilizados e os pormenores das diversas fases que compõem a metodologia desenvolvida.

Conforme mostrado na figura 11 do Capítulo 3, a extração de rodovias utilizando a metodologia desenvolvida pode ser realizada utilizando uma imagem (caso mono) ou várias imagens (caso estéreo da metodologia), sendo que cada etapa é realizada separadamente.

Os resultados obtidos com a utilização do método são analisados visual e numericamente. Na análise visual, os eixos extraídos utilizando tanto o caso mono quanto o estéreo são sobrepostos nas imagens utilizadas na extração, devendo ser analisados por um operador humano, verificando, por exemplo, se o eixo encontra-se posicionado no centro da rodovia extraída ou verificar se o mesmo tangencia a borda da rodovia em algum ponto da mesma. Na análise numérica as rodovias são classificadas de acordo com a largura correspondente (em pixels) e para cada extração realiza-se o cálculo da discrepância média entre as malhas extraídas semi-automaticamente e manualmente (sendo que o eixo de rodovia da malha extraída manualmente é materializado no centro da rodovia em questão). Sendo n o número de elementos na amostra e $e_i = 1, \dots, n$, as distâncias entre os pontos correspondentes da rodovia extraída e de referencia, matematicamente este conceito pode se expresso por:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}.$$

4.2 Ambiente computacional

A metodologia de extração de rodovias utilizando programação dinâmica no espaço objeto foi desenvolvida em linguagem C++ orientada a eventos utilizando os compiladores Borland C++ 5 e Delphi 5 no sistema operacional Windows XP em um computador Pentium IV, com 1GB de memória RAM e 3 discos rígidos com capacidade totalizadora de 196GB.

4.3 Dados utilizados nos experimentos

Os dados utilizados nos experimentos realizados usando a metodologia desenvolvida foram: imagens aéreas que fazem parte de um projeto demonstrativo do sistema fotogramétrico Leica Photogrammetry Suíte (LPS) e também um estéreopar de imagens provenientes de um vôo realizado sobre a cidade de Assis/SP cedidas por Costa (2006). A tabela 10 sintetiza as características das imagens utilizadas nos experimentos.

Além das imagens, são necessários também os parâmetros de orientação interior e exterior, pontos com coordenadas conhecidas e modelos digitais do terreno. A dimensão e escala dos modelos digitais utilizados são mostrados na tabela 11, sendo que todos os dados citados foram fundamentais para o teste e avaliação da metodologia desenvolvida.

Também foi utilizado um mapa digital da área das imagens do LPS, na escala 1:2000 nos experimentos de inicialização automática da metodologia. Este mapa foi elaborado por Silva (2005), e apresenta acurácia planimétrica de 0,6 m e altimétrica de 0,8 m.

Tabela 10 – Características das imagens utilizados nos experimentos

	Imagens utilizadas		escala
	Dimensões da imagem (pixel)		
Região	altura	largura	
Suíça	9286	9496	1:9200
Assis	5440	4080	1:5000

Tabela 11 – Características dos modelos digitais de terreno utilizados

	MDTs utilizados	
	dimensão (largura x altura)	
Região	dimensão - metros	resolução
Suíça	5550 x 4450	5 m
Assis	720 x 750	1 m

As imagens aéreas usadas nos experimentos não foram reamostradas. Na configuração atual do computador no qual o método de extração foi desenvolvido e os experimentos realizados, verificou-se que a utilização das mesmas na resolução original (9286 x 9496) não fazia com que o custo computacional se tornasse proibitivo. Um exemplo de uma imagem utilizada nesta pesquisa é mostrada na figura 14.

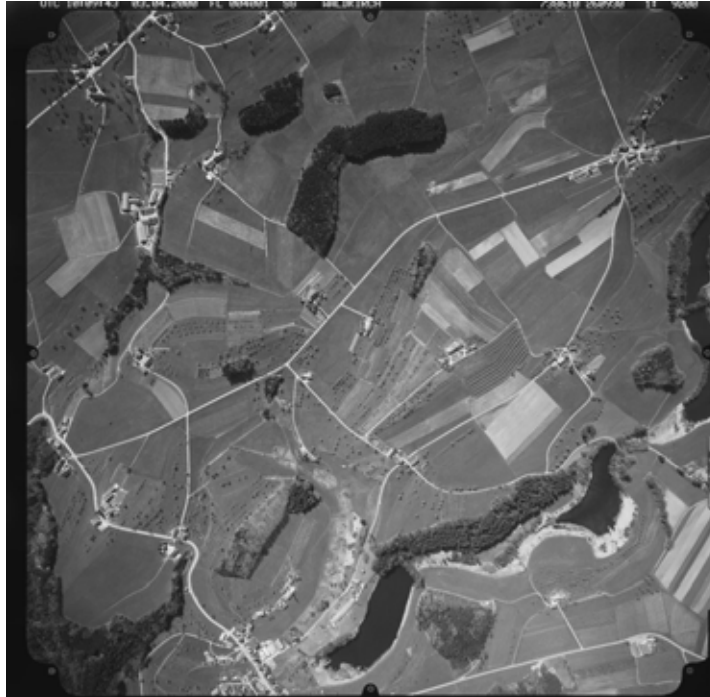


Figura 14 – Imagem aérea utilizada nos experimentos da região na Suíça

Na figura 15 é mostrado uma visualização hipsométrica do MDT utilizado nos testes realizados neste trabalho com as imagens do Leica Photogrammetry Suite[®].

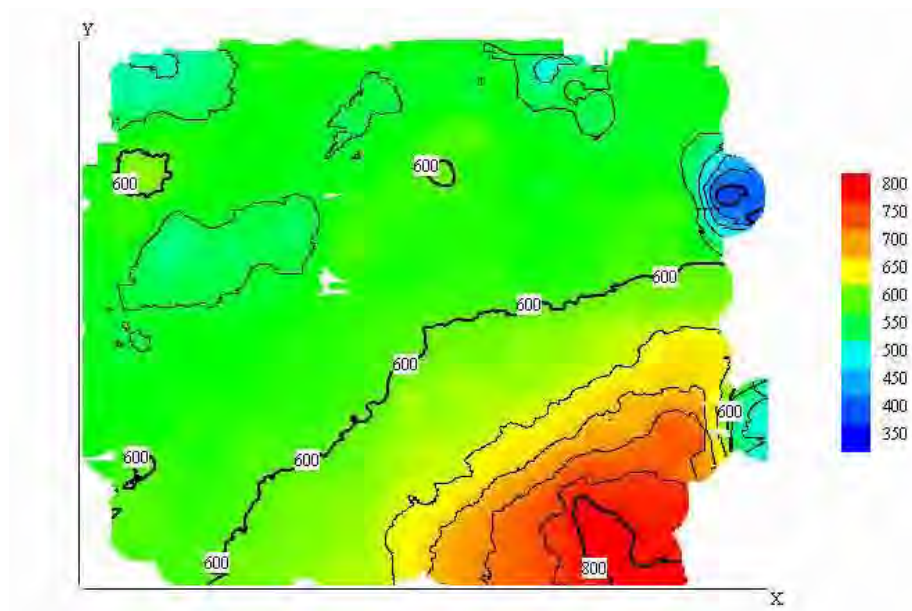


Figura 15 – Visualização hipsométrica do MDT utilizado nos experimentos realizados com as imagens da Suíça

4.4 Programas desenvolvidos para a implementação computacional da metodologia proposta

Foram desenvolvidos programas e rotinas computacionais referentes às fases preparatórias decorrentes da aplicação da metodologia do processo fotogramétrico, mas que são de fundamental importância para o desenvolvimento da metodologia proposta.

Algumas implementações existentes foram utilizadas, como por exemplo uma classe de operadores de borda (VALE, 2003) e outra de transformação de coordenadas – TTransCoord (SILVA, 2005).

Os tópicos que estão relacionados com a orientação de imagens, o tratamento de erros sistemáticos, modelos fotogramétricos, referenciais e as transformações de coordenadas nos espaços imagem e objeto e entre espaços têm seus modelos matemáticos explicitados no Apêndice A.

A figura 16 mostra o conjunto de programas desenvolvidos que formam a metodologia de extração de rodovias .

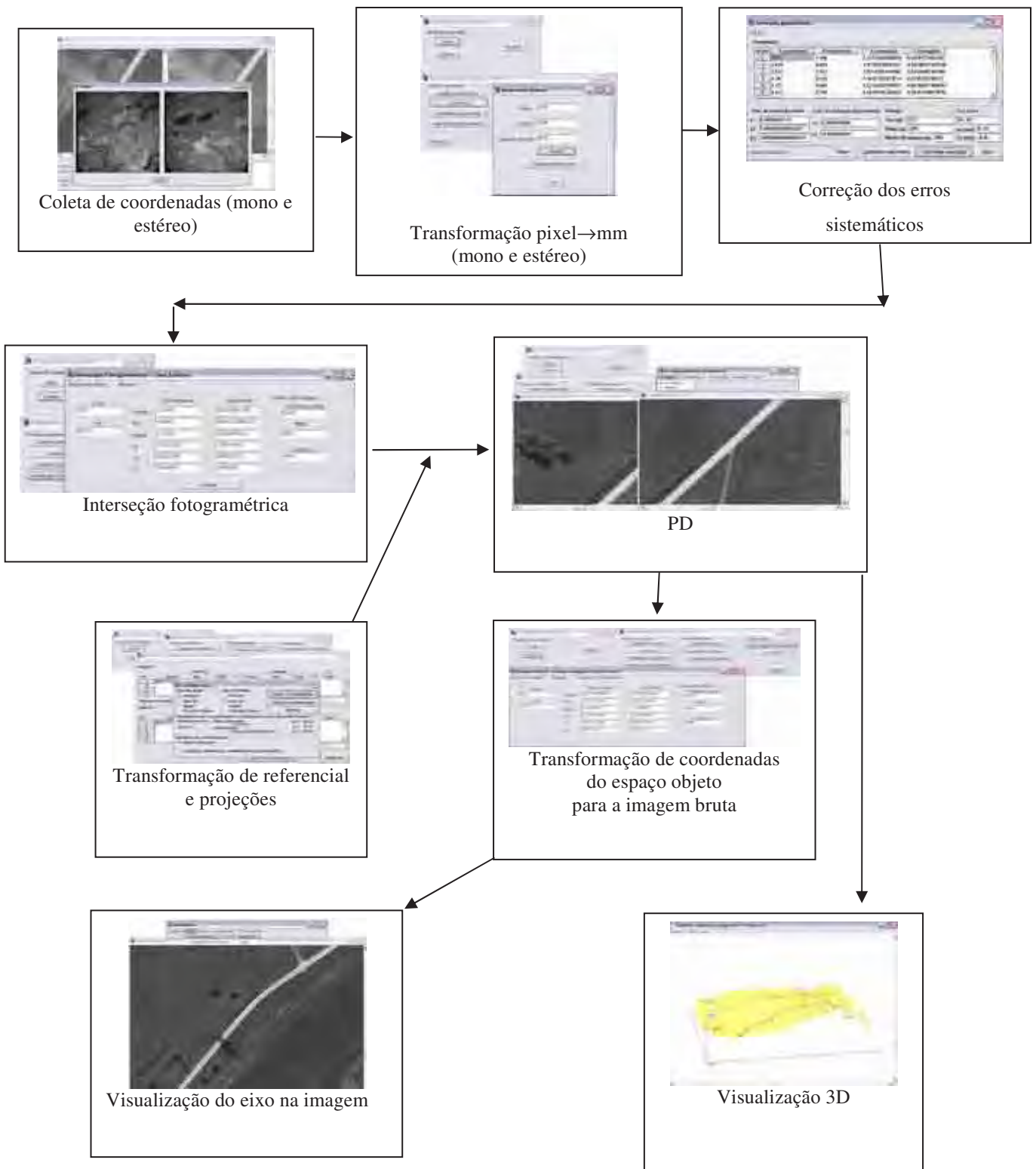


Figura 16 – Programas e rotinas desenvolvidas

4.4.1 Coleta de coordenadas nas imagens

A coleta dos pontos sementes, ainda no sistema de coordenadas da imagem, é realizada na interface que foi desenvolvida para esse fim ou em qualquer programa que abra a imagem e permita a visualização das coordenadas dos pixels referentes à feição rodovia. Nessa interface é feita a abertura das imagens e a coleta dos pontos é realizada selecionando-se os pixels próximos ou sobre a feição de interesse (no caso as rodovias). No caso do estéreo-par devem-se coletar pontos homólogos sobre as rodovias nas duas imagens.

4.4.2 Transformação das coordenadas de pixel para milímetro

Após a coleta das coordenadas dos eixos centrais das rodovias, é necessária a transformação das coordenadas em pixel para milímetro para utilizá-las posteriormente na etapa da interseção fotogramétrica.

4.4.3 Correções dos erros sistemáticos

A respeito dos erros sistemáticos e suas fontes, deve-se identificá-los e através de modelos matemáticos, realizar a correção dos mesmos. Esta modelagem introduz diversos parâmetros tais que permitam a reconstrução da geometria projetiva no instante da foto, e sua determinação se dá através de um processo de calibração (MACHADO et al., 2004). A correção dos erros sistemáticos neste trabalho foi realizada através da implementação de um módulo denominado Correções Geométricas. A correção dos erros sistemáticos não tem uma relevância tão significativa neste trabalho, pois a posição dos pontos sementes no espaço objeto pode ser aproximada.

4.4.4 Transformação de referencial

Foi desenvolvido um módulo que permite a transformação de coordenadas no espaço objeto, que se encontra em um determinado referencial geodésico para outro referencial (por exemplo WGS-84 para SAD-69) e também realiza transformações de sistemas de coordenadas, por exemplo, do sistema UTM para o sistema Cartesiano Local.

4.4.5 Interseção Fotogramétrica

Interseção fotogramétrica refere-se à determinação da posição do ponto no espaço objeto pela interseção de feixes de raios para duas ou mais imagens. A solução para este problema geralmente baseia-se na equação de colinearidade direta, com duas equações para cada imagem de um ponto. Quando duas imagens estão disponíveis, o sistema equações de observação é formado por um total de 4 equações contendo 3 incógnitas, permitindo assim a obtenção das coordenadas de um ponto no espaço objeto com um grau de liberdade. O conjunto de equações linearizadas pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados. Adicionando mais imagens ao sistema, aumenta-se o número de graus de liberdade e conseqüentemente a solução é mais confiável, visto que as correspondências erradas podem ser detectadas.

Coordenadas aproximadas do ponto, calculadas por projeção de um único raio ou por cálculos de interseção aproximada, devem ser fornecidas para iniciar o processo iterativo, assim como parâmetros de orientação exterior e interior das imagens. De posse dos parâmetros de orientação exterior da imagem, utilizou-se o módulo de interseção fotogramétrica para transformação dos pontos sementes para o sistema do espaço objeto.

4.4.6 Programação Dinâmica

A extração da malha viária realizada via programação dinâmica é baseada na resolução do modelo matemático de rodovia. O problema consiste em encontrar o máximo da função objetivo através da técnica de otimização global por algoritmo de programação dinâmica. Na estratégia proposta neste trabalho, utilizou-se a expressão 45 apresentada no Capítulo 3.

Para a execução do programa na fase mono, é necessária a leitura do MDT que será utilizado para interpolação das coordenadas altimétricas dos pontos obtidos pelo algoritmo de programação dinâmica.

4.4.7 Transformação de coordenadas do espaço objeto para imagem bruta

Foi implementado um módulo que realiza a transformação dos vértices de rodovia extraídos pela programação dinâmica no sistema do espaço objeto (UTM) para a imagem digital (Linha, Coluna). A partir dessa transformação é possível visualizar os eixos extraídos na imagem utilizada para testar o algoritmo, como mostrado na figura 17.

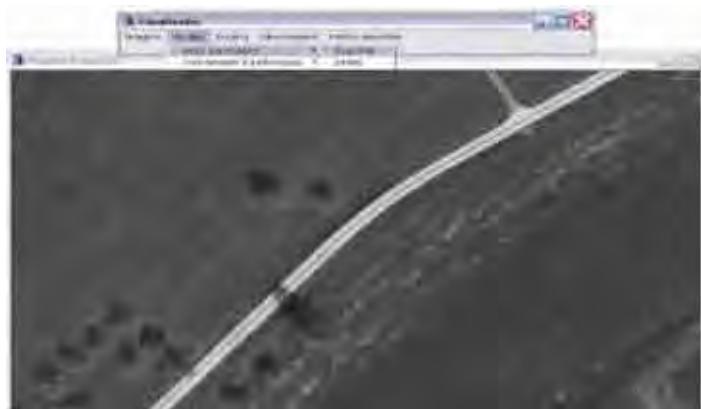


Figura 17 – Visualização do eixo extraído na imagem

4.5 Experimentos realizados e análise dos resultados obtidos

Para avaliação da metodologia desenvolvida foram realizados 4 experimentos com dois conjuntos de dados. O primeiro conjunto de dados possui imagens aéreas digitais, parâmetros de orientação exterior e pontos no terreno, provenientes do sistema fotogramétrico digital LPS – Leica Photogrammetry Suíte[®], de uma região da Suíça, juntamente com um modelo digital do terreno da região e foram realizados três experimentos (mono e estéreo).

No segundo conjunto de dados (um par de imagens da região de Assis, assim como seu conjunto de parâmetros de orientação exterior e modelo digital do terreno) realizou-se um experimento (mono e estéreo).

Analisando estas imagens pode-se encontrar uma série de argumentos favoráveis e desfavoráveis para realizar a extração por PD. Os argumentos favoráveis são que as rodovias presentes nas imagens apresentam grandes trechos de bordas bem definidas, largura regular e ótimo contraste em relação à paisagem presente na cena. Os desfavoráveis são algumas obstruções encontradas ao longo da cena como: sombra de árvores cobrindo parcialmente a rodovia e algumas áreas urbanas ou suburbanas onde a metodologia não consegue realizar a extração correta do eixo, visto que foi desenvolvida para extração de rodovias presentes em área rural. Na figura 18 é mostrada uma compilação dos pontos favoráveis e desfavoráveis encontrados nas imagens utilizadas nos experimentos para a aplicação da metodologia de extração de rodovias.

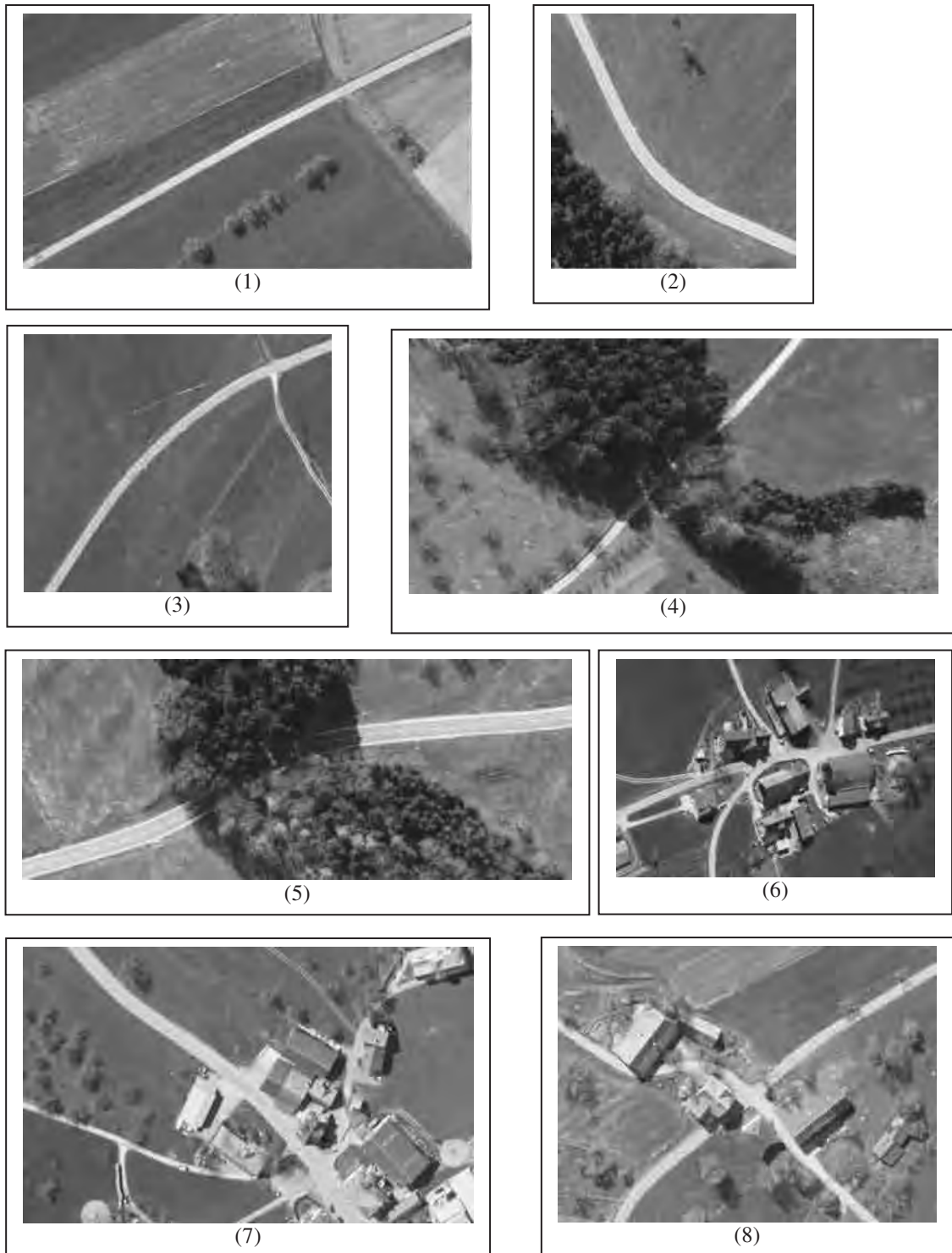
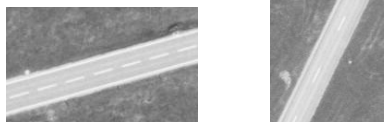
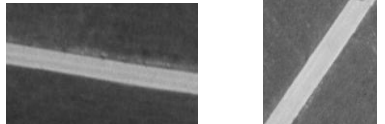
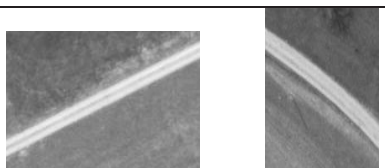


Figura 18 – Exemplos de pontos favoráveis e desfavoráveis à utilização da metodologia de extração de rodovias (1-3 → rodovias que apresentam bordas e larguras regulares; 4-5 →obstrução causada por sombras de árvores; 6-8 → rodovias em regiões urbanas e suburbanas)

Antes da realização dos experimentos foi feita uma classificação simples dos tipos de rodovias existentes nas imagens, levando em conta somente a largura das rodovias e não critérios como conectividade, infra-estrutura, etc. As rodovias foram classificadas conforme mostra a tabela 12.

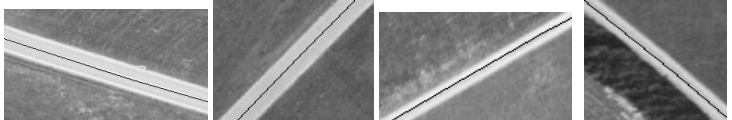
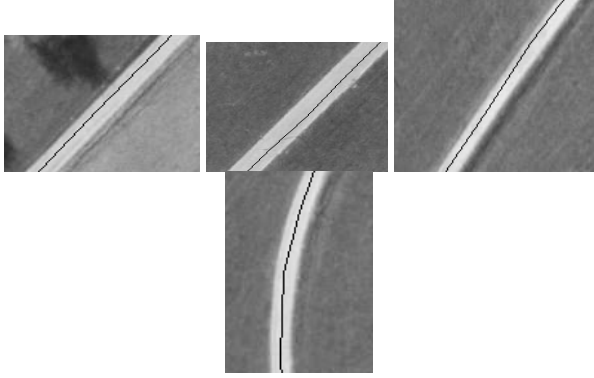
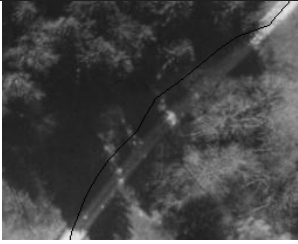
O objetivo é verificar o desempenho do método frente às diferentes faixas de largura de rodovias presentes na imagem de alta resolução.

Tabela 12 - Classificação das rodovias existentes nas imagens

Classificação	Largura (pixels)	Imagem
Rodovia principal	38 - 30	
Rodovia secundária	29 - 20	
Rodovia terciária	19 - 15	

Foi realizada também uma classificação da qualidade do eixo extraído através de análise visual dos mesmos sobrepostos as imagens utilizadas nos experimentos. Criou-se 3 classes para a classificação da extração: ótima, boa/satisfatória/aceitável, ruim/descartável. Os critérios utilizados para criação das classes foram os seguintes: se o eixo encontrava-se dentro da rodovia e estava bem próxima do eixo real a extração é classificada como ótima, se o eixo encontrava-se dentro da rodovia, mas deslocado do eixo real ou tangenciando alguma das margens a extração é classificada como boa/satisfatória/aceitável e por último, se o eixo encontrava-se fora da rodovias ou totalmente em cima de alguma das margens da rodovia a extração é classificada como ruim/descartável. A tabela 13 mostra como foi realizada a classificação.

Tabela 13 - Classificação da extração do eixo através da análise visual

Classificação da extração do eixo através da análise visual - Conceito	Exemplo na imagem (análise visual)
Ótima	
Boa / Satisfatória / Aceitável	
Ruim / Descartável	

Nos experimentos realizados, mostrados a seguir, o objetivo foi verificar o comportamento dos algoritmos desenvolvidos na metodologia para realizar a extração de rodovias presentes em áreas rurais. Devido à resolução das imagens, não foi possível colocá-las inteiramente, sendo que as figuras ilustram cenas das rodovias extraídas em áreas rurais existentes nas imagens do sistema LPS e nas imagens de Assis. Tendo como base os critérios estabelecidos na tabela 13 e analisando as figuras com os eixos sobrepostos às imagens, pode ressaltar a boa qualidade dos eixos extraídos nos quatro experimentos realizados.

4.5.1 Experimento - 1

Neste experimento utilizou-se um estéreopar proveniente do LPS, no qual o objetivo foi realizar a extração de uma rodovia classificada como principal (largura de 38 pixels) utilizando o algoritmo de extração de rodovias no espaço-objeto para extração de duas ou mais imagens (caso estéreo) e também o algoritmo para uma única imagem (caso mono). Ressalta-se que para a obtenção dos resultados mostrados a seguir, foi necessária a execução das etapas mostradas na figura 16 e descritas no tópico 4.4.

Na figura 19 são mostradas as imagens utilizadas e nas janelas extraídas da imagem original (figuras 20 e 21) é possível verificar os resultados alcançados na etapa de extração, pela visualização do eixo extraído sobreposto às rodovias na imagem.

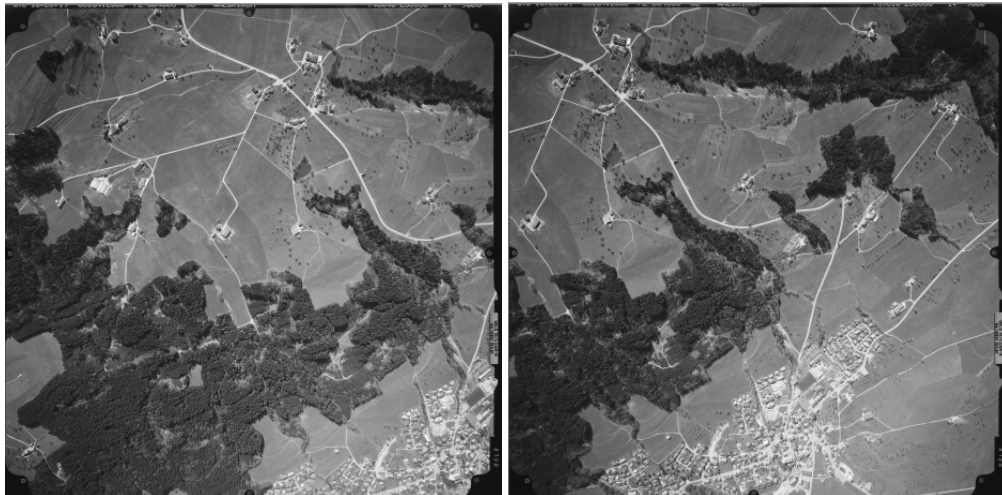


Figura 19 – Imagens utilizadas



Figura 20 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)



Figura 21 – Visualização do eixo extraído na imagem (continuação da imagem 20)

Após a extração, foi realizado o cálculo das discrepâncias médias das extrações. Os procedimentos utilizados para o cálculo foram os seguintes:

- 1) Abrir a imagem com o eixo extraído sobreposto à mesma no programa Paint Shop Pro 9 e desenhar um eixo que materialize o eixo central da rodovia, que será utilizado como referência.
- 2) Depois, em alguns pontos ao longo da rodovia, verificar a diferença em pixels entre o eixo de referência e o eixo extraído e computar esta diferença.

Na imagem 22 verifica-se o procedimento utilizado para contagem dos pixels entre os eixos.

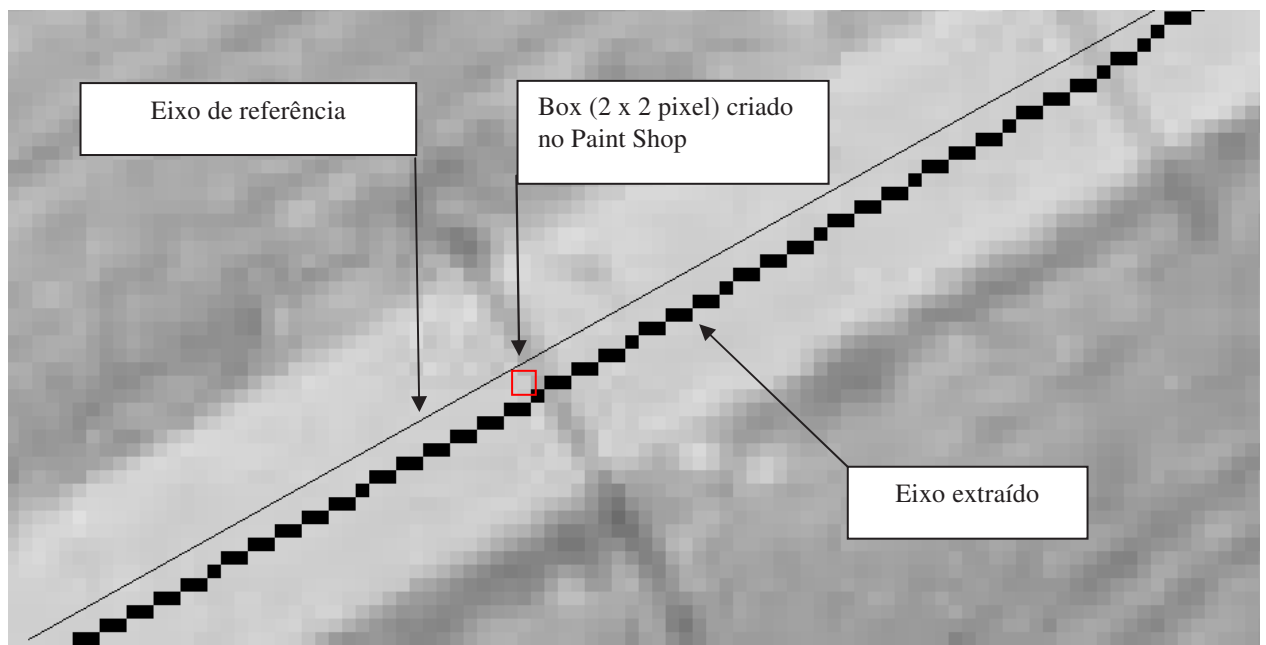


Figura 22 – Visualização do eixo extraído e do eixo de referência na imagem

A discrepância média para esta extração ficou por volta de 1,25 m (5 pixels), sendo que o tamanho do pixel no terreno corresponde a 25 cm.

Ainda no experimento 1, foi realizada a extração utilizando o algoritmo de PD com otimização no espaço objeto para extração com uma única imagem (caso mono), onde se utilizou o MDT da região. No teste mono, foi selecionada e extraída a mesma rodovia do teste estéreo, para posterior comparação dos dois métodos. A figura 23 mostra o resultado

da extração mono, com cenas mostrando os eixos sobrepostos à imagem principal. A discrepância média deste teste ficou em 1 m (4 pixels).

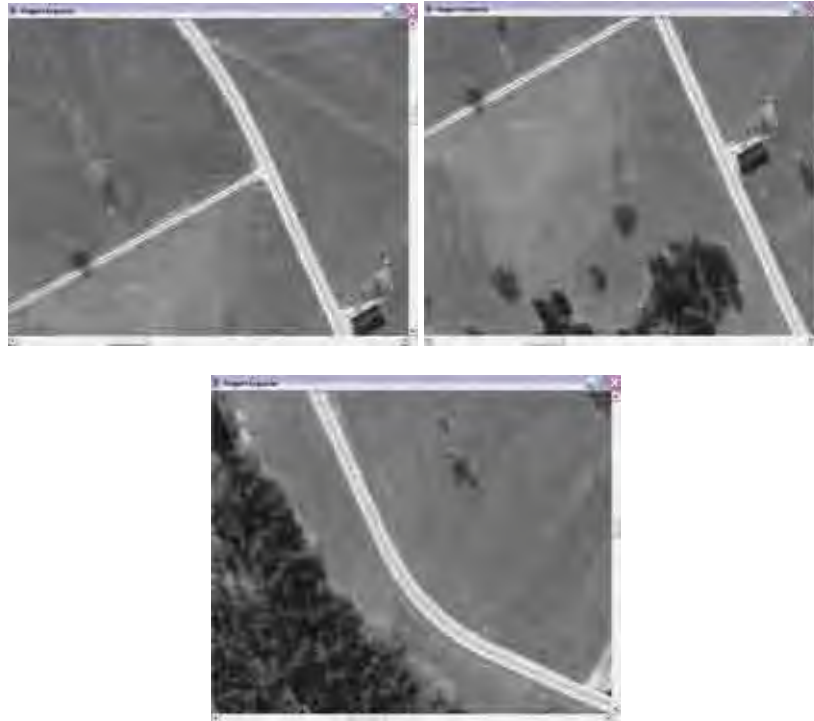


Figura 23 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)

Após o término do processo de extração das rodovias nas metodologias mono e estéreo, de posse das coordenadas dos pontos extraídos (E, N e h), criou-se o perfil utilizando a componente altimétrica (h) de ambas as extrações.

As figuras 24 e 25 mostram os perfis resultantes das extrações nos casos mono e estéreo respectivamente.

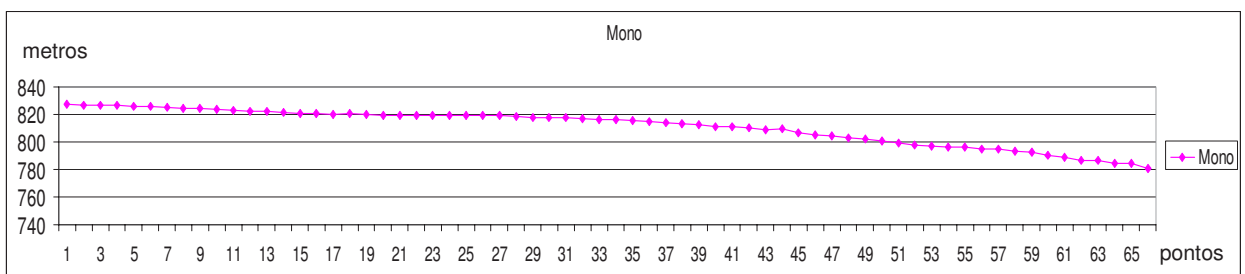


Figura 24 – Perfil da rodovia na extração do caso mono

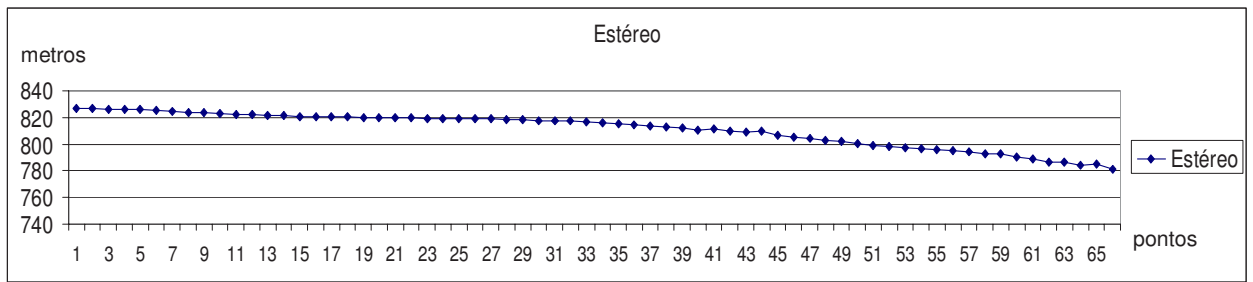


Figura 25 – Perfil da rodovia no caso estéreo

A figura 26 mostra os dois perfis sobrepostos no mesmo gráfico para fins de comparação da coordenada altimétrica h obtida pelas duas metodologias de extração. Esta verificação é necessária visto que as formas de obtenção da altimetria são diferentes para cada método. Enquanto no método de extração utilizando apenas uma imagem a altimetria é extraída via interpolação por *thin plate spline* em um MDT, no caso estéreo, a coordenada altimétrica vem de uma modificação executada no modelo de rodovias. Nesse exemplo, pode-se notar que ambos os perfis mostram o mesmo comportamento, apesar das diferentes formas de como foram extraídos. A maior diferença altimétrica encontrada entre os perfis é de 62 cm, no ponto 10.

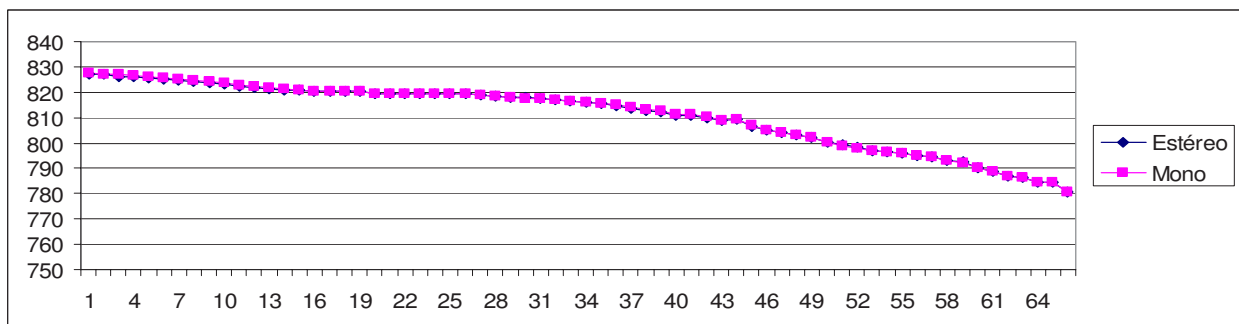


Figura 26 – Comparação entre perfis da extração mono e estéreo

Na figura 27 é mostrado um gráfico com a diferença entre as discrepâncias médias das duas extrações. O valor da diferença é de 25 cm, sendo que a extração mono apresentou o valor de discrepância média na menor (1 m) na planimetria.

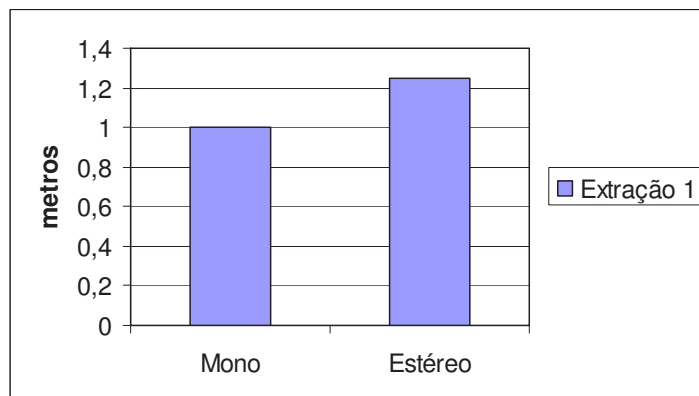


Figura 27 – Comparação entre as discrepâncias médias na planimetria da extração mono e estéreo

Alguns problemas foram encontrados em algumas situações, nos eixos de rodovias extraídos. Verifica-se que irregularidades nas bordas, mudanças bruscas na largura, presença das junções entre duas rodovias e curvaturas acentuadas, fazem com que o eixo extraído sofra um deslocamento e em algumas situações tangencie uma das bordas da rodovia.

A presença de alguns obstáculos, como grandes áreas de sombras (figura 28), ou obstruções causadas por projeção do telhado de casas ou árvores na rodovia, faz com que a extração do eixo não seja realizada com sucesso e o eixo extraído não corresponde ao eixo correto.



Figura 28 – Exemplo de problemas encontradas na extração do eixo no experimento mono

4.5.2 Experimento – 2

Neste experimento utilizou-se outro estéreo par proveniente do LPS, onde o objetivo foi realizar a extração de uma rodovia classificada como secundária (largura de 28 pixels), e também foram utilizados os dois modos de extração desenvolvidos (mono e estéreo).

Na figura 29 são mostradas as imagens utilizadas e na figura 30 é possível verificar resultados alcançados nesta etapa de extração pela visualização do eixo extraído sobreposto as imagens.

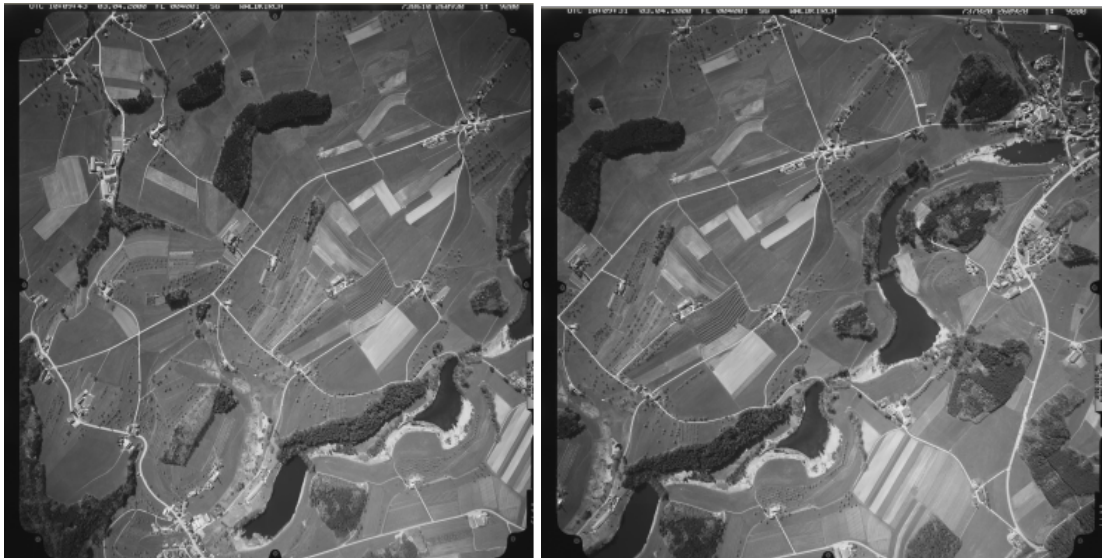


Figura 29 – Imagens utilizadas no teste 2

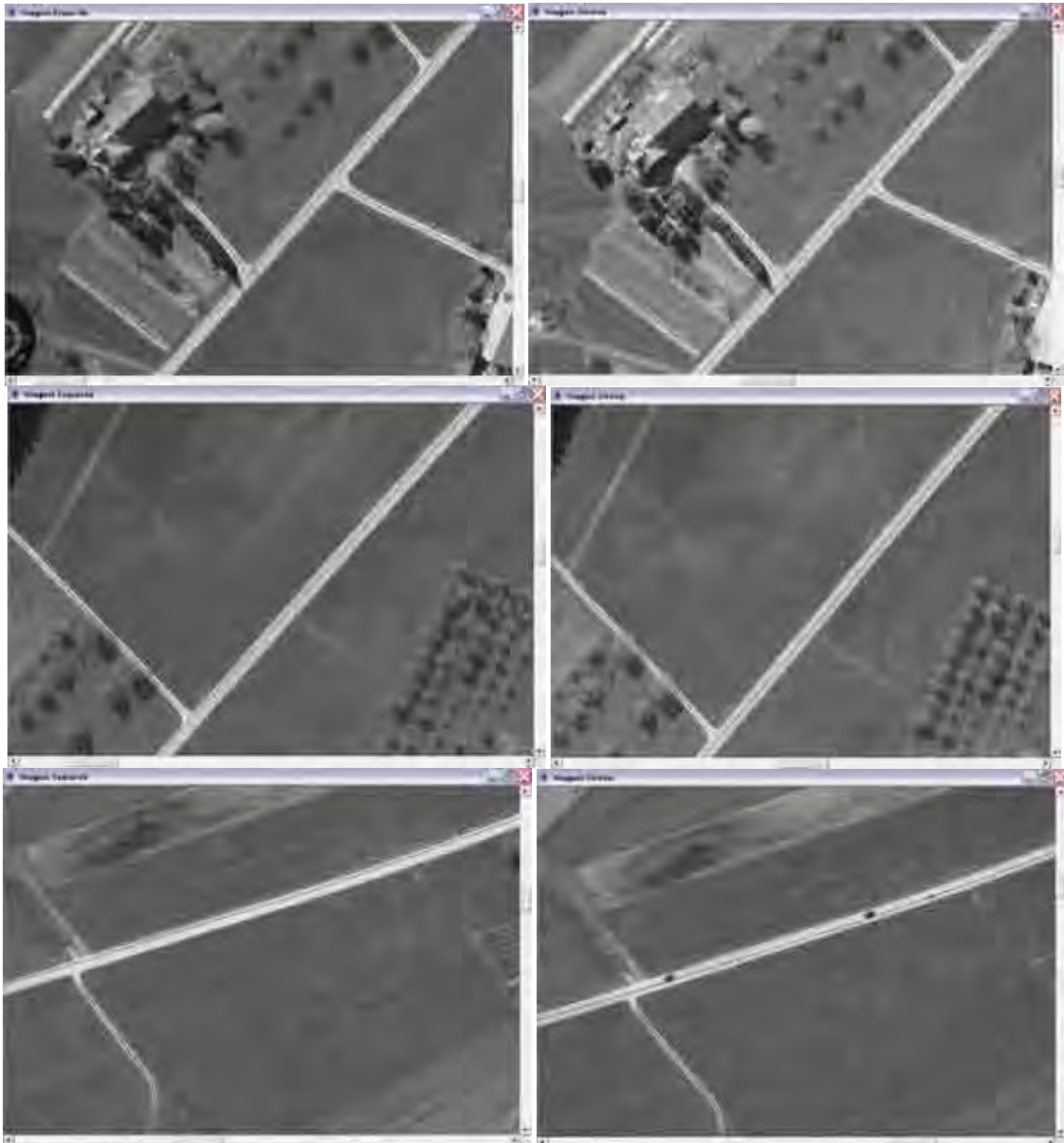


Figura 30 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)

No teste executado utilizando o modo estéreo de extração apresentou um valor de discrepância média de 1,75 m, correspondente a 7 pixels na imagem.

No teste efetuado utilizando o modo de extração para uma imagem, para a mesma rodovia a discrepância média ficou com um valor de 1,37 m, correspondente a 5,5 pixels na imagem.

O eixo extraído sobreposto à imagem na extração do caso estéreo é mostrado na figura 30, onde visualmente, comparando-se a mesma rodovia extraída pelo caso

estéreo e pelo caso mono (figura 31) percebe-se que o eixo da figura 30 está mais próximo do centro da rodovia.

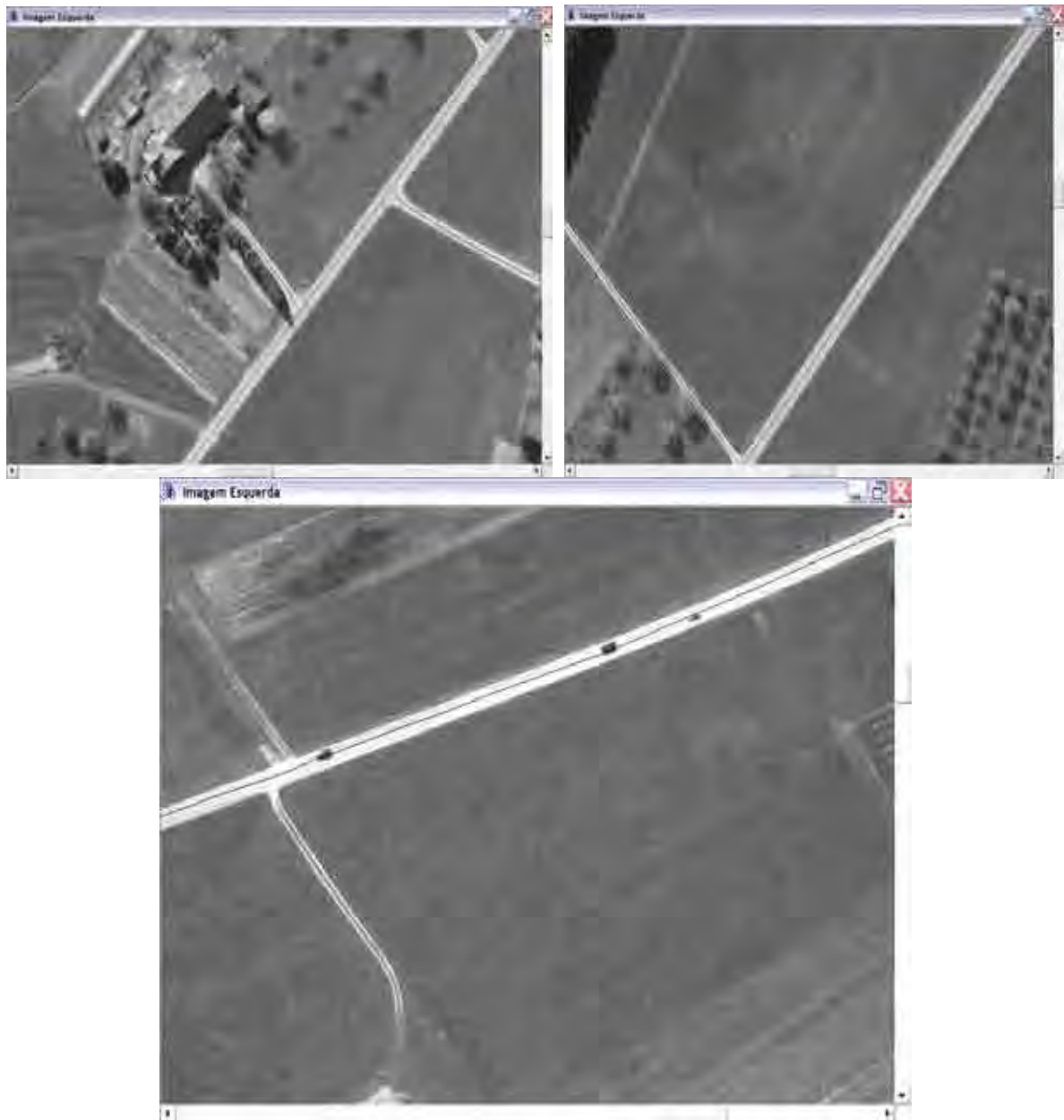


Figura 31 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)

As figuras 32 e 33 mostram os perfis resultantes das extrações nos casos mono e estéreo respectivamente.

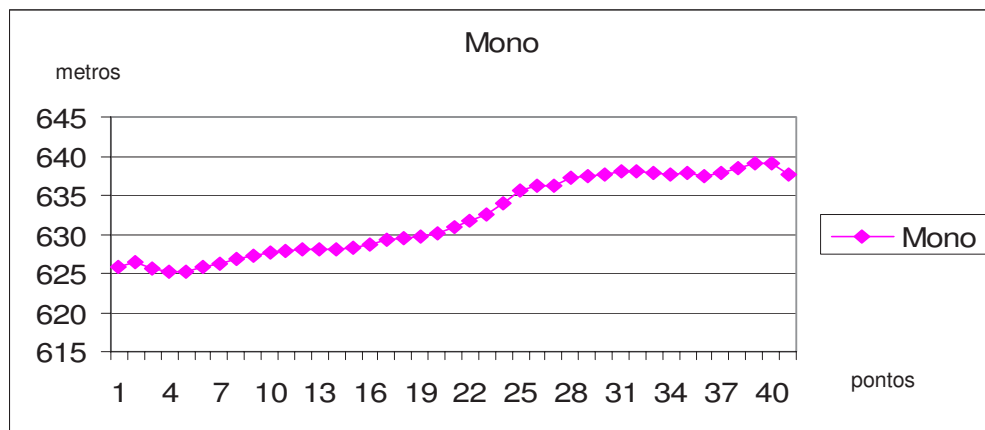


Figura 32 – Perfil da rodovia no caso mono

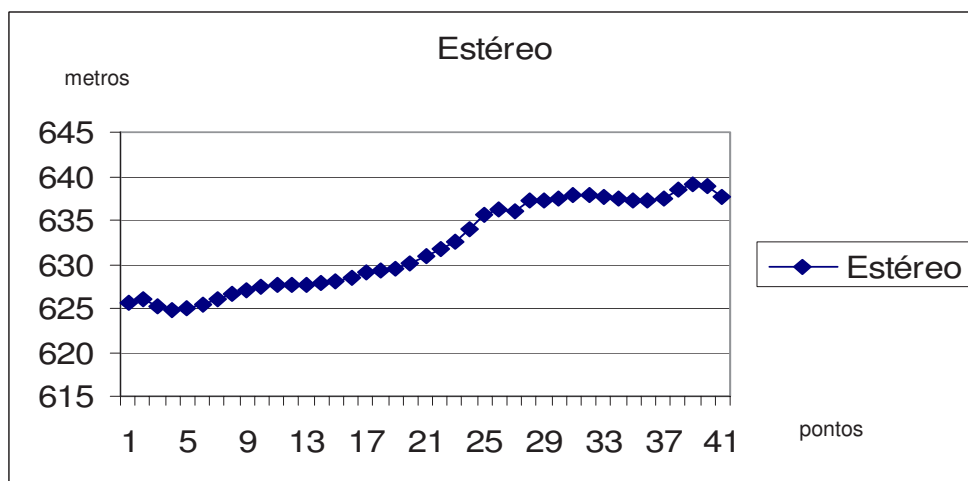


Figura 33 – Perfil da rodovia no caso estéreo

A figura 34 mostra os dois perfis sobrepostos no mesmo gráfico para fins de comparação da altimetria entre as duas metodologias de extração. Comparando os perfis das figuras 32 e 33 percebe-se que o comportamento de ambos são semelhantes.

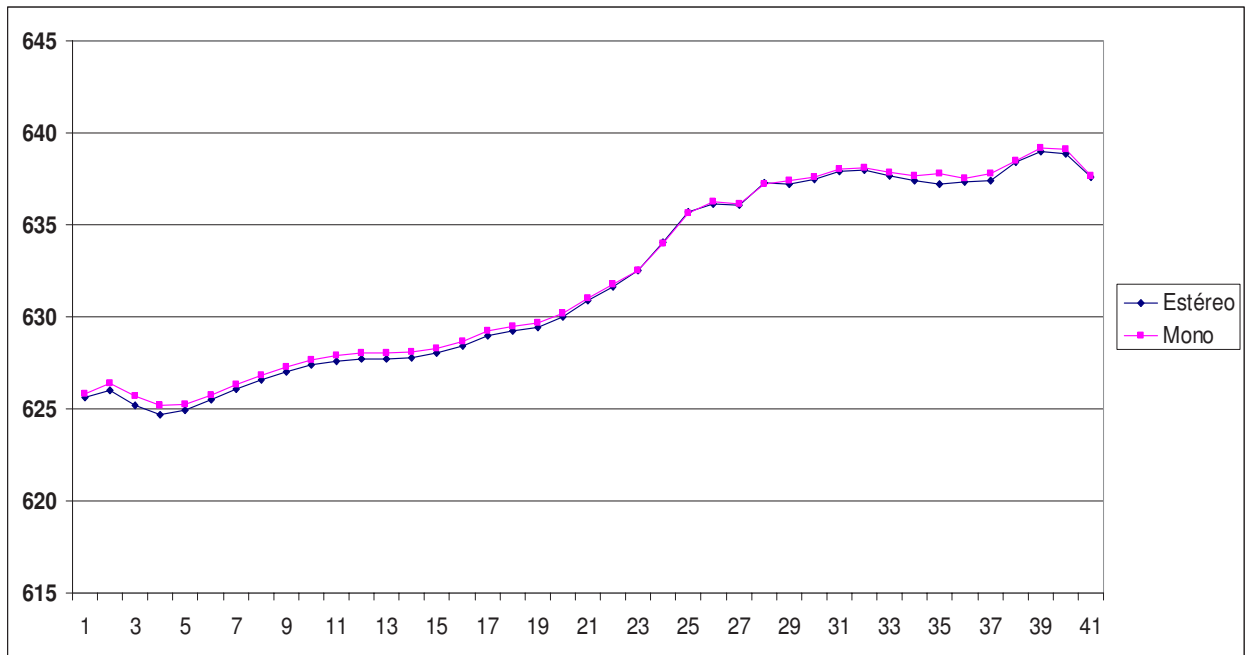


Figura 34 – Comparação entre perfis mono e estéreo

Nessa extração a maior diferença na altimetria entre os dois perfis foi de 50 cm no ponto 4.

Na figura 35 o gráfico mostra a diferença entre as discrepâncias médias na planimetria das duas extrações. O valor da diferença nesse caso foi de 38 cm, sendo que a extração mono novamente apresentou o valor de discrepância média menor (1,37 m).

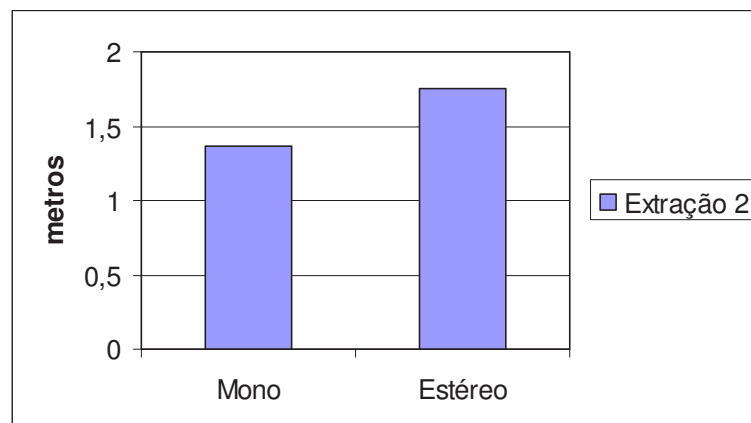


Figura 35 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo do experimento 2 (planimetria)

Nesta extração, os problemas encontrados foram devidos a mudanças bruscas na largura e presença de obstruções causadas por projeção do telhado fazendo com que o eixo extraído ficasse deslocado e em algumas situações tangenciando uma das bordas da rodovia, conforme mostrado na figura 36.

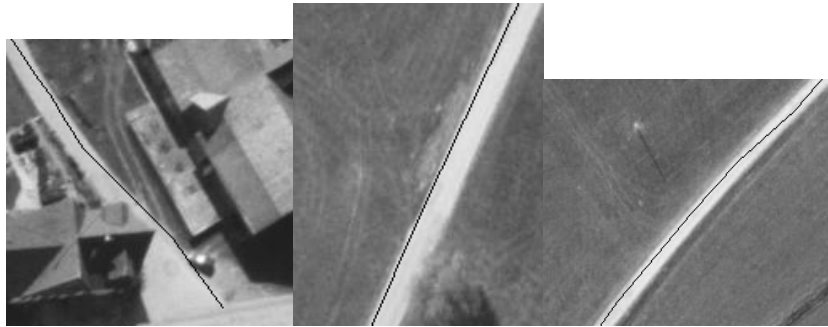


Figura 36 – Problemas encontradas na extração do eixo no experimento 2 (caso mono)

4.5.3 Experimento – 3

Este experimento foi o último realizado com o conjunto de dados do LPS. A finalidade do mesmo foi verificar a qualidade da extração do eixo de uma rodovia classificada como terciária (16 pixels de largura). Como nos últimos experimentos, também se extraiu os eixos das rodovias utilizando os dois modos de operação (mono e estéreo).

Neste teste, utilizando-se o modo estéreo da metodologia, a discrepância média apresentou o valor de 1,375 metros, equivalente a 5,5 pixels de deslocamento na imagem em relação ao eixo imaginário.

Na figura 37 apresentam-se os resultados obtidos (eixos extraídos sobrepostos à imagem utilizada no processo de extração).

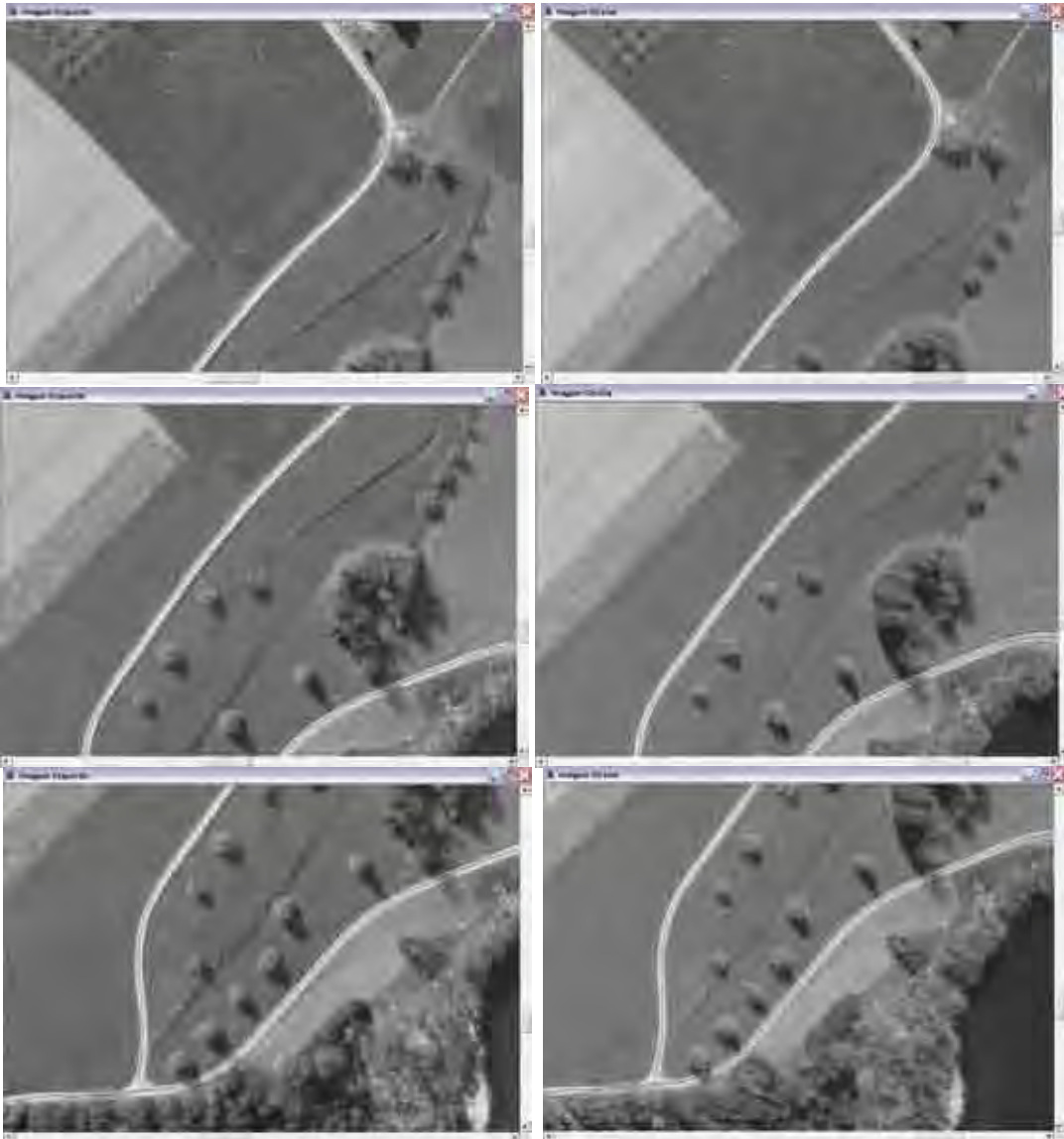


Figura 37 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso estéreo)

Na extração efetuada utilizando o modo de extração para o caso de uma imagem, a mesma rodovia apresentou o valor de 1,125 m de discrepância média, correspondente a 4,5 pixels na imagem. Na figura 38 é mostrado o eixo resultante do processo de extração utilizando apenas uma imagem.

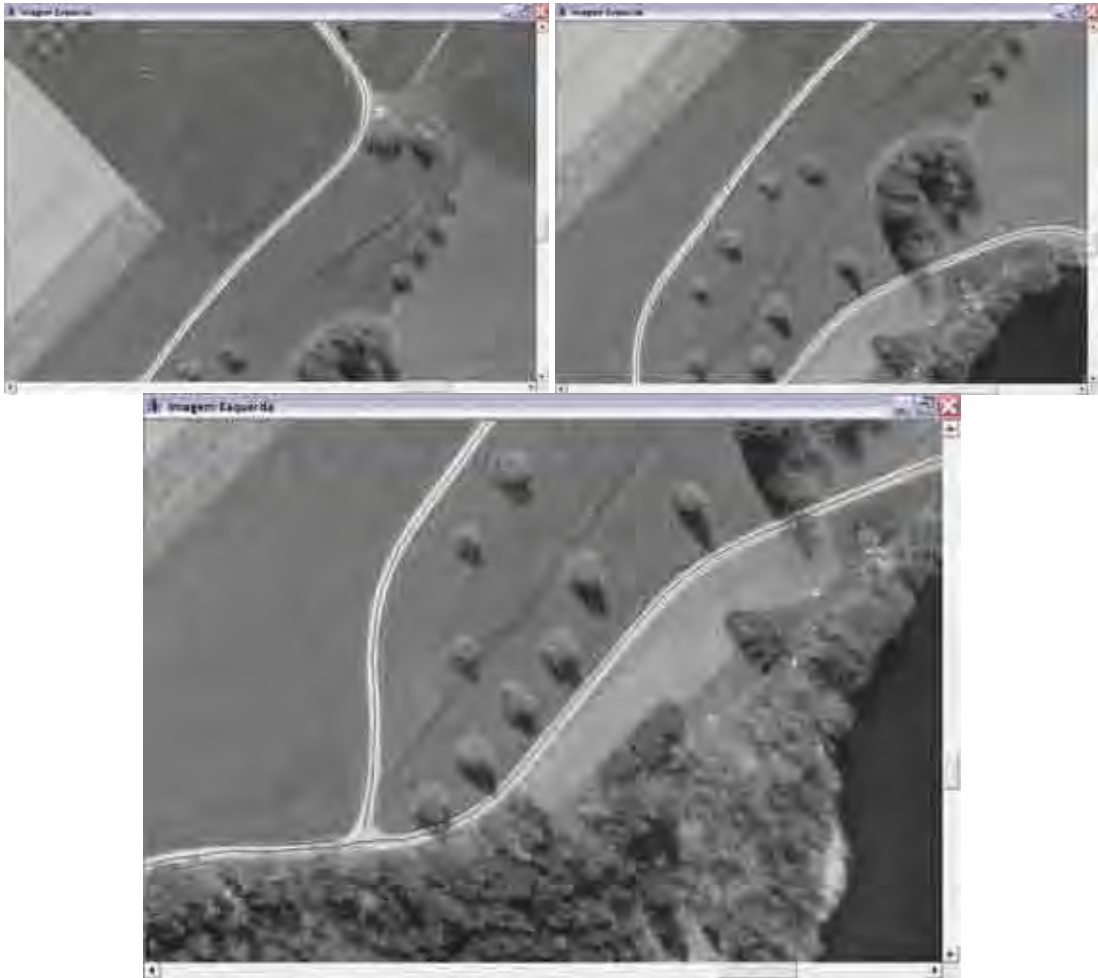


Figura 38 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)

As figuras 39 e 40 mostram os perfis resultantes das extrações nos casos mono e estéreo respectivamente.

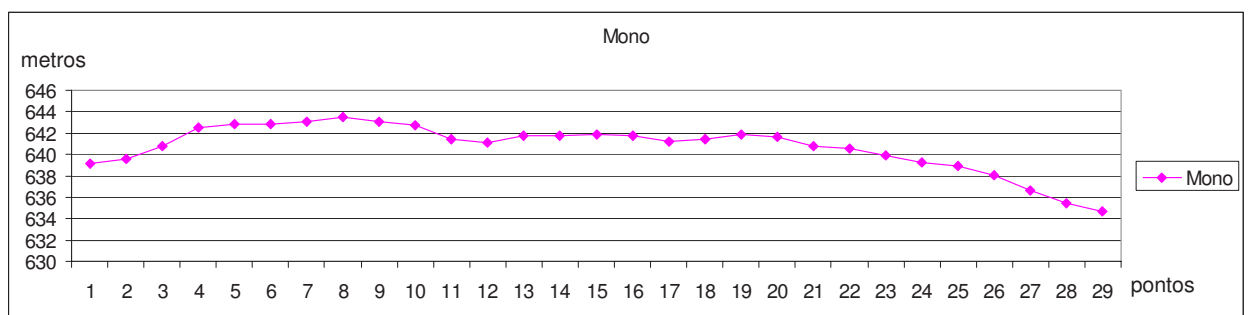


Figura 39 – Perfil da rodovia no caso mono

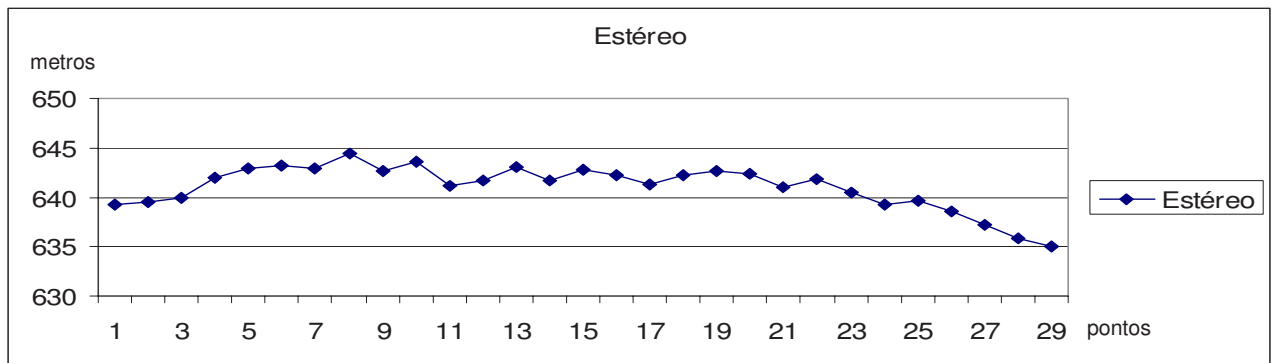


Figura 40 – Perfil da rodovia no caso estéreo

A figura 41 mostra os dois perfis sobrepostos no mesmo gráfico para fins de comparação da altimetria entre as duas metodologias de extração. Percebe-se através da comparação entre os perfis que o perfil da extração estéreo não se comporta de forma suave como o da extração mono. Isso se explica pela boa qualidade da coordenada altimétrica extraída através do MDT no caso da extração no caso mono.

Nessa extração a maior diferença na altimetria entre os dois perfis foi de 1,27 m no ponto 13.

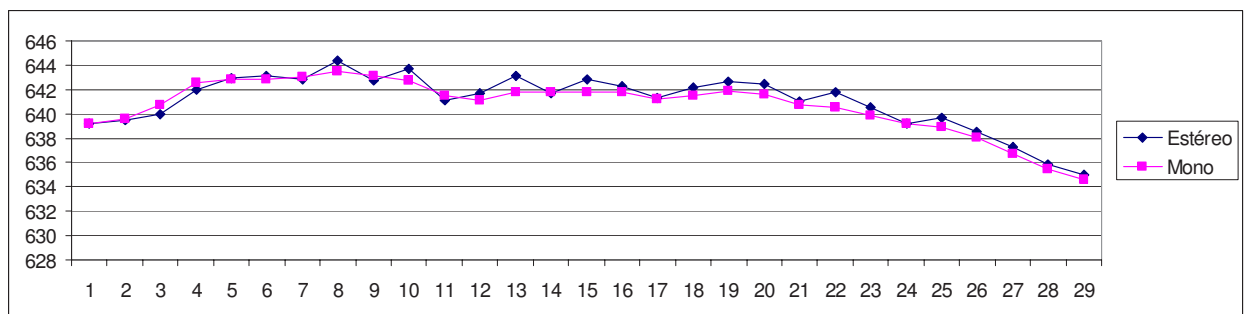


Figura 41 – Comparação entre perfis mono e estéreo

Na figura 42 o gráfico mostra a diferença entre as discrepâncias médias das duas extrações na componente planimétrica. O valor da diferença nesse caso foi de 25 cm, sendo que a extração mono novamente apresentou o valor de discrepância média menor (1,125 m).

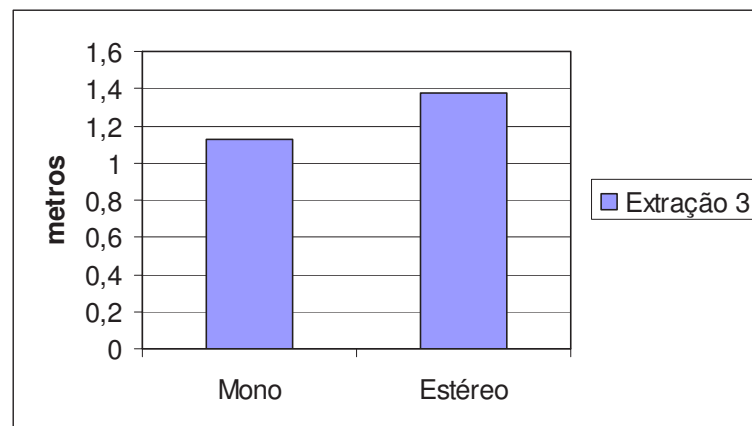


Figura 42 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo (planimetria)

Aqui, como mostra a figura 43, a presença de construções e curvaturas acentuadas, fez com que o eixo extraído fosse deslocado e em algumas situações tangenciasse uma das bordas da rodovia.



Figura 43 - Problemas encontradas na extração do eixo no experimento 3 (caso mono)

4.5.4 Experimento – 4

Neste experimento foram utilizadas imagens da região de Assis-SP, onde havia um pequeno trecho de uma estrada de terra presente em ambas as imagens. O MDT utilizado neste experimento (caso mono) possui uma resolução maior (1 m) do que o MDT utilizado nos experimentos anteriores (5 m)

Neste teste, utilizando-se o modo estéreo da metodologia, a discrepância média apresentou o valor de 2,25 metros, equivalente a 5 pixels de deslocamento na imagem em relação ao eixo imaginário. A largura da rodovia extraída é de 35 pixels.

Na figura 44 apresentam-se o par de imagens utilizadas e na figura 45 apresentam-se os resultados no processo de extração utilizando o modo estéreo da metodologia.



Figura 44 – Imagens utilizadas no experimento 4



Figura 45 – Visualização do eixo extraído na imagem

Na extração efetuada utilizando o modo mono de extração, a mesma rodovia apresentou o valor de 1,81 cm de discrepância média, correspondente a 4 pixels na imagem. Na figura 46 é mostrado o eixo resultante do processo de extração utilizando apenas uma imagem.



Figura 46 – Visualização do eixo extraído na imagem (caso mono)

As figuras 47 e 48 mostram os perfis resultantes das extrações nos casos mono e estéreo respectivamente.

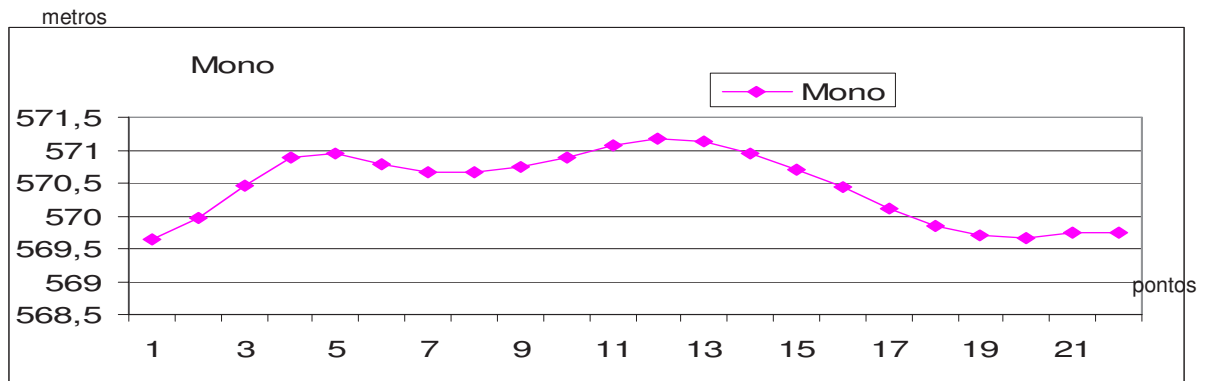


Figura 47 – Perfil da rodovia no caso mono

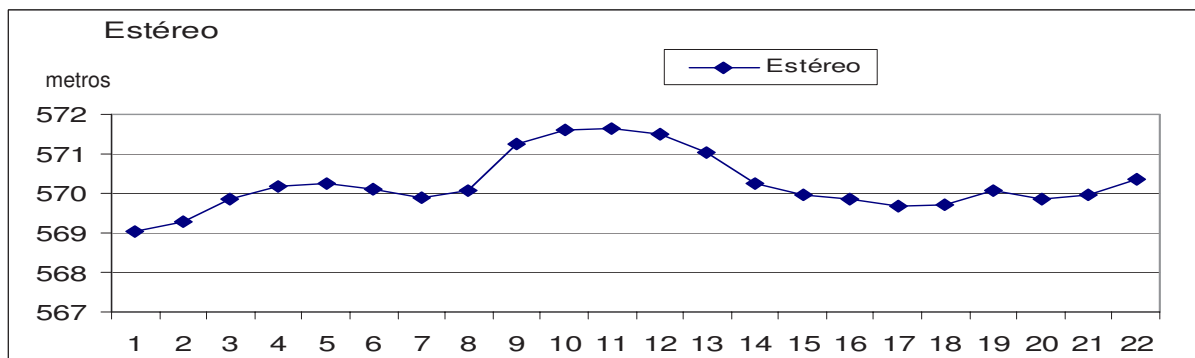


Figura 48 – Perfil da rodovia no caso estéreo

A figura 49 mostra os dois perfis sobrepostos no mesmo gráfico para fins de comparação da altimetria entre as duas metodologias de extração.

Nessa extração a maior diferença na altimetria entre os dois perfis foi de 77 cm no ponto 7.

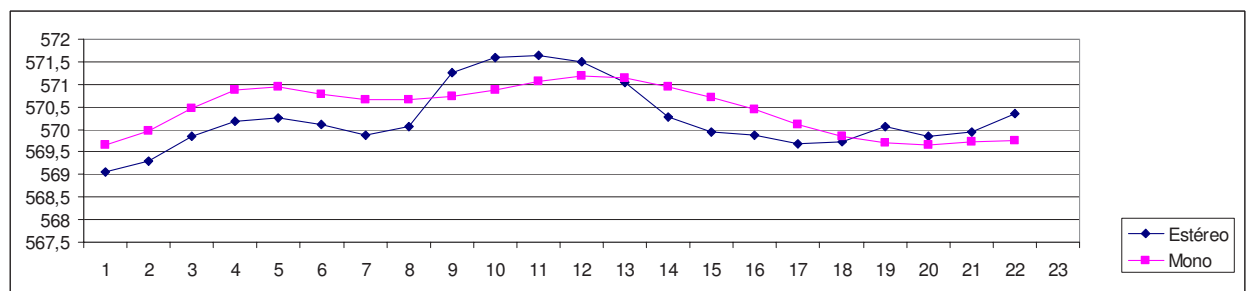


Figura 49 – Comparação entre perfis mono e estéreo

Na figura 50 o gráfico mostra a diferença entre as discrepâncias médias das duas extrações. O valor da diferença nesse caso foi de 45 cm, sendo que a extração mono novamente apresentou o valor de discrepância média menor (1,81 m).

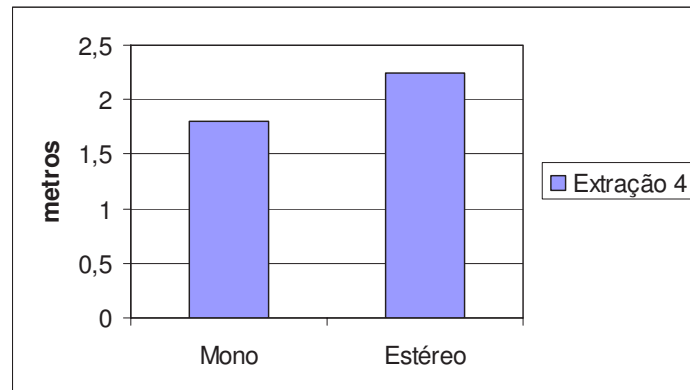


Figura 50 – Comparação entre as discrepâncias médias da extração mono e estéreo

4.6 Visualização Tridimensional

Além da visualização dos eixos extraídos sobrepostos nas imagens aéreas, a metodologia dispõe de dois módulos que permitem a visualização tridimensional das imagens e do MDT. No primeiro módulo, é possível fazer a visualização do MDT e também fazer a sobreposição dos eixos extraídos no modelo. Este módulo se mostra útil, pois permite visualizar a condição do relevo em que foi realizada a extração a partir de diferentes pontos de vistas, utilizando recursos de rotação e aproximação existentes no programa. O segundo módulo permite a visualização da imagem sobreposta ao MDT e permite a realização de um voo panorâmico sobre a mesma. Utilizaram-se também alguns recursos de visualização 3D do programa Microstation SE, que permite a visualização do modelo tridimensional e também a sobreposição das imagens ao mesmo. As ferramentas de visualização tridimensional são mostradas na figura 51.

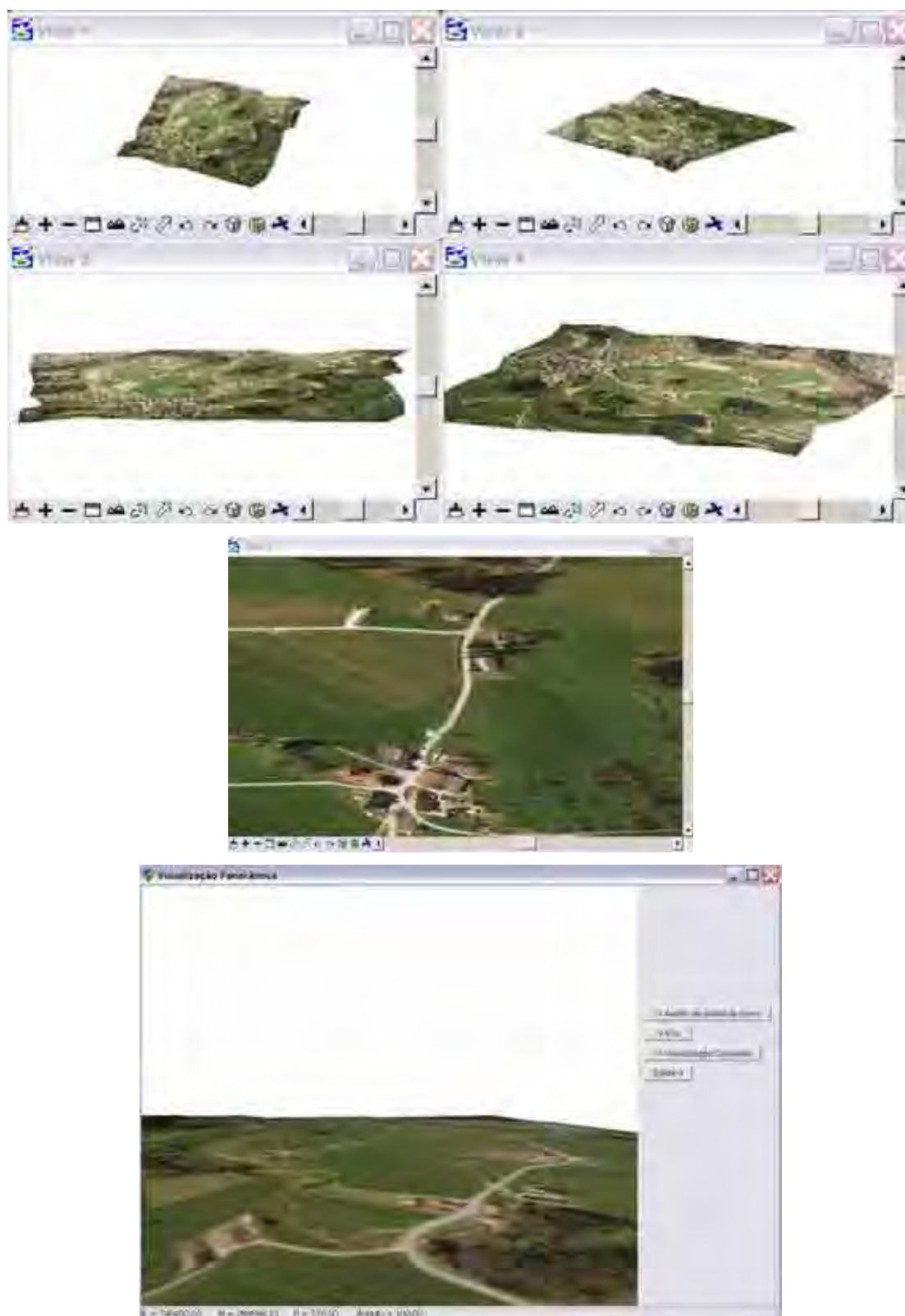


Figura 51 – Visualização tridimensional das imagens

4.7 Testes utilizando uma rodovia advinda de malha viária digitalizada como dado de entrada

O objetivo deste teste foi a inicialização da metodologia de extração de forma automática, utilizando como dado de entrada uma rodovia digitalizada proveniente de um mapa digital de rodovias da área teste cedido por Silva (2005). A figura 52 mostra o mapa digital, sendo que a parte destacada mostra a rodovia utilizada neste teste. O modo de extração utilizado neste teste foi o modo mono.

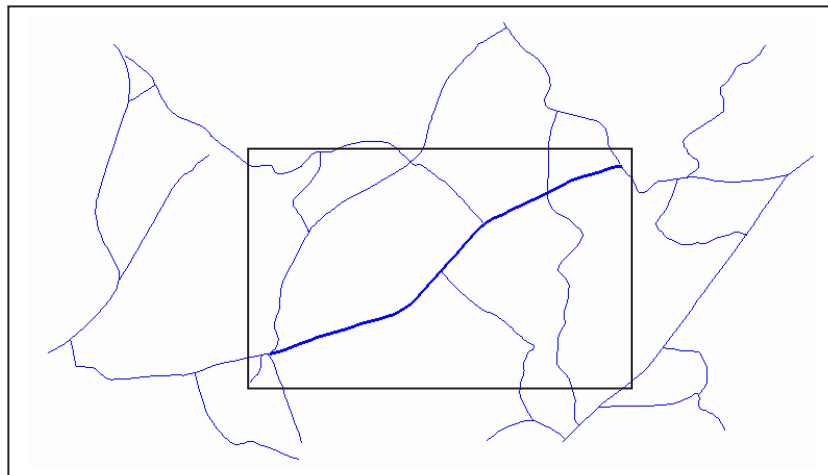


Figura 52 – Visualização do mapa digital da malha viária

Esse arquivo restituído encontrava-se na extensão *dgn* (*DesiGN file*), extensão utilizada pelos arquivos nativos do programa Microstation. Recortou-se do mapa a rodovia que serviria de entrada para o programa e realizou-se a transformação desta rodovia de arquivo *dgn* para *dxf* (*Drawing Exchange Format*).

A rodovia digital, já no formato *dxf*, foi transformada em pontos sementes utilizando um programa de domínio público chamado *Dxf2xyz*, que entre outras coisas, realiza a transformação de arquivos no formato *dxf* em arquivos texto contendo as coordenadas dos vértices dos arquivos digitais. Este arquivo, após a transformação, possuía 52 coordenadas de vértices da rodovia, que foram introduzidos como pontos sementes para extração utilizando o modo mono - uma única imagem mais o MDT. Foram extraídos 76 pontos pelo algoritmo de PD, sendo que os mesmos foram plotados juntamente com a rodovia

utilizada para extração dos pontos sementes para verificação visual da qualidade da extração e também para calcular a distância entre o eixo de referência e o extraído (figura 53).

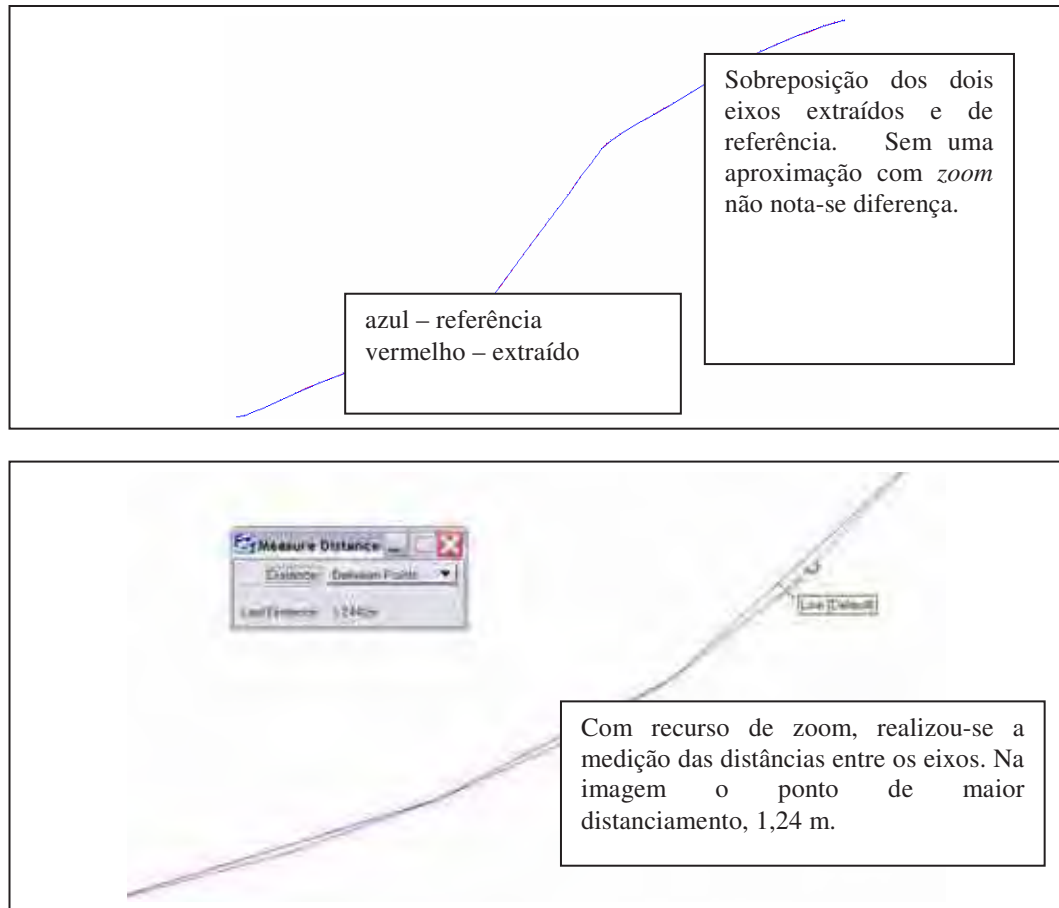


Figura 53 – Visualização do eixo extraído e do eixo de referencia

Um segundo teste com outra rodovia existente no mapa foi realizado. A rodovia selecionada é mostrada na figura 54. Após a transformação de *dgn* para *dxg* e a extração das coordenadas utilizando o programa *Dxf2xyz*, um arquivo contendo 40 coordenadas de vértices da rodovia foi utilizado como arquivo de entrada no processo de extração usando o modo *mono* - uma única imagem mais o *MDT*.

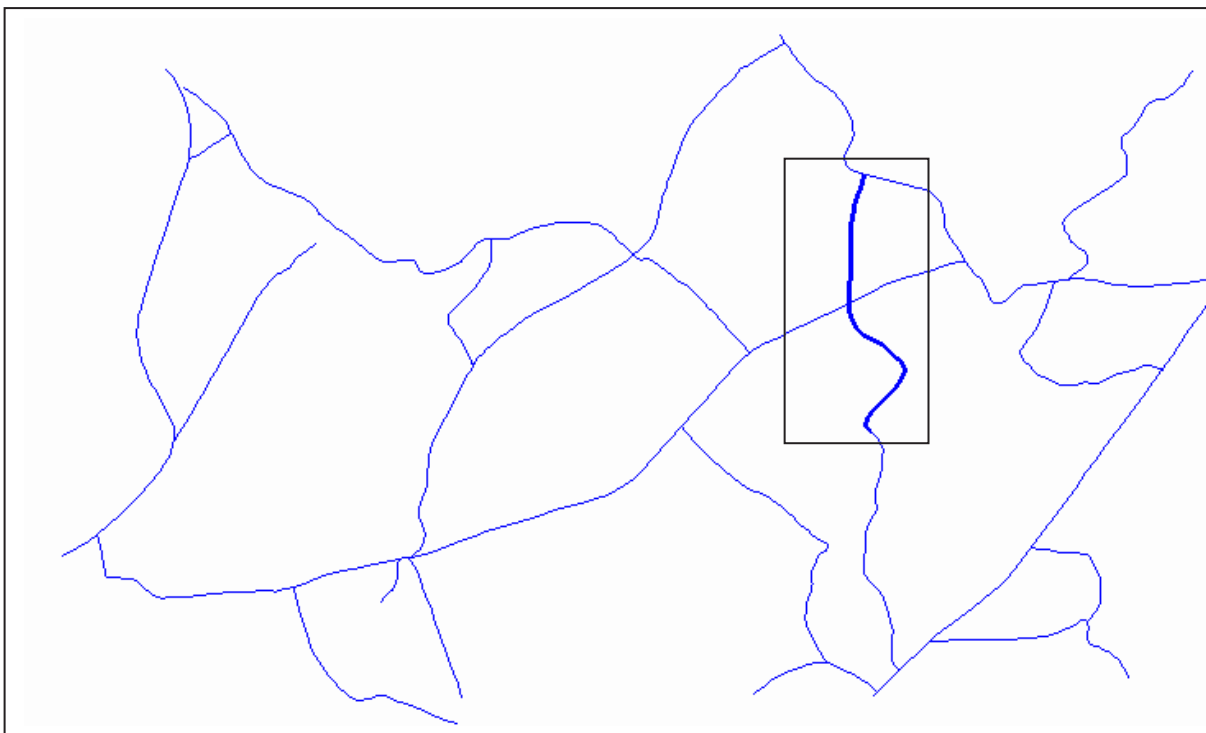


Figura 54 – Visualização do mapa digital da malha viária com destaque para rodovia utilizada no experimento

Foram extraídos 68 pontos pelo algoritmo de PD, sendo que os mesmos foram plotados juntamente com a rodovia utilizada para extração dos pontos sementes para verificação visual da qualidade da extração e também para calcular a distância entre o eixo de referência e o extraído (figura 55).

Seguiu-se o mesmo procedimento realizado no teste anterior para efetuar o cálculo da discrepância média, sendo que neste teste o valor encontrado foi de 85 cm.

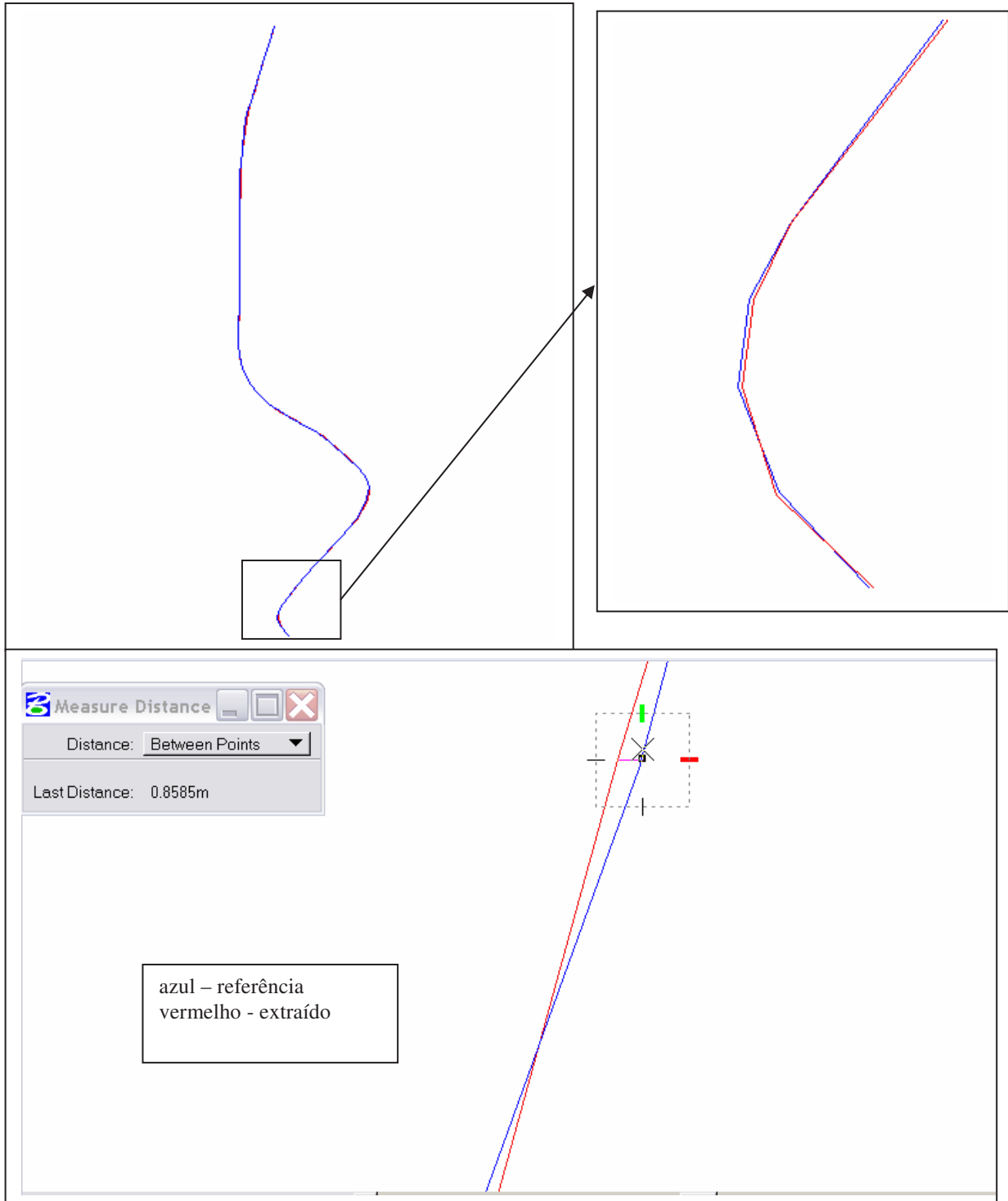


Figura 55 – Visualização do eixo extraído e do eixo de referencia

4.8 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos pela metodologia proposta foram apresentados nas figuras mostradas nos testes 1, 2 3 e 4. Fica clara por estas figuras a vantagem de se realizar a análise no espaço imagem, embora todo o processo de extração seja realizado via otimização por PD no espaço objeto. Este procedimento permite através de análise visual verificar facilmente a qualidade geométrica dos eixos extraídos possibilitando inclusive entender possíveis dificuldades frente a irregularidades presentes ao longo das rodovias.

De uma forma geral, os resultados obtidos são bastante satisfatórios. Analisando especificamente os resultados mostrados nas figuras dos testes, através de análise visual, verifica-se que as linhas poligonais extraídas estão acuradamente posicionadas ao longo dos eixos das rodovias, com variações que podem ser consideradas normais, pois analisando a discrepância média dos experimentos efetuados, verifica-se que a maior discrepância ficou por volta de 5 pixels (2,25 m) no experimento 4, numa rodovia de 35 pixels, ou seja a acurácia da extração ficou em 1/7 da largura da rodovia para esse caso. A figura 56 mostra a discrepância das extrações.

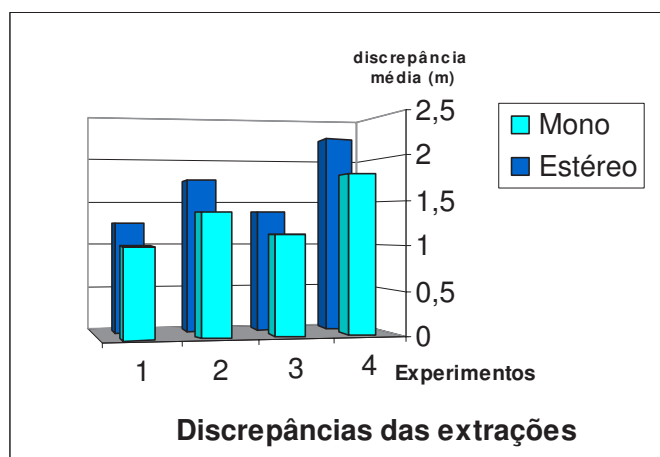


Figura 56 – Discrepância média das extrações realizadas nos testes mono e estéreo

No gráfico da figura 56, os critérios numéricos mostram que a metodologia mono apresentou resultados planimétricos melhores em comparação com a metodologia estéreo de extração.

As diferenças entre as discrepâncias médias entre cada teste mono e estéreo realizados são mostradas no gráfico da figura 57.

Neste gráfico nota-se que a maior diferença foi no teste 4, e alcançou 45 cm. As diferenças restantes entre os testes mono e estéreo ficaram em 25 cm no teste 1, 38 cm no teste 2 e 25 cm no teste 3.

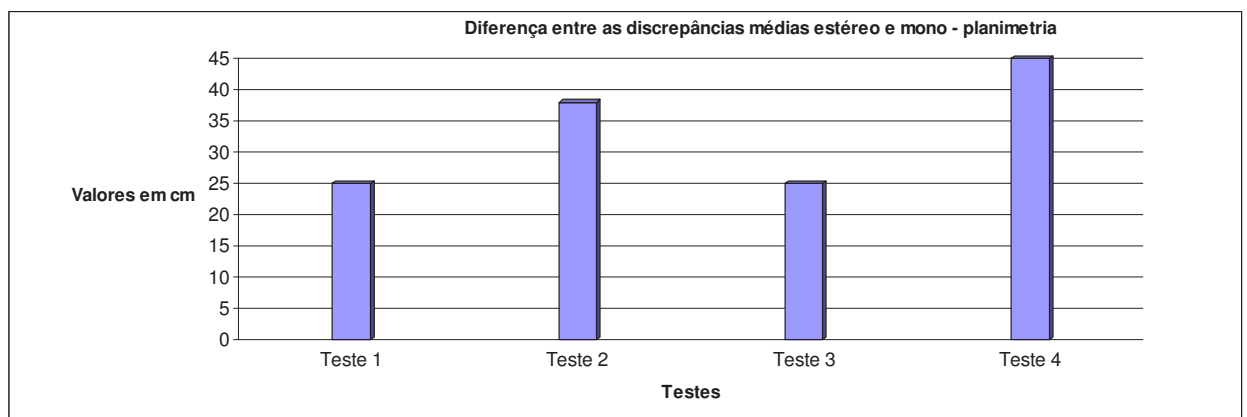


Figura 57 – Diferença entre as discrepâncias médias mono e estéreo

Ainda em relação às discrepâncias médias das extrações, verifica-se no gráfico da figura 57, que as extrações realizadas utilizando apenas uma imagem apresentam resultados melhores (discrepâncias médias mais baixas) em relação à metodologia que utiliza múltiplas imagens. A qualidade da coordenada altimétrica extraída através do MDT promove um desempenho melhor ao caso mono de extração.

No geral, o método obteve bom desempenho para todas as rodovias extraídas, salvo os problemas apresentados. Verificando as cenas onde o eixo extraído foi sobreposto à imagem original, nota-se que o mesmo encontra-se geralmente compatível

com o eixo central da rodovia. Além disso pode ser notado que o método se mostrou, numa variedade de casos, robusto frente às obstruções como mostra a figura 58.



Figura 58 – Eixos extraídos mesmo com obstruções presentes nas cenas

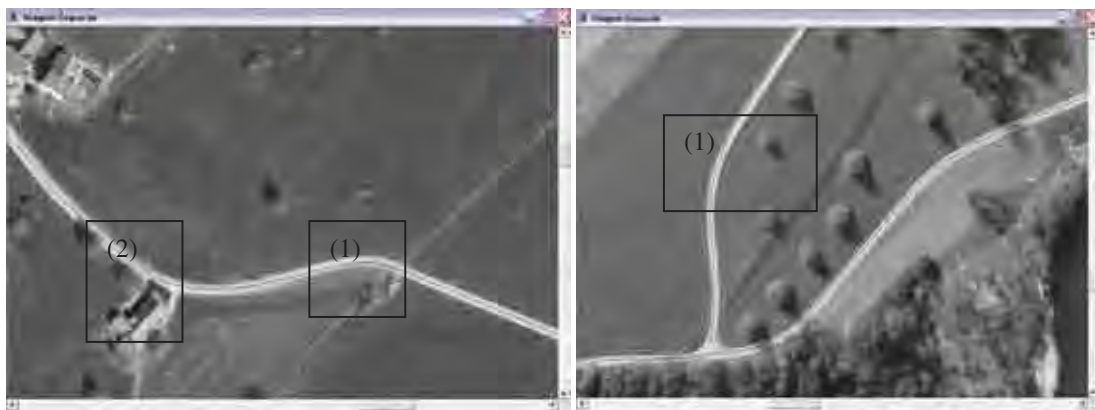
Dois fatores são determinantes para a obtenção destes resultados: 1 – o excelente contraste, que torna as injunções fotométricas bastantes efetivas no processo de otimização; e 2 – as injunções globais de suavidade geométrica impostas na função objetivo, fazendo com que os eixos extraídos em locais com alguma anomalia se comportem de forma suave como os demais trechos da rodovia principal.

Nos testes 1 e 2, alguns cruzamentos de rodovia presentes ao longo das rodovias principais são passíveis de dificuldades para a extração desta rodovia. Entretanto, nenhuma influência significativa foi observada no eixo extraído.

A robustez do método é também demonstrada pelos resultados obtidos para as rodovias do teste 3, notando que o baixo contraste e a presença de obstruções causadas pela vegetação não influenciam negativamente o método.

Na figura 59a mostra-se uma situação na qual embora o contraste seja satisfatório, há situações com relação ao aspecto geométrico, já que neste caso a rodovia se apresenta bem mais ondulada. Apesar dos resultados serem bastante satisfatórios, dois efeitos da presença de curvaturas mais acentuadas podem ser observadas.

Um primeiro efeito (1) é uma pequena tendência do eixo extraído em tangenciar a borda interna das rodovias nas regiões de curvatura mais acentuada. Na figuras 59a e 59b mostra-se um exemplo desse efeito. Vale ressaltar que esse efeito é causado pelas injunções globais de curvatura que acabam por dominar ligeiramente as informações geométricas locais.



(a)

(b)

Figura 59 – Eixos extraídos por programação dinâmica

O segundo efeito (2) é causado pela obstrução parcial localizada na curva da esquerda da figura 58a, onde se pode observar a formação de uma pequena quina. Isto mostra que, apesar das injunções geométricas globais, o método pode ser sensível às obstruções e outras irregularidades presentes em regiões de maior curvatura.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia semi-automática para extração de rodovias a partir de imagens digitais assim como os experimentos realizados e resultados alcançados.

Dentre os objetivos propostos nesta pesquisa, destaca-se o desenvolvimento da metodologia de extração de rodovias baseada em programação dinâmica com otimização no espaço objeto e a avaliação experimental dessa metodologia através do uso de dados reais.

Os algoritmos de extração foram desenvolvidos para permitir a extração de rodovias utilizando imagens digitais operando de duas maneiras distintas. A primeira maneira, o caso mono da metodologia, utiliza uma imagem digital e um MDT. A outra forma de extração das rodovias utiliza estereopares de imagens digitais. Utilizando estas duas técnicas, é possível gerar coordenadas tridimensionais dos eixos das rodovias extraídas.

A partir da análise dos experimentos realizados, foi feita a avaliação da metodologia desenvolvida. Cinco experimentos foram conduzidos utilizando imagens digitais (escalas 1:9200 e 1:5000) e parâmetros de orientação exterior e interior das mesmas, pontos no terreno, dois modelos digitais de terreno e um mapa digital na escala 1:2000. Os experimentos foram planejados através de uma classificação das rodovias existentes nas imagens levando em conta a largura das mesmas. As rodovias foram classificadas da seguinte maneira: primária (38-30 pixels), secundária (29 – 20 pixels) e terciária (19 – 15 pixels).

Tendo por base as interpretações dos resultados dos experimentos realizados mostrados no Capítulo 4 as principais conclusões são:

- Experimento 1 – Neste experimento o objeto da extração foi uma rodovia classificada como principal (38 pixels). A rodovia foi extraída utilizando os dois modos de extração da metodologia (mono e estéreo). Utilizou o conjunto de dados do LPS (imagens na escala 1: 9200). Para análise dos resultados da extração foram feitas duas

avaliações: numérica e visual. Na avaliação numérica, no caso estéreo, a discrepância média ficou em 1,25 m (5 pixels) e no caso mono ficou em 1 m (4 pixels). Analisando visualmente os eixos de rodovias extraídos sobrepostos as imagens, pode-se considerar que a extração obteve bons resultados, já que as rodovias extraídas apresentavam bordas e larguras regulares e algumas obstruções, mas que foram suplantadas pela metodologia. O método não extraiu o eixo de rodovia corretamente em algumas áreas onde havia obstrução de grande parte da rodovia causada por sombras de árvores que encobria totalmente a rodovia.

- Experimento 2 – No segundo experimento a rodovia extraída possuía 28 pixels de largura sendo classificada como secundária. Também utilizou-se o conjunto de dados do LPS (imagens na escala 1: 9200). Nesta extração a discrepância média para o caso estéreo ficou em 1,75 m, correspondente a 7 pixels na imagem. Na extração efetuada utilizando o modo de extração para uma imagem, para a mesma rodovia a discrepância média ficou com um valor de 1,37 m, correspondente a 5,5 pixels na imagem. Novamente, analisando visualmente os eixos extraídos, pode-se afirmar que a extração apresentou bons resultados, falhando somente em algumas áreas onde houve mudanças bruscas na largura da rodovia e obstrução causada por edificações.
- Experimento 3 – Último experimento utilizando as imagens na escala 1:9200. Neste experimento a rodovia extraída foi classificada como terciária (largura de 16 pixels). As discrepâncias médias calculadas foram as seguintes: modo estéreo da metodologia, a discrepância média apresentou o valor de 1,375 metros, equivalente a 5,5 pixels de deslocamento na imagem em relação ao eixo imaginário e para o caso de uma imagem, a mesma rodovia apresentou o valor de 1,125 m de discrepância média, correspondente a 4.5 pixels na imagem. Esta rodovia apresentava alguns pontos de curvatura acentuada e na análise visual dos eixos extraídos, visualmente verificou-se

que a extração mono apresentou resultados melhores, já que em alguns pontos da extração estéreo o eixo tangenciava as bordas da rodovia. O método apresentou algumas falhas em áreas onde obstrução causada por edificações encobria parte da rodovia a ser extraída.

- Experimento 4 – Neste experimento foram utilizadas imagens de Assis, onde havia um pequeno trecho de uma estrada de terra presente em ambas as imagens. A finalidade deste experimento, além de verificar a funcionalidade dos algoritmos de extração, foi também testar a interpolação por *thin plate spline* para verificar a qualidade de extração da altimetria em um modelo digital de terreno com uma densidade maior de pontos. Neste teste, utilizando-se o modo estéreo da metodologia, a discrepância média apresentou o valor de 2,25 metros, equivalente a 5 pixels de deslocamento na imagem em relação ao eixo imaginário. A largura da rodovia extraída é de 35 pixels. Na extração efetuada utilizando o modo de extração para o caso de uma imagem, a mesma rodovia apresentou o valor de 81 cm de discrepância média, correspondente a 1,8 pixels na imagem. Na figura 38 é mostrado o eixo resultante do processo de extração utilizando apenas uma imagem. Na análise visual percebe-se que o eixo extraído está bem próximo do centro da rodovia. Isto mostra que um MDT melhor (mais denso) melhora ainda mais o modo mono.

Em relação a metodologia, pode-se afirmar que poderá vir a ser utilizada na captura de dados para atualização de Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIGs), visando contribuir e prover uma alternativa semi-automática de coleta da malha viária.

Em ambas as metodologias, é necessário que o operador realize a tarefa de reconhecimento da rodovia e identificação de alguns pontos sementes descrevendo aproximadamente a forma e a posição da rodovia em ambos os casos (mono e estéreo).

De uma forma geral, os resultados obtidos são bastante satisfatórios, pois se verifica que as linhas poligonais extraídas estão em alguns casos acuradamente posicionadas ao longo dos eixos das rodovias, em outros, mesmo devido a obstruções encontradas, os eixos permanecem próximos ao eixo real.

Os resultados obtidos pelo modo mono de extração obtiveram melhor desempenho (acurácia e suavidade). Em função da dependência do MDT, onde através do processo de interpolação nesse modelo, obtem-se a coordenada h , a injunção do MDT faz com que a rodovia seja forçada a correr sobre o modelo. Quanto mais denso o modelo, maior a qualidade da extração no caso mono. Havendo uma diminuição da resolução do MDT, certamente os resultados da extração estéreo ficarão melhores do que os da extração mono.

Tendo como base os critérios estabelecidos na tabela 13 e analisando as figuras com os eixos sobrepostos às imagens, pode ressaltar a boa qualidade dos eixos extraídos nos quatro experimentos realizados.

Dois fatores são determinantes para a obtenção dos resultados: 1 – o excelente contraste, que torna as injunções fotométricas bastantes efetivas no processo de otimização; e 2 – as injunções globais de suavidade geométricas impostas na função objetivo, fazendo com que os eixos extraídos em locais com alguma anomalia se comportem de forma suave como os demais trechos da rodovia principal. A robustez do método é também demonstrada pelos resultados obtidos para as rodovias, notando que o baixo contraste e a presença de obstruções causadas pela vegetação não influenciam negativamente o método.

Apesar do esforço computacional para se determinar a função interpoladora, ela foi utilizada para evitar-se ter uma estrutura de dados mais avançada para representar o modelo digital e conseguir estabelecer em qual quadrilátero o ponto a ser interpolado pertence. Além disso, ela é calculada uma única vez para a imagem em questão, independente de qual rodovia será extraída.

5.1 Recomendações

Alguns pontos podem ser apontados para uma automação maior em trabalhos futuros, como por exemplo, a coleta automática dos pontos homólogos nos pares de imagens no módulo idealizado para tal fim, onde atualmente a coleta é feita manualmente nas duas imagens.

Outra contribuição significativa seria ampliar a modelagem matemática existente para permitir o uso de dados de diferentes sensores, como por exemplo, imagens de satélites de alta resolução (Ikonos, Quick Bird), dados LIDAR, etc. Permitindo assim a metodologia trabalhar com a fusão de dados de diferentes naturezas.

Mais testes devem ser efetuados utilizando conjuntos de dados diferentes simulando situações adversas para verificar o funcionamento da metodologia desenvolvida.

5.2 Considerações Finais

Este trabalho apresentou os resultados obtidos, modelos matemáticos utilizados e algoritmos desenvolvidos em pesquisa sobre a extração semi-automática de rodovias em imagens digitais de alta resolução utilizando otimização por programação dinâmica no espaço objeto.

Com base nos experimentos realizados, pode-se afirmar que o método pode ser considerado promissor. Isso decorre do fato de que o algoritmo de programação dinâmica já foi exaustivamente testado (GRUEN E LI, 1997, LI, 1997, DAL POZ E AGOURIS, 2000, DAL POZ, 2001, BARROS, 2001, VALE E DAL POZ, 2003) para extração de rodovias no espaço imagem com excelentes resultados.

Finalmente, os resultados alcançados mostram-se compatíveis com os obtidos pelos esquemas tradicionais, permitindo assim um ganho significativo de produtividade. Apesar de ser necessária a intervenção do operador para inicializar o processo, a tarefa exaustiva de realizar medidas precisas da rodovia é deixada a cargo do algoritmo de programação dinâmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, F. *Techniques and strategies for DEM generation*. Digital photogrammetry : in addendum to the manual of photogrammetry, Amer. Soc. for Photogramm. & Remote Sensing, pp. 135-141, 1996.
- AGOURIS, P., GYFTAKIS, S., STEFANIDIS, A. Uncertainty in image-based change detection. In: *Accuracy 2000*, Amsterdam, *Proceedings*: 1 – 8, 2000.
- AGOURIS, P., GYFTAKIS, S., STEFANIDIS, A. Using a fuzzy supervisor for object extraction within an integrated geospatial environment. In Symposium on object recognition and scene classification from multispectral and multisensor pixels, v. 32, 1998, Columbus, Ohio. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Columbus - EUA, 1998. p. 191-195.
- AMINI, J., SARADJIAN, M. R., BLAIS, J. A. R., LUCAS, C., AZIZI, A. Automatic road side extraction from large scale imagemaps. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 4 (2002), pp. 95- 107, 2002.
- ANDRADE, J.B.. *Fotogrametria*. Curitiba: SBEE, 1998.
- BAJCSY, R., TAVAKOLI, M. *Computer recognition of roads from satellite picture*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 6 (1976), 76 – 84.
- BALLARD, D. H., BROWN, C.M. *Computer Vision*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982. 523 p.
- BARBOSA, R. L., MENEGUETTE, M., SILVA, J. F. C., GALLIS, R. B. A. *Geração de Modelo Digital do Terreno utilizando a Triangulação de Delaunay e Thin Plate Spline*. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CD-Rom), Curitiba-PR, 2003.
- BARROS, L. R. *Extração semi-automática de feições rodoviárias usando Programação Dinâmica*. Rio de Janeiro, 2001, 91 p. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia.
- BARZOHAR, M., COOPER, D. *Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, V.18, n.7, p. 707 – 721, 1996.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H., 1999. Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping, and Context. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(7): 777–785.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W. *Semantic objects and context for finding Roads*. In: Integrating Photogrammetric Techniques With Scene Analysis and Machine Vision 3, 1997, Orlando – FL. Proceedings: Orlando – FL: SPIE, 1997. p. 98 – 109.

BELLMAN, C. J., SHORTIS, M. R. A machine learning approach to building recognition in aerial photographs. In: ISPRS COMMISSION III, SYMPOSIUM 2002, PCV02 (Part A), v. 34, 2002, Graz - Austria. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Information Sciences, Graz - Austria, 2002. p. 50-54.

BOOKSTEIN, F. L. *Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v.11, n.6, p.567-85, 1989.

BORDES, G., GIRAUDON, G., JAMET, O. *Road Extraction Guide by a Cartographic Database: Creating a Strategy*, in: Workshop on Context-Based Vision (ICCV), IEEE Computer Society Press, p. 30-37, Cambridge, MA, 1996.

BOSSLER, J. D. *Digital mapping on the ground and from the air*. GEO INFO SYSTEMS, January, p. 44-48, 1994.

CLODE, S., KOOTSOOKOS, P., ROTTENSTEINER, F. The automatic extraction of roads from LIDAR data. *ISPRS 2004 XXth Congress*, Istanbul, Turkey. Commission 3: 6 pages (CD-ROM), 2004.

COSTA, E. R. *Geração automática de modelos digitais de terreno a partir de imagens de câmaras digitais*. Presidente Prudente, 2006. Dissertação de Mestrado - Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

DAL POZ, A. P. *Extração automática da malha viária rural a partir de imagens de média e alta resoluções*. Relatório Científico apresentado à FAPESP, relativo à etapa de pesquisa compreendida no período 01/06/01 – 30/09/02 (Proc. 2001/01168-5). Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2002. 125 p.

DAL POZ, A. P. *Semi-automatic road extraction methods by dynamic programming optimization and a cooperative road follower*. The Photogrammetric Journal of Finland, v 17, p. 13 – 22, 2001.

DAL POZ, A. P. *Processo automático para reconhecer e extrair rodovias georreferenciadas em uma fotografia aérea digitalizada*. Relatório Científico apresentado à FAPESP, relativo à realização de Pós-Doutorado no Dept. of Spatial Information Science and Engineering, University of Maine, USA - (Proc. 98/15553-30). Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2000. 225 p.

DAL POZ, A. P. *Auto-Calibração de Câmeras Não-Métricas: Uma Abordagem Teórica*. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 1989, Gramado-RS. XIV CBC. Rio de Janeiro-RJ: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 1989. v. 1, p. 37-43.

DAL POZ, A. P., VALE, G. M. Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high-resolution images. In: Ebner, H.; Heipke, C.; Mayer, H.; Pakzad, K. (Orgs.). Hannover, Germany, 34: 87-92, 2003.

- DAL POZ, A. P., SILVA, M. A. O. Active testing and edge analysis for road centreline extraction. In: *ISPRS – Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision*, Graz, Austria, Proceedings: 44-47, 2002.
- 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 53, p. 65-72, 2001.
- DAL POZ, A. P., AGOURIS, P. *Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments*. In: *Automated Geo-spatial Image and Exploitation*, Proceedings: Orlando – FL: SPIE, 2000. Volume 4054, p.56-55.
- DREYFUS, S. E., LAW, A. M. *The Art and Theory of Dynamic Programming*. Academic Press, Inc., New York, 1977. 281 p.
- FISCHLER, M. A., TENENBAUM, J. M., WOLF, H. C. *Detection of Roads and Linear Structures in Low Resolution Aerial Images Using Multi-Source Knowledge Integration Techniques*. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981. 15(3): p. 201-223.
- FORTIER, A., ZIOU, D., ARMENAKIS, C., WANG, S. *Survey of Work on Road Extraction in Aerial and Satellite Images, Technical Report*. 1999.
- GAO J., WU, L. Automatic Extraction of Road Networks in Urban Areas from Ikonos Imagery Based on Spatial Reasoning, *ISPRS 2004 XXth Congress*, Istanbul, Turkey. Commission 3: 6 pages (CD-ROM), 2004
- GEMAN, D., JEDYNAK, B. *An active testing model for tracking roads in satellite images*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 1, pp 1-14. January 1996.
- GRUEN, A., LI, H. *Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 50, n. 4, p. 11-20, 1995.
- GRUEN, A., LI, H. *Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.
- HELLER, J.; PAKZAD, K. *Scale-Dependent Adaptation of Object Models for Road Extraction*. *IntArchPhRS*. Vol. XXXVI-3/W24. CMRT05 'Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms, and Evaluation', Vienna, August 29-30, 6 pages, (CD-ROM), 2005
- HINZ, S., WIEDEMANN, C. Increasing efficiency of road extraction by selfdiagnosis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(12): 1457-1466, 2004.
- HU, X., TAO, C.V., HU, Y. Automatic Road Extraction from Dense Urban Area by Integrated Processing of High Resolution Imagery and Lidar Data. *ISPRS 2004 XXth Congress*, Istanbul, Turkey. Commission 3: 5 pages (CD-ROM), 2004.
- KASS, M., WITKIN, A., TERZOPOULOS, D., 1987. Snakes: Active Contour Models. *Proceeding of 1 st International Conference on Computer Vision*, London, England: 259-268.

KIM, T., PARK, S-R., KIM, M-G., JUNG, S., KIM, K-O. Tracking road centerlines from high resolution remote sensing images by least squares correlation matching, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (12): 1417-1422, 2004.

KOVALEVSKII, V. A. An optimal recognition algorithm for some sequences of patterns. *Cybernetics*, 3(4), pp. 62-66, 1967.

KRAUSS, K. *Photogrammetry*, Dummler, 1° Volume, 1993.

LANCASTER, P., SALKAUSKAS, K. *Curve and surface fitting: an introduction*. Academic Press, 1990.

LEE, J. Y. *Automated Extraction of Road Networks from IKONOS Data in Urban Area*. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '05. Proceedings. IEEE International. 444-447, 2005.

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.

MACHADO, A. M. L., MITISHITA, E. A., SANTOS, R. L. *Estudo de Caso: Correção de Erros Sistemáticos em Câmaras Digitais Não Métricas*. Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação (Cd-Rom), Recife-PE, 2004.

MAKAROVIC, B. Digital mono-plotters. *ITC Journal*: 583-599, 1973.

McCULLAGH, M. J. Terrain and surface modelling systems: theory and practice. *Photogrammetric Record*, v.72, n.12, p.747-779, 1988.

McKEOWN, D. M., DELINGER, J. L. *Cooperative methods for road tracking in aerial imagery*. In: Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings: [s.1]: DARPA, 1988, p.662-672.

MENA, J. B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: A novel classification. *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, pp. 3037-3058, 2003.

MENDES, T. S., DAL POZ, A. P. *Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de estratégia de correlação*. IV Simpósio Brasileiro de Geoinformática, Caxambu, 2002.

MERLET, N., ZERUBIA, J. New prospects in line detection by dynamic programming. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18 (4): 426- 431, 1996.

MONTANARI, U. *On Limit properties in Digitization Schemes*, Journal of the ACM, Vol. 17, pp. 348-360, 1970.

MORTENSEN, E. N., BARRETT, W. A. *Intelligent scissors for image composition*. SIGGRAPH 95, the 22nd annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles, CA, pp. 191-198, 1995.

NEUENSCHWADER, W. M., FUA, P., IVERSON, L., SZEKELY, G., KUBLER, O., 1997. Ziplock snakes. *International Journal of Computer Vision*, 25(6): 191- 201.

NEVATIA, R., BABU, K. R. *Linear feature extraction and description. Computer Graphics and Image Processing*, v. 13, p. 257-269, 1980.

PETRIE, G., KENNIE, T. J. M. *Terrain modelling in surveying and civil engineering*. Caithness:Whittles, 1990.

QUAM, A. *Road tracking and anomaly detection in aerial imagery*. Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, p. 51-55, 1978.

RUSKONÉ, R., AIRAULT, S., JAMET, O. *A road extraction system using the connectivity properties of the network*. Zeitschrift fur Photogrammetrie und Fernerkundung, V.5, N.94, p. 174 – 180, 1994.

SHUFELT, J., MCKEOWN, D. Fusion of monocular cues to detect man-made structures in aerial imagery. *Comput. Vision Graphics Image Process.* 57 (1993), pp. 307–330.

SILVA, M. A. O. *Verificação automática da malha viária georreferenciada em imagens digitais*. Presidente Prudente, 2005. 147p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

SOWMYA, A., TRINDER, J. Modelling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 55 (1): 34-47, 2000.

STILLA, U. *Map aided structural analysis of aerial images*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , 50(4):3-10, 1995.

STOICA, R., DESCOMBES, X., ZERUBIA, J. A Gibbs Point Process for Road Extraction from Remotely Sensed Images. *International Journal of Computer Vision*, 57(2): 121 – 136, 2004.

VALE, G. M. *Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica*. Presidente Prudente, 2003. 85p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

WOLF, P. R., DEWITT, B. A. *Elements of Photogrammetry - with Applications in GIS*, 3rd ed, McGraw-Hill, New York, 2000, 608 pp.

YAMADA, H., MERRIT, C., KASVAND, T. *Recognition of Kidney Glomerulus by Dynamic Programming Matching Method*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Volume 10, Issue 5, pp 731 - 737, 1988.

YAMAMOTO, J. K. *A review of numerical methods for the interpolation of geological data*. Anais Academia Brasileira de Ciências, v.1, n.70, 1998.

YU, Z. W. *Surface interpolation from irregularly distributed points using surface splines, with Fortran program.* Computers & Geosciences, n. 27, 877-882, 2001.

ZHU, P., LU, Z., CHEN, X., HONDA, K., EIUMNOH, A. Extraction of City Roads Through Shadow Path Reconstruction Using Laser Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (12): 1433-1440, 2004

ZLOTNICK, A, CARNINE, P. D. *Finding road seeds in aerial images.* Computer Vision, Graphics, and Image Processing, V.57, N.2, p. 243 – 260, 1993.

APÊNDICE A - TÓPICOS FUNDAMENTAIS SOBRE FOTOGRAMETRIA E REFERENCIAIS

Neste capítulo são apresentados tópicos que são de fundamental importância para o desenvolvimento da metodologia proposta. Tópicos estes que estão relacionados com a orientação de imagens, o tratamento de erros sistemáticos, os modelos fotogramétricos, os referenciais e as transformações de coordenadas nos espaços imagem e objeto e entre espaços.

A.1 Sistemas de Coordenadas do Espaço Imagem

A.1.1 Sistema Fiducial

As marcas fiduciais são sinais gravados nas bordas das fotos no instante de tomada e servem para materializar o sistema de coordenadas da foto, chamado de Sistema Fiducial.

Uma ilustração muito usual de Sistema Fiducial, segundo Andrade (1998), é a esquematizada na figura 1.

Este sistema tem origem no centro fiducial (C_F), o qual é definido pela intersecção das linhas que unem as marcas fiduciais opostas. O eixo x_f tem a mesma direção da linha que une as marcas fiduciais mais próximas da linha de vôo, sendo as coordenadas x_f positivas neste sentido. O eixo y_f é posicionado transversalmente ao eixo x_f , 90° no sentido anti-horário. O sistema situa-se no plano do diapositivo.

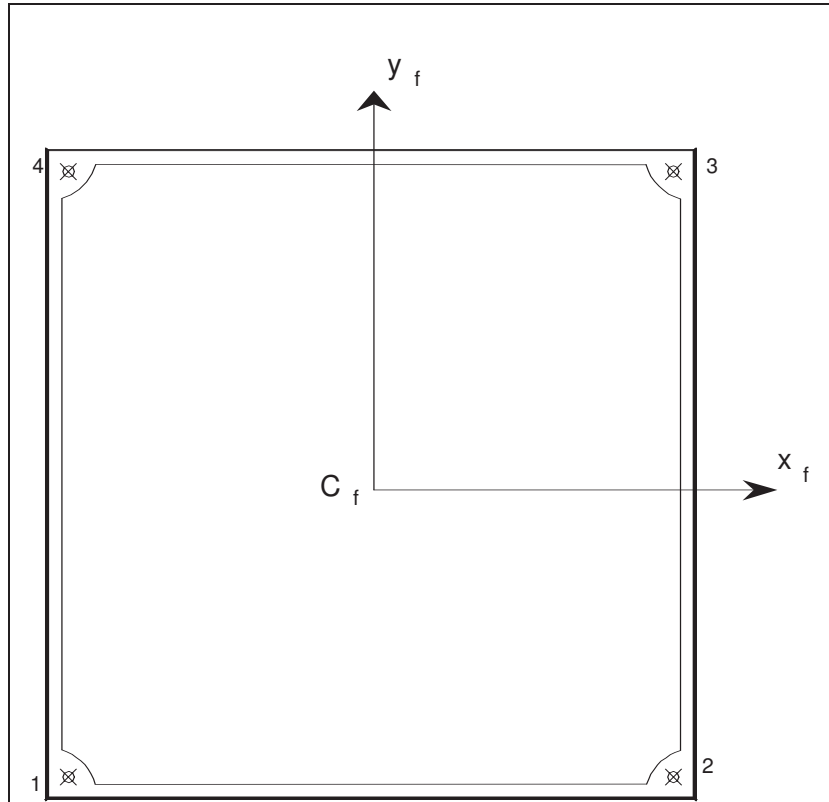


Figura 1 - Sistema Fiducial com marcas fiduciais nos cantos

A.1.2 Sistema Fotogramétrico

O Sistema Fotogramétrico é um sistema de coordenadas tridimensional com origem coincidente com o ponto nodal anterior, ou apenas, Centro Perspectivo (CP). Como mostra a Figura 2, os eixos x e y são paralelos aos eixos x_f e y_f . O eixo z possui a direção do eixo óptico do sistema de lentes, e é definido de forma a tornar o sistema destrógiro (LUGNANI, 1987). A coordenada z de um ponto qualquer é designada por $-f$. Dessa forma, a posição de um ponto situado no plano do diapositivo é dada por $(x, y, -f)$.

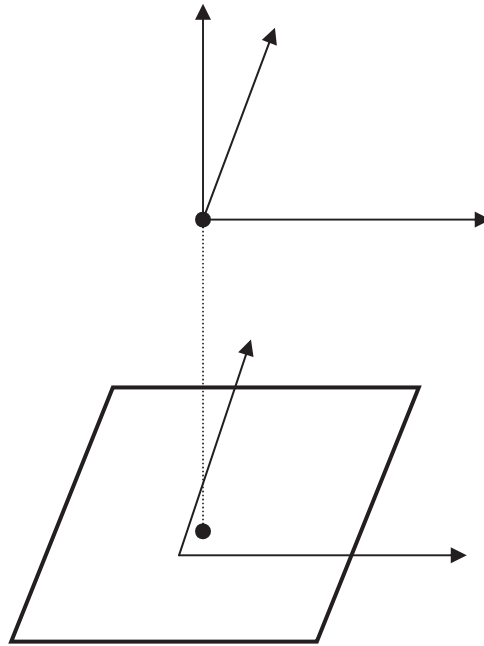


Figura 2 – Sistema de coordenadas do diapositivo

Como mostra a Figura 2, o ponto principal (pp) não coincide necessariamente com o Centro Fiducial (C_F). Isto ocorre devido à dificuldade em se alinhar perfeitamente o eixo ótico da câmara com o centro fiducial. Este pequeno deslocamento é determinado durante o processo de calibração de câmara, sendo representado pelas coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) (MIKHAIL et al., 2001).

A relação entre ambos os sistemas é dada por:

$$\begin{cases} x = x_f - x_0 \\ y = y_f - y_0 \\ z = -f \end{cases} \quad (1)$$

no qual,

- (x, y, z) : coordenadas fotogramétricas;
- (x_f, y_f) : coordenadas fiduciais;
- (x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal referidas ao sistema fiducial; e
- f : distância focal.

A.1.3 Sistema de Coordenadas da Imagem Digital

O sistema de coordenadas de uma imagem digital é um sistema plano-retangular com origem no canto superior esquerdo, sendo o eixo L coincidente com a primeira linha e o eixo C com a primeira coluna (Figura 3).

Para a utilização de uma imagem digital em processos fotogramétricos, faz-se necessário transformar as coordenadas de um ponto qualquer do sistema de imagem para o sistema com origem no ponto principal, aqui denominado de sistema de coordenadas fotogramétrico. Para isto, são feitas uma translação e uma reflexão no eixo y (Figura 3). Posteriormente, dois fatores de escala que correspondem ao tamanho do pixel (p_x , p_y) devem ser aplicados para obter as coordenadas ao sistema de medidas utilizado.

As coordenadas reduzidas são obtidas através das expressões:

$$x = \left(L - \frac{W - 1}{2} \right) \cdot p_x \qquad y = - \left(C - \frac{H - 1}{2} \right) \cdot p_y \qquad (2)$$

onde:

L e C são as coordenadas do *pixel* na imagem (linha, coluna);

x e y são as coordenadas reduzidas ao referencial fotográfico;

W número de colunas (largura da imagem);

H número de linhas (altura da imagem);

p_x e p_y são as dimensões do pixel nas suas componentes C e L, respectivamente.

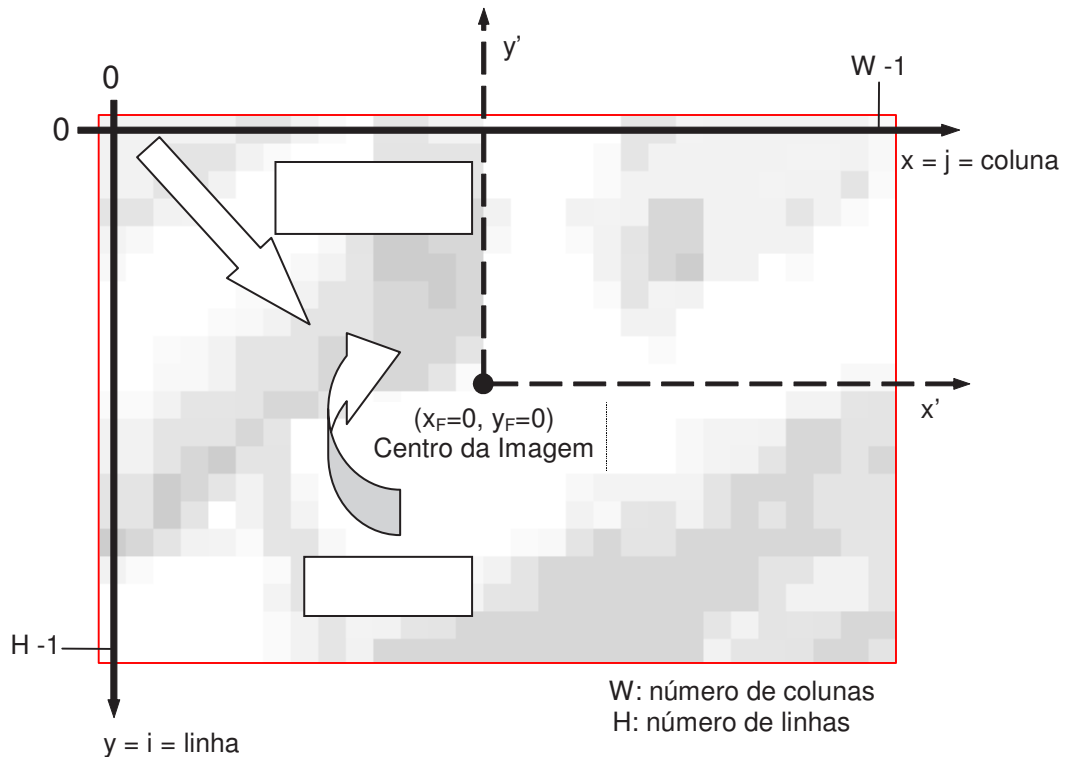


Figura 3 - Representação da mudança do sistema de imagem para o sistema fiducial

A.2 Correção dos erros sistemáticos

A imagem gerada por uma câmara fotogramétrica ou digital apresenta distorções resultantes de desvios da projeção central, e são causados por erros sistemáticos (MACHADO et al., 2004). Para que se possa utilizar os métodos de ajustamento por mínimos quadrados, largamente empregados em fotogrametria, deve-se identificar os erros sistemáticos (modelando-os) e corrigi-los, de forma que os ajustamentos trabalhem apenas com erros aleatórios. A modelagem introduz diversos parâmetros tais que permitam a reconstrução da geometria projetiva no instante de tomada da foto, e sua determinação se dá através de um processo de calibração (MACHADO et al., 2004).

As principais fontes de erros sistemáticos numa câmara analógica são (ANDRADE, 1998):

- Distorções do filme devido a contração, dilatação e não planura do filme;
- Deslocamento do ponto principal;
- Distorção das lentes;
- Distorções devido a refração atmosférica; e
- Distorção devido a curvatura da Terra.

A formulação para correção de erros sistemáticos existentes em uma imagem embasa-se em teorias bem fundamentadas. A decisão da correção, ou não, de cada erro sistemático dependerá da acurácia exigida no trabalho fotogramétrico em questão, e da magnitude do erro sistemático (WOLF e DEWITT, 2000).

Nas seções seguintes são estudados os erros sistemáticos, incluindo as formulações matemáticas para corrigi-los.

A.2.1 Deformações do Filme

A qualidade dos filmes aéreos, quanto à estabilidade métrica, aumentou consideravelmente (ANDRADE, 1998). Contudo ainda é necessário corrigir as deformações do filme nas coordenadas dos pontos observados. Essas deformações são decorrentes da contração, dilatação e não-planura do filme e são causadas por variações na temperatura, umidade relativa do ar, tensões a que o filme é submetido e envelhecimento (ANDRADE, 1998). Estes erros sistemáticos devem então ser corrigidos para que não haja a propagação do erro para o resultado dos processos posteriores.

As deformações do filme são geralmente corrigidas através de uma transformação geométrica. Existem vários modelos de transformação que podem ser utilizados, entre eles,

transformação isogonal, afim, projetiva e polinomial (MIKHAIL et al., 2001). Adotando-se a transformação afim, a correção é dada como segue:

$$\begin{bmatrix} C \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

- a, b, c, d, Δx e Δy : são os parâmetros de transformação afim;
- (L, C): coordenadas das marcas fiduciais observadas no sistema digital; e
- (x_f , y_f): coordenadas das marcas fiduciais calibradas.

Para o cálculo dos parâmetros de transformação utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). A partir da transformação inversa, obtêm-se as coordenadas dos pontos observados na foto no sistema fiducial e, por conseguinte, corrigidas das deformações.

$$\begin{bmatrix} C \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} C - \Delta x \\ L - \Delta y \end{bmatrix} \quad (4)$$

A.2.2 Distorção das Lentes

Ao atravessar o sistema de lentes o raio luminoso sofre uma série de desvios provocando um deslocamento indesejado dos pontos imagem da sua posição ideal. As formulações matemáticas desenvolvidas para modelar as distorções das lentes constam de duas componentes (WOLF e DEWITT, 2000): distorção radial simétrica e distorção descentrada.

A distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a componente radial indesejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou um sistema de lentes (ANDRADE, 1998). Dessa forma, um raio de luz ao atravessar um sistema de lentes

com um ângulo de incidência α com o eixo óptico, refrata-se com valor $\alpha + \delta\alpha$, provocando um deslocamento Δr no ponto imagem (Figura 4).

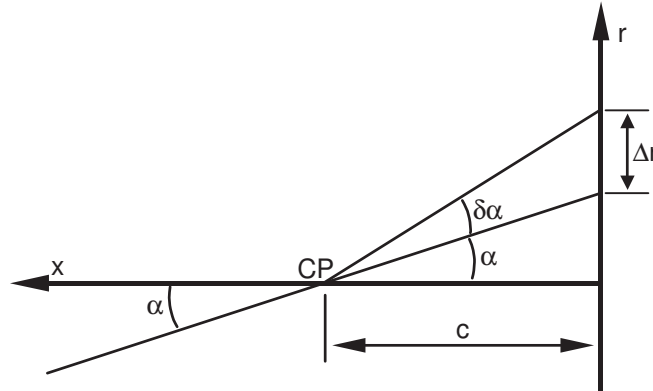


Figura 4 – Distorção radial simétrica (Fonte: Adaptado de Andrade, 1998)

O modelo desenvolvido por Conrady, onde o efeito da distorção radial simétrica é descrito por um polinômio de ordem ímpar na distância radial (r), pode ser utilizado para corrigir a distorção radial (ANDRADE, 1998).

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (5)$$

onde:

- Δr : distorção radial;
- r : distância radial do ponto imagem ao ponto principal; e
- k_i : coeficientes de distorção radial da lente.

A distância radial (r), como mostra a Equação 6, é dada em função das coordenadas fotogramétricas (x , y).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

Como é apresentado na Figura 5, as componentes de distorção radial, designadas por δx e δy (Equação 8), são obtidas por semelhança de triângulos.

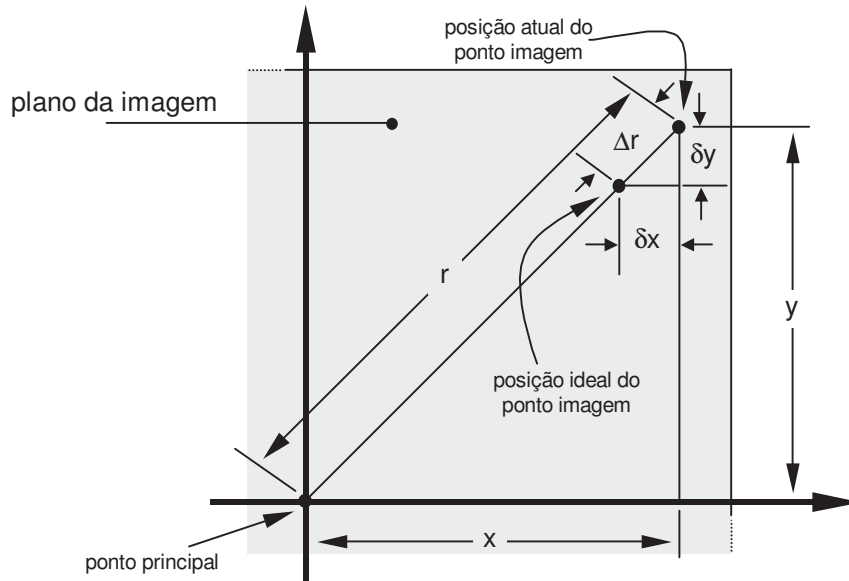


Figura 5 – Relação entre a distorção radial e as correções para as componentes x e y

(Fonte: Adaptado de Andrade, 1998)

Pelo triângulo semelhante temos (Wolf e Dewitt, 2000):

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\delta x}{x} = \frac{\delta y}{y} \quad (7)$$

a partir do qual,

$$\begin{aligned} \delta x &= x \cdot \frac{\Delta r}{r} = x \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \delta y &= y \cdot \frac{\Delta r}{r} = y \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

Dessa forma, as coordenadas fotogramétricas corrigidas do efeito da distorção radial simétrica (x' , y') são dadas por:

$$\begin{aligned} x' &= x - \delta x \\ y' &= y - \delta y \end{aligned} \quad (9)$$

A figura 6 mostra um exemplo do efeito da distorção radial simétrica para uma imagem obtida com uma câmara não-métrica.

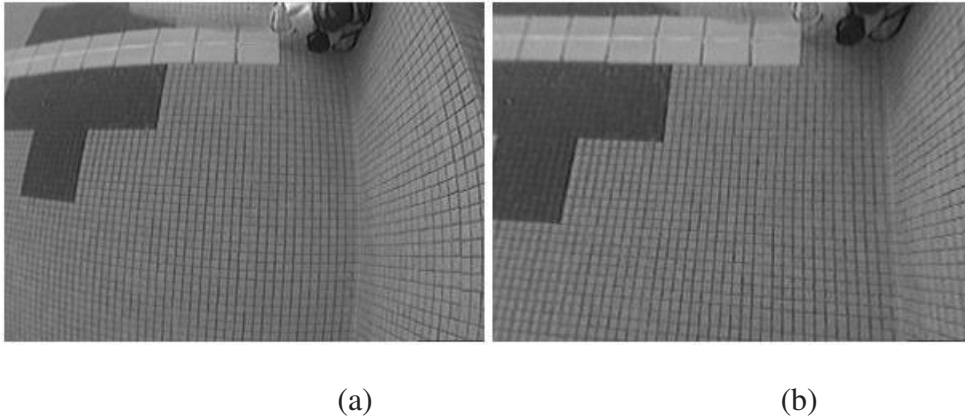


Figura 6 – Imagem com distorção radial simétrica (a) antes da correção e (b) após a correção (Fonte: <http://www.cs.ualberta.ca/~fiala/radfind.htm>)

Da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõe uma objetiva, resultam em deslocamentos de pontos na imagem. Trata-se da distorção descentrada. Esta é composta pelas distorções tangencial (δt) e radial assimétrica (δr), conforme demonstrou Conrady (1919) *apud* Andrade (1998).

A Figura 7 mostra essa concepção.

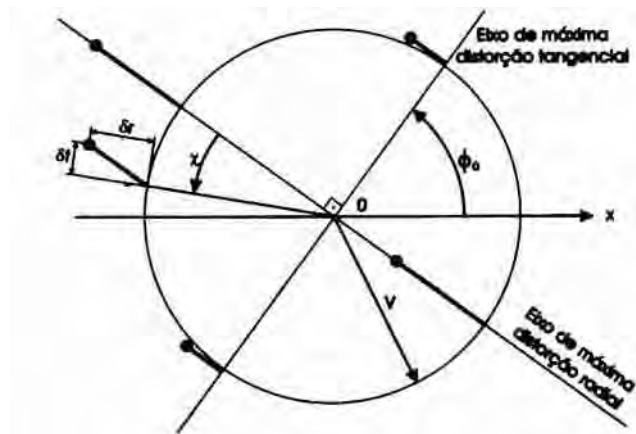


Figura 7 – Distorção descentrada (Fonte: Andrade, 1998)

Ainda de acordo com Conrady, as distorções radial assimétrica e tangencial são determinadas por (ANDRADE, 1998):

$$\begin{aligned}\delta r &= 3 \cdot P_3 \cdot V^2 \cdot \cos \chi \\ \delta t &= P_3 \cdot V^2 \cdot \sen \chi\end{aligned}\tag{10}$$

onde:

- δr e δt : distorção radial assimétrica e distorção tangencial;
- P_3 : constante;
- V : distância entre o eixo ótico e o ponto imagem; e
- χ : ângulo medido no plano da imagem, do eixo de máxima distorção radial (eixo perpendicular ao eixo de máxima distorção tangencial) até a radial que contém a imagem não distorcida do ponto.

Na década de 60, numa série de trabalhos, Brown adaptou o trabalho de Conrady para aplicações fotogramétricas, resultando nas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}x' &= x - \left[P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \right] \\ y' &= y - \left[2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) \right]\end{aligned}\tag{11}$$

onde,

- (x', y') : coordenadas fotogramétricas corrigidas da distorção descentrada;
- (x, y) : coordenadas fotogramétricas;
- r : distância radial do ponto imagem ao ponto principal (Equação 6); e
- P_1 e P_2 : coeficientes de distorção descentrada.

A.2.3 Distorções devido a Refração Atmosférica

A refração fotogramétrica aumenta com a altitude da câmara até aproximadamente 16 Km daí então começa a diminuir em virtude do ar tornar-se mais rarefeito com a altitude (ANDRADE, 1998).

Devido a esta condição, como mostra a Figura 8, o raio de luz não percorre um caminho retilíneo na atmosfera (WOLF e DEWITT, 2000). O raio luminoso que chega a partir do ponto A forma um ângulo α com a vertical. Se a refração atmosférica fosse ignorada, o raio pareceria ser proveniente do ponto B. De modo a eliminar o efeito causado pela refração, assume-se que o raio de luz percorre um caminho retilíneo, sendo o efeito compensado através de correções aplicadas aos pontos imagens.

Na Figura 8, se o raio de luz proveniente do ponto A tivesse percorrido um caminho linear, o ponto imagem corresponderia a a' . A distorção angular devido à refração é dada por $\Delta\alpha$, e a distorção linear na fotografia é representada por Δr . A refração causa um pequeno deslocamento na posição dos pontos imagens. A magnitude da distorção devido à refração atmosférica aumenta com o aumento da altura de vôo e do ângulo α . O efeito ocorre radialmente a partir do ponto principal, e é nulo na direção do nadir (MIKHAIL et al., 2001).

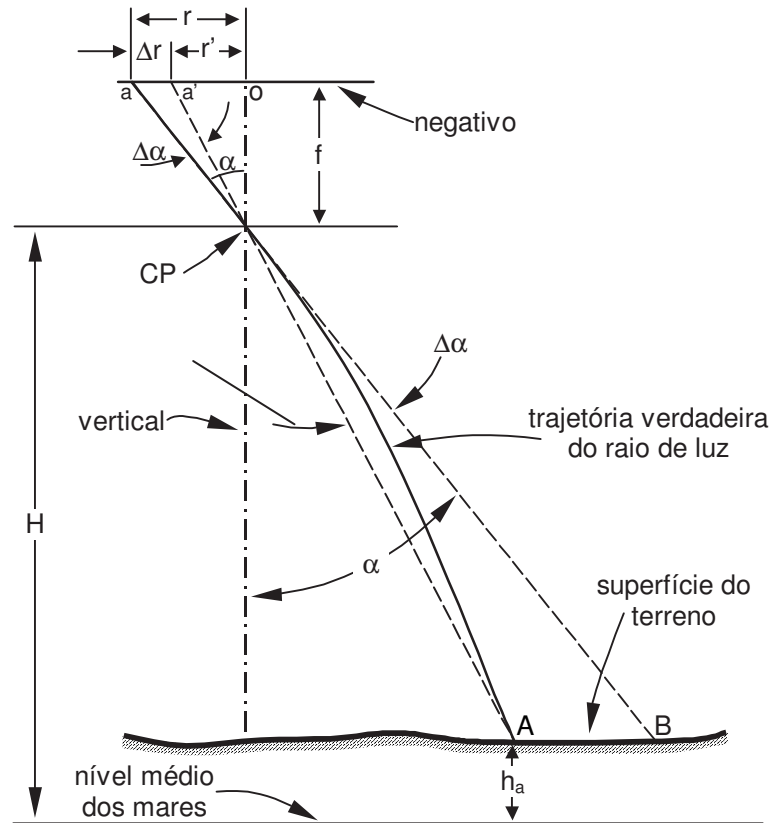


Figura 8 – Refração atmosférica numa fotografia aérea (Fonte: Wolf e Dewitt, 2000)

O modelo matemático que expressa $\Delta\alpha$ em função de α é dado por (MIKHAIL et al., 2001):

$$\Delta\alpha = k \cdot \tan(\alpha) \quad (12)$$

no qual, k é uma constante relacionada com as condições atmosféricas. Ainda, a constante k pode ser vista como a parcela de refração para um raio de luz a um ângulo de 45° .

De certa forma, existem vários métodos para a determinação de k , com a maioria assumindo uma atmosfera padrão. Um método conveniente, adaptado do manual de Fotogrametria é dado por (WOLF e DEWITT, 2000):

$$k = 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot (H - h) \cdot [1 - 0,02 \cdot (2H - h)] \quad (13)$$

no qual,

- H: altura de vôo (km); e
- h: altura do ponto objeto (km).

A distorção linear (Δr) devido a refração atmosférica é determinada pelas seguintes equações (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\tan \alpha = \frac{r}{f} \quad (14)$$

$$\Delta \alpha = k \cdot \frac{r}{f} \quad (15)$$

$$r' = f \cdot \tan(\alpha - \Delta \alpha) \quad (16)$$

$$\Delta r = r - r' \quad (17)$$

$$\begin{aligned} x' &= \left(1 - \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot x \\ y' &= \left(1 - \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot y \end{aligned} \quad (18)$$

A.2.4 Efeito da Curvatura Terrestre

O efeito da Curvatura Terrestre não pode ser considerado um erro em fotogrametria, e sim, um problema de definições de sistemas de coordenadas (KRAUS, 1993). A Fotogrametria trabalha no sistema de coordenadas cartesiano tridimensional. A altitude dos pontos de controle, resultantes de um levantamento de campo, por outro lado, são referenciadas ao elipsóide e, além disso, suas componentes XY sofrem distorção (mais ou menos) da projeção matemática do elipsóide sobre o plano. Desta forma, para compatibilizar, deve-se transformar as coordenadas dos pontos de controle para um sistema cartesiano tridimensional antes de iniciar os trabalhos fotogramétricos (KRAUS, 1993). Uma imagem aérea resulta da projeção central de uma porção da superfície da Terra sobre uma superfície

plana. A projeção de uma superfície curva em uma superfície plana causa distorção. Em Fotogrametria, a curvatura terrestre provoca um pequeno deslocamento do ponto imagem de sua posição ideal. Este efeito é mostrado Figura 9 (MIKHAIL et al., 2001).

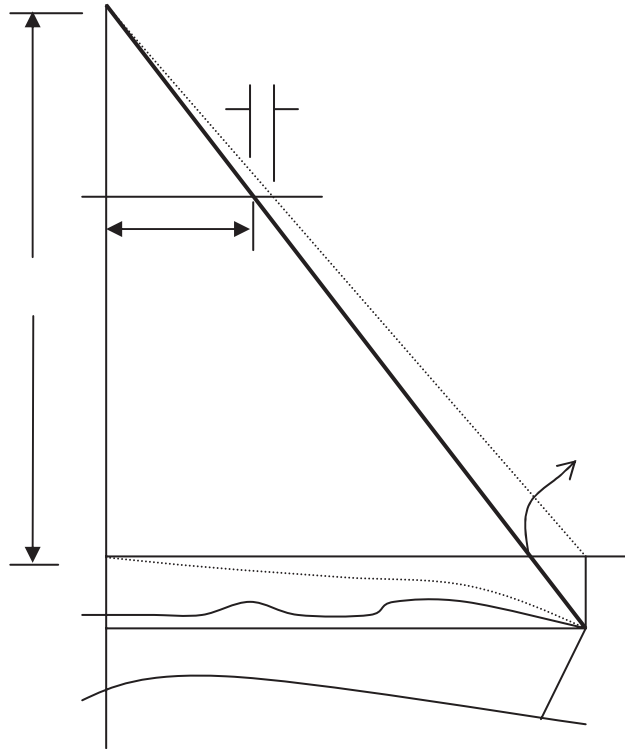


Figura 9 – Deslocamento devido a curvatura da Terra (Fonte: Moffit e Mikhail, 1980)

Na Figura 9, o ponto P, cuja elevação h , está referenciada ao nível mar, aparece na imagem aérea (assumida vertical) no ponto imagem p . O plano $N'P'$ pode ser considerado o plano XY. O ponto P' é a posição do ponto P no terreno e na fotografia é dado por p' . O efeito da curvatura terrestre pode ser compensado deslocando-se o ponto p na fotografia radialmente para fora a partir do ponto nadir. Essa correção é dada por:

$$d_E = \frac{r^3 H'}{2f^2 R} \quad (19)$$

onde,

- d_E : deslocamento radial dos pontos devido a curvatura da Terra;
- H: altura de vôo;
- r: distância radial do ponto imagem ao ponto principal;
- R: raio da Terra; e
- f: distância focal da câmara.

A.3 Sistema de Coordenadas do Espaço Objeto

Para definir posições de objetos torna-se necessária a adoção de um referencial adequado. A definição rigorosa do sistema de referência pode ser bastante complexa (MONICO, 2000). Por esta razão, quando se procura estabelecer um referencial, muitas vezes se admite alguma forma de simplificação. Esta simplificação é realizada em função de fatores como: adequação de nível didático, qualidade exigida dos valores processados, e complexidade da definição do sistema e dos modelos matemáticos envolvidos. Assim, seguindo essa linha, pode-se ter a Terra associada a um modelo plano, esférico, elipsóidico, geoidal ou ainda um modelo não rígido, em Topografia, Astronomia, Geodésia e Geofísica, respectivamente (LUGNANI, 1987).

Ao se tratar de sistemas de referência e projeção, deve-se enfatizar que são as coordenadas que constituem o vínculo natural entre os diferentes sistemas de projeção cartográfica que, por sua vez, se relacionam diretamente a um sistema geodésico de referência.

Os sistemas de projeção mais utilizados em cartografia são as projeções conformes (UTM, Cônica Conforme de Lambert, Polar Estereográfica) (ROBINSON et al., 1995).

A.3.1 Sistemas de coordenadas e projeções utilizadas no Brasil

Os sistemas de referência são utilizados para descrever as posições de objetos. Quando é necessário identificar a posição de uma determinada informação na superfície da Terra são utilizados os sistemas de coordenadas materializados, também conhecidos por Sistemas de Referência Terrestres.

Dentre os vários referenciais utilizados, pode-se citar (Lugnani, 1987): Sistema Geodésico, Sistema Geodésico Cartesiano e Sistema Cartesiano Local.

Além dos Sistemas de Referência Geodésicos, as coordenadas podem ser apresentadas em uma superfície plana (Sistema de Coordenadas Planas) e que recebem a denominação da projeção na qual estão associadas.

A.3.1.1 Sistema de Coordenadas Geodésicas

Independente do método utilizado para se representar ou projetar uma determinada superfície no plano, deve-se adotar uma superfície (elipsóide de revolução, por exemplo) que sirva de referência, garantindo uma concordância das coordenadas na superfície terrestre. Neste sistema as coordenadas são definidas sobre um elipsóide. As definições de coordenadas geodésicas de um ponto qualquer P na superfície do elipsóide são (Figura 10):

- A latitude geodésica (φ) é o ângulo contado sobre o meridiano que passa por P, compreendido entre a normal passante por P e o plano equatorial.
- A longitude geodésica (λ) é o ângulo contado sobre o plano equatorial, compreendido entre o meridiano de Greenwich e o ponto P.
- A altitude elipsoidal (h), conhecida também por altitude geométrica, corresponde à distância de P à superfície do elipsóide medida sobre a sua normal.

Deste modo, a localização de qualquer ponto da superfície terrestre poderá ser definida, de modo unívoco, quando se dispõe de um sistema de coordenadas único e materializado.

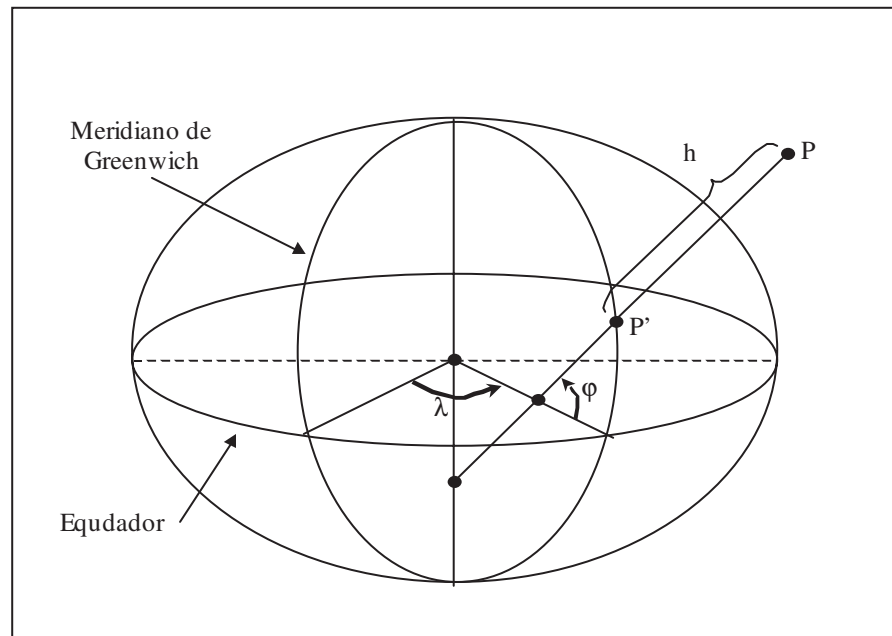


Figura 10 - Latitude (φ) e longitude (λ) geodésicas e altitude geométrica (h)

(Fonte: Adaptado de Robinson et al., 1995)

A.3.1.2 Sistema de Coordenadas Cartesianas

Um sistema de coordenadas cartesianas no espaço 3-D é caracterizado por um conjunto de três retas (X, Y e Z), denominadas de eixos coordenados, mutuamente perpendiculares. Este sistema, associado a um Sistema de Referência Geodésico, recebe a denominação de Sistema Cartesiano Geodésico (CG) de modo que (IBGE, 2001) (Figura 11):

- O eixo X seja coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 0° ;
- O eixo Y coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 90° ;
- O eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra e positivo na direção norte; e

- Origem: centro geométrico do elipsóide. Se a origem estiver localizada no centro de massas da Terra (geocêntrico), as coordenadas são denominadas de geocêntricas.

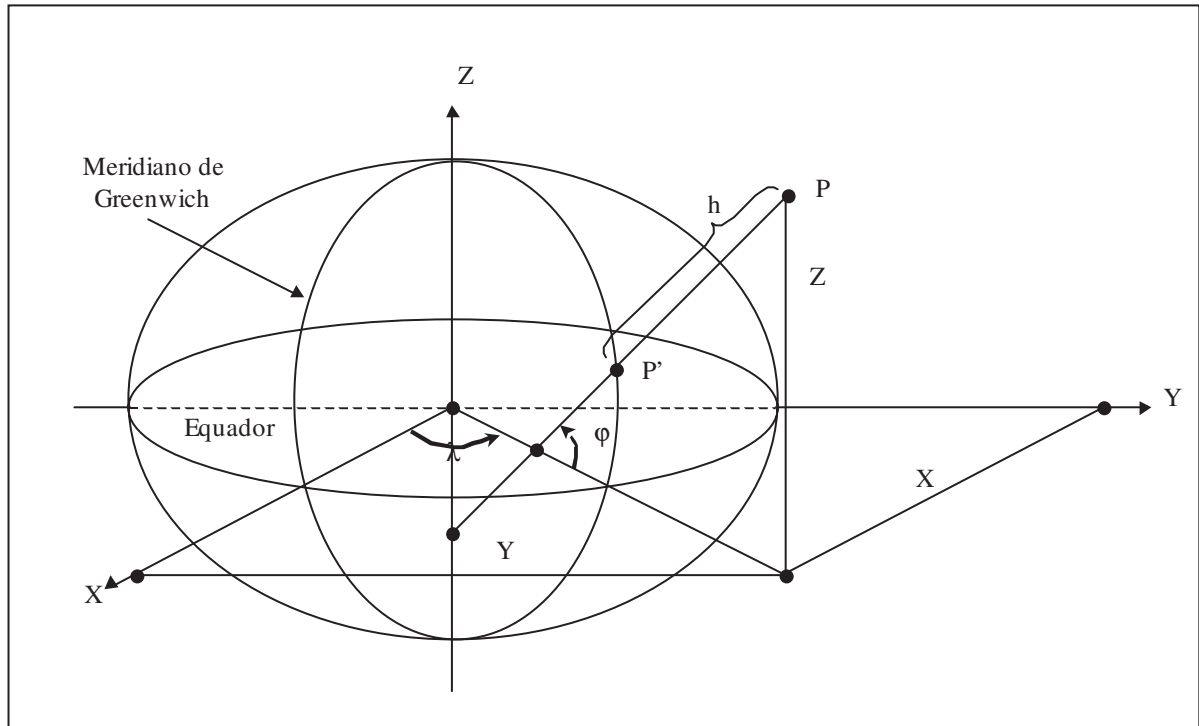


Figura 11 – Sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z) e coordenadas geodésicas (φ , λ , h) (Fonte: Adaptado de Robinson et al., 1995)

A.3.1.3 Sistema Cartesiano Local

Geralmente chamado de *sistema geodésico local*. Este sistema tem sua origem sobre a normal ao elipsóide, passando pelo ponto da superfície escolhido como origem. É definido de modo que (Figura 12):

- O eixo Y tem a direção do norte geodésico;
- O eixo Z do sistema coincide com a normal ao elipsóide na origem;
- O eixo X tem a direção tal que torna o sistema destrógiro.

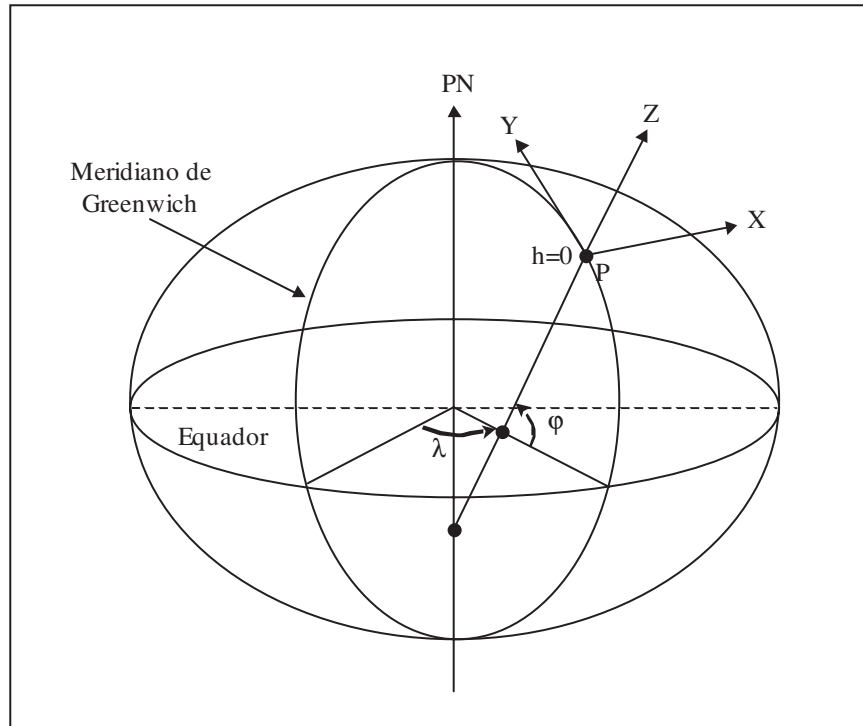


Figura 12 – Sistema Cartesiano Local (X, Y, Z) e sistema geodésico (φ , λ , h). Na figura a origem do Sistema Local se situa no ponto onde $h=0$

(Fonte: Adaptado de Robinson et al., 1995)

Portanto, para se referir um conjunto de coordenadas a um Sistema Cartesiano Local, deve-se conhecer, a priori, as coordenadas geodésicas (φ , λ , h) do ponto definido como origem do sistema.

A.3.1.4 Sistema de Coordenadas Planas e Projeções

As coordenadas referidas a um determinado Sistema de Referência Geodésico podem ser representadas no plano através das componentes Norte e Leste e são o tipo de coordenadas normalmente encontradas em mapas (IBGE, 2001). Para representar as feições de uma

superfície curva, tal como o elipsóide, em superfície plana (cartas, mapas, plantas etc.) são necessárias formulações matemáticas chamadas de Projeções.

Dependendo das aplicações e utilizações que sejam dadas a um produto cartográfico pode-se utilizar diversos sistemas de projeção (BAKKER, 1965). Os sistemas de projeção mais utilizados em aplicações cartográficas são as projeções conformes (MALING, 1992). Dentre todas as projeções com esta propriedade, uma de grande relevância é a projeção Transversa de Mercator (TM), a qual é obtida pela projeção de pontos do modelo representativo da superfície terrestre sobre um cilindro tangente em um meridiano qualquer, representado em verdadeira grandeza, que posteriormente é desenvolvido num plano.

A partir do sistema TM são derivados vários outros sistemas, denominados Sistemas Modificados, dos quais pode-se citar: UTM (*Universal Transverse Mercator*), RTM (*Regional Transverse Mercator*) e LTM (*Local Transverse Mercator*) (GALO, 2000).

A.3.1.4.1 Sistema UTM

O sistema de projeção UTM é largamente utilizado no Brasil e é normatizado pelo IBGE para as escalas que constituem o levantamento sistemático, ou seja, entre 1:1.000.000 e 1:25.000. Para o caso de escalas maiores, não existe um padrão nacional. Há, portanto, algumas normas como, por exemplo a do IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico), que regulamenta o uso para o estado de São Paulo.

O sistema UTM é um dos sistemas derivados da projeção conforme de Gauss, com a finalidade de reduzir as deformações nos extremos do fuso. Neste sistema o cilindro que era tangente ao meridiano central passa a ser secante ao elipsóide de revolução, e passa-se a ter duas linhas de distorção nula e equidistantes ao meridiano central (Galo, 2000). Tal sistema de projeção tem representação entre os paralelos 84°N a 80°S.

Relaciona-se, a seguir, suas principais características (Brunetti, 1994):

- Como trata-se de uma projeção conforme, o sistema UTM conserva ângulos e a forma de pequenas áreas;
- Tem como superfície de projeção 60 cilindros transversos e secantes à superfície de referência (elipsóide), cada um com amplitude de 6°;
- Fusos com 6° de amplitude em longitude, limitados pelos meridianos múltiplos de 6° (... , 60°, 54°, 48°, ...);
- Coeficiente de deformação (K ou m_0) no meridiano central é igual 0,9996;
- Na intersecção dos cilindros com a superfície de referência – linhas de secância – o coeficiente de deformação linear é unitário;

A origem das coordenadas TM, do qual são obtidas as coordenadas UTM, em cada sistema parcial, encontra-se no cruzamento do equador com o meridiano central. No entanto, as coordenadas y a oeste do meridiano central e x ao sul do equador são sempre negativas. Logo, para se obter coordenadas positivas, é feita uma translação, acrescentando-se as constantes 10.000.000m para as coordenadas N, ao sul do equador, e 500.000m para as coordenadas E. Assim, as coordenadas (N,E) no sistema UTM podem ser obtidas a partir das coordenadas (x,y) no sistema TM, por:

➤ Hemisfério Sul:

$$N = 10.000.000 + 0,9996 x \quad (20)$$

$$E = 500.000 + 0,9996 y \quad (21)$$

➤ Hemisfério Norte:

$$N = 0,9996 x \quad (22)$$

$$E = 500.000 + 0,9996 y \quad (23)$$

O terno de coordenadas (N,E,H) ou (N,E,h) constitui um referencial híbrido, pois (N,E) são coordenadas planas e H (altitude ortométrica) ou h (altitude geométrica) estão referidas a uma superfície não plana. Na superfície onde H é definido, todos os pontos possuem o mesmo potencial do campo de gravidade da Terra e que melhor se aproxima do nível médio dos mares, o geóide.

A.4 Transformação de Coordenadas

Os sistemas de referência são utilizados para descrever de modo unívoco as posições de objetos. Em atividades ligadas às Ciências Cartográficas, quando é necessário definir a posição de um determinado objeto na superfície da Terra, são utilizados os Sistemas de Referência Geodésicos. Além dos Sistemas de Referência Geodésicos, as informações posicionais podem ser apresentadas em diversas superfícies: em uma superfície elipsóidica recebem a denominação de coordenadas geodésicas e em uma superfície plana recebem a denominação da projeção a qual estão associadas, como por exemplo, as coordenadas planas UTM.

A.4.1 Modelos Elipsoidais

Para fins práticos em Geodésia, aproxima-se a Terra de um elipsóide de revolução. Elipsóide de revolução é um sólido gerado pela rotação de uma elipse em torno do eixo dos pólos (eixo menor). Faz-se necessário salientar que alguns modelos elipsoidais são destinados ao estabelecimento de “*data*” regionais. Assim, por diversas razões, cada país adota como referência o elipsóide mais indicado.

No Brasil, por um certo período, adotou-se o elipsóide de Hayford, cujas dimensões foram consideradas as mais convenientes para a América do Sul. Atualmente, no entanto, utiliza-se com mais frequência o elipsóide da União Astronômica Internacional, homologado em 1967 pela Associação Internacional de Geodésia, denominado GRS-67. O *datum* Córrego Alegre, utilizado em uma série de produtos por diversas instituições, considera como figura geométrica o elipsóide de Hayford e o *datum* SAD-69 utiliza o GRS-67, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros dos elipsóides atualmente utilizados no Brasil (IBGE, 2001)

Elipsóide	Semi-eixo maior (a) (m)	Semi-eixo menor (b) (m)	Achatamento (f)
Hayford	6.378.338,00	6.366.911,946	1/297
GRS-67	6.378.160,00	6.356.774,719	1/298,25
GRS-80	6.378.137,00	6.356.752,298	1/298,2572221

Além dos modelos elipsoidais utilizados em *data* regionais, existem aqueles estabelecidos com o intuito de serem globais, de oferecer suporte às atividades geodésicas e cartográficas realizadas sobre a Terra como um todo. Tem-se como exemplo o *datum* WGS-84 que em sua primeira realização utiliza como elipsóide de referência o GRS-80.

A.4.2 Referências Geodésicas utilizados no Brasil

Define-se por Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) o conjunto de pontos geodésicos implantados na porção da superfície terrestre delimitada pelas fronteiras do país. Em outras palavras é o sistema ao qual estão referidas todas as informações espaciais no Brasil (IBGE, 2001).

A.4.2.1 Sistema Geodésico Sul Americano – SAD-69

O Brasil atualmente adota o Sistema Geodésico Sul Americano (SAD-69). O SAD-69 é um sistema geodésico regional de concepção clássica que tinha como objetivo a unificação do referencial para os trabalhos geodésicos e cartográficos na América do Sul. A sua adoção no Brasil se deu no final da década de 70. A materialização do SAD-69 foi realizada por técnicas e métodos de posicionamento terrestre, destacando-se a triangulação e poligonação.

Para o *datum* SAD-69 a imagem geométrica da Terra é definida pelo Elipsóide de Referência Internacional de 1967, aceito pela Assembléia Geral da Associação Geodésica Internacional.

Para o posicionamento espacial do GRS-67 utilizou-se de parâmetros topocêntricos obtidos no ponto origem (Ponto *Datum*), vértice geodésico Chuá, localizado no Estado de Minas Gerais. O referencial altimétrico coincide com a superfície equipotencial que contém o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na baía de Imbituba, no Estado de Santa Catarina.

Na Tabela 2 são apresentados alguns dos parâmetros definidores deste sistema (IBGE, 2001):

Tabela 2 – Parâmetros definidores do Sistema Geodésico Brasileiro – SGB

Superfície de referência:	Elipsóide de Referência Internacional de 1967 (GRS-67)
Ponto <i>datum</i>	Vértice Chuá
Coordenadas geodésicas do ponto <i>datum</i>:	Latitude = 19° 45' 41,6527" S
	Longitude = 48° 06' 04,0639" W
	Azimute (Chuá–Uberaba)=271° 30' 04",05 SWNE
Altitude ortométrica:	763,28 metros
	N=0 metros (Ondulação Geoidal)
Orientação elipsóide-geóide no ponto <i>datum</i>:	$\xi=0'',31$ (componente meridiana do desvio da vertical)
	$\eta=-3'',52$ (componente primeiro vertical do desvio da vertical)

A.4.2.2 Sistema de Referência Córrego Alegre

Anteriormente ao SAD-69 o *datum* oficialmente utilizado no Brasil foi o Córrego Alegre, que utiliza como superfície de referência o elipsóide de Hayford, definido em 1924. Neste sistema o ponto *datum* adotado foi o vértice Córrego Alegre localizado no Estado de Minas Gerais. A escolha do vértice Córrego Alegre para ponto *datum*, bem como do elipsóide internacional de Hayford para superfície matemática de referência, foram baseadas em determinações astronômicas realizadas na implantação da cadeia de triangulação em Santa Catarina (IBGE, 2001). Na Tabela 3 são apresentados alguns dos parâmetros definidores deste sistema (IBGE, 2001):

Tabela 3 – Parâmetros definidores do Sistema de Referência Córrego Alegre

Superfície de referência:	Elipsóide Internacional de Hayford 1924.
Ponto datum	Vértice Córrego Alegre.
Coordenadas geodésicas do ponto datum:	Latitude = 19° 50' 14,91" S
	Longitude = 48° 57' 41,98" W
Altitude ortométrica:	683,81 metros
	N=0 metros (Ondulação Geoidal)
Orientação elipsóide-geóide no ponto datum:	$\xi=0^\circ$ (componente meridiana do desvio da vertical)
	$\eta=0^\circ$ (componente primeiro vertical do desvio da vertical)

A.4.2.3 Sistema de Referência WGS-84

O *datum* WGS-84 é atualmente muito utilizado nos levantamentos geodésicos no Brasil e no mundo, porém não é oficializado como *datum* a ser empregado na representação cartográfica nacional.

O WGS-84 é a quarta versão do sistema de referência geodésico global estabelecido pelo U.S. Department of Defense (DoD) desde 1960, com o objetivo de fornecer o posicionamento e navegação em qualquer parte do mundo, através de informações espaciais, conforme IBGE (2001). Ele é o sistema de referência das efemérides operacionais do sistema GPS. Desta forma, quando um levantamento é efetuado usando o GPS, as coordenadas dos pontos envolvidos serão obtidas nesse sistema de referência.

O WGS-84 tem sua origem no centro de massa da Terra, com os eixos cartesianos X, Y, Z idênticos aos do CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System* – Sistema de

Referência Terrestre Convencional), para a época 1984,0. O elipsóide de referência adotado é o GRS-80, um elipsóide de revolução geocêntrico (MONICO, 2000).

É importante ressaltar que o GRS-80 foi utilizado para a primeira realização do WGS-84. No entanto, novas realizações foram feitas usando técnica de posicionamento por GPS, com o objetivo de melhorar a precisão das coordenadas das estações monitoras utilizadas na realização do WGS-84. Essas novas realizações foram denominadas WGS-84 (G730), WGS-84 (G873) (Mônico, 2000) e WGS-84(G1150), onde G representa que o refinamento foi efetuado utilizando o GPS, e 730, 873 e 1150 representam a semana GPS em que ocorreram as realizações.

Portanto, com as novas realizações alguns parâmetros para o WGS-84 sofreram alterações. Na Tabela 4 estão os parâmetros do elipsóide do WGS-84 (G873).

Tabela 4 – Parâmetros do elipsóide do WGS-84 (Monico, 2000)

Parâmetro e valor		Descrição
$a = 6\,378\,137,00$	Igual ao anterior	Semi-eixo maior
$f = 1/298.2572221$	$1/298.257223563$	Achatamento

A.5 Transformação entre Sistemas de Coordenadas

Um dos problemas que surgiu e é freqüente na cartografia nacional é a coexistência de produtos cartográficos (cartas, plantas, mapas, etc.) em diferentes sistemas geodésicos de referência: o Córrego Alegre, Astro *Datum* Chuá, SIRGAs, SAD-69 e o WGS-84, por exemplo.

No que concerne às aplicações geodésicas atuais, um número cada vez maior de profissionais está utilizando técnicas espaciais de posicionamento, tais como o GPS. Sendo

assim, estes usuários da tecnologia GPS obtêm coordenadas geocêntricas no sistema WGS-84, que não é o sistema oficial no Brasil.

Este problema de compatibilização entre os novos levantamentos de precisão realizados com o uso do GPS e o sistema oficial adotado como referência, só poderá ser contornado na medida que se adote oficialmente, no Brasil, um referencial de característica geocêntrica, tal como o SIRGAs (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), por exemplo (Costa, 2000). Na Tabela 5 apresenta-se os parâmetros de transformação entre o SAD-69 e os sistemas de referência que são mais utilizados no Brasil, do ponto de vista prático.

Tabela 5 – Parâmetros de translação entre SAD-69 e outros sistemas (IBGE, 2001)

Parâmetros	SISTEMAS		
	Córrego Alegre	WGS-84	Astro Datum Chuá
Δx (m)	138,70	-66,87	77,0
Δy (m)	-164,40	4,37	-239,0
Δz (m)	-34,40	-38,52	-5,0

Deve-se lembrar que, além das transformações entre os referenciais citados acima, existem varias aplicações, tais como topografia e fotogrametria, onde são utilizados os sistemas cartesianos locais.

A.5.1 Transformação de Coordenadas TM em UTM e vice-versa

Para realizar esta transformação basta aplicar uma translação do quadriculado e considerar o fator de escala do meridiano central (0,9996). As translações são aplicadas de

modo a sempre obter coordenadas positivas. Deste modo, é adicionado aos valores x e y, os valores 10.000.000m e 500.000m, respectivamente.

As coordenadas N e E, no sistema UTM, são obtidas das coordenadas TM diretamente das Equações 20, 21, 22 e 23:

➤ Hemisfério Sul:

$$N = 10.000.000 + 0,9996 x$$

$$E = 500.000 + 0,9996 y$$

➤ Hemisfério Norte:

$$N = 0,9996 x$$

$$E = 500.000 + 0,9996 y$$

As coordenadas x e y, no sistema TM, são obtidas a partir das coordenadas UTM diretamente pelas equações:

➤ Hemisfério Sul:

$$x = \frac{(N - 10.000.000)}{0,9996} \quad (24)$$

$$y = \frac{(E - 500.000)}{0,9996} \quad (25)$$

➤ Hemisfério Norte:

$$x = \frac{N}{0,9996} \quad (26)$$

$$y = \frac{(E - 500.000)}{0,9996} \quad (27)$$

A.5.2 Transformação de Coordenadas TM em Coordenadas Geodésicas

As coordenadas x e y no sistema TM são transformadas em coordenadas geodésicas φ e λ , aplicando-se as equações:

$$\varphi = \varphi_1 + b_2 y^2 + b_4 y^4 + b_6 y^6 + \dots \quad (28)$$

$$\lambda = \lambda_0 + b_1 y + b_3 y^3 + b_5 y^5 + \dots \quad (29)$$

onde, λ_0 é a longitude do meridiano central e φ_1 é a latitude correspondente ao comprimento do arco meridiano, ambos são dados em radianos. Para se realizar esta transformação é necessário o pré conhecimento da longitude do meridiano central do fuso.

Os coeficientes b_1, b_2, \dots, b_6 são calculados em função da latitude φ_1 e da segunda excentricidade (e') do elipsóide adotado como referência:

$$b_1 = N_1^{-1} \sec \varphi_1 \quad (30)$$

$$b_2 = -\frac{1}{2} b_1^2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 (1 + e'^2 \cos^2 \varphi_1) \quad (31)$$

$$b_3 = -\frac{1}{6} b_1^3 (2 - \cos^2 \varphi_1 + e'^2 \cos^4 \varphi_1) \quad (32)$$

$$b_4 = -\frac{1}{12} b_1^2 b_2 [3 + (2 - 9e'^2) \cos^2 \varphi_1 + 10e'^2 \cos^4 \varphi_1 - 4e'^4 \cos^6 \varphi_1] \quad (33)$$

$$b_5 = \frac{1}{120} b_1^5 [24 - 20 \cos^2 \varphi_1 + (1 + 8e'^2) \cos^4 \varphi_1 - 2e'^2 \cos^6 \varphi_1 + \dots] \quad (34)$$

$$b_6 = \frac{1}{360} b_1^4 b_2 (45 + 16 \cos^4 \varphi_1 + \dots) \quad (35)$$

A latitude φ_1 representa a latitude do ponto $p'(\varphi_1, \lambda_0)$, que é a projeção do ponto $p(\varphi, \lambda)$ sobre o meridiano central (GALO, 2000).

A.5.3 Comprimento de Arco Meridiano (B_φ)

O comprimento de arco meridiano (B_φ) trata-se da medida do comprimento do arco que liga um ponto de latitude φ e o equador. Em Blachut et al. (1979) são apresentados dois métodos de se calcular o comprimento do arco meridiano: método convencional e o método da latitude média. Neste trabalho será apresentado somente o método de séries convencional. Este método foi escolhido por ser o menos complexo para a posterior propagação de erros.

Desta forma o valor de B_φ para uma dada latitude é dada por (BLACHUT et al., 1979):

$$B_\varphi = A_0 c \varphi - A_1 c \sin \varphi \cos \varphi (1 + A_2 \sin^2 \varphi + A_4 \sin^4 \varphi + A_6 \sin^6 \varphi + A_8 \sin^8 \varphi) \quad (36)$$

onde c é o raio de curvatura polar, dado por:

$$c = \frac{a^2}{b}, \quad (37)$$

e a e b são, respectivamente, o semi-eixo maior e menor do elipsóide adotado como superfície de referência. Os coeficientes A_0, A_1, \dots, A_8 , são obtidos pelas expressões:

$$A_0 = 1 - \frac{3}{4} e^2 \left\{ 1 - \frac{15}{16} e^2 \left[1 - \frac{35}{36} e^2 \left(1 - \frac{63}{64} e^2 \left(1 - \frac{99}{100} e^2 \right) \right) \right] \right\} \quad (38)$$

$$A_1 = \frac{3}{4} e^2 \left\{ 1 - \frac{25}{16} e^2 \left[1 - \frac{77}{60} e^2 \left(1 - \frac{837}{704} e^2 \left(1 - \frac{2123}{1860} e^2 \right) \right) \right] \right\} \quad (39)$$

$$A_2 = \frac{5}{8} e^2 \left[1 - \frac{139}{144} e^2 \left(1 - \frac{1087}{1112} e^2 \left(1 - \frac{513427}{521760} e^2 \right) \right) \right] \quad (40)$$

$$A_4 = \frac{35}{72} e^4 \left(1 - \frac{125}{64} e^2 \left(1 - \frac{221069}{150000} e^2 \right) \right) \quad (41)$$

$$A_6 = \frac{105}{256} e'^6 \left(1 - \frac{1179}{400} e'^2 \right) \quad (42)$$

$$A_8 = \frac{231}{640} e'^8 \quad (43)$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (44)$$

com e' sendo a segunda excentricidade.

A latitude (φ) utilizada para o cálculo do comprimento do arco meridiano deve ser expressa em radianos e como solução tem-se B_φ em metros.

A.5.4 Cálculo da latitude para um dado comprimento de arco meridiano

A equação 36 é utilizada para o cálculo do comprimento de arco meridiano para qualquer latitude dada. No entanto este tópico trata do cálculo inverso, ou seja, dado um valor de comprimento de arco meridiano deve-se calcular a latitude (φ_1) correspondente a este arco. Logo, a equação 36 pode ser empregada no cálculo de φ_1 . Isto é possível ao se utilizar somente o primeiro termo da equação do comprimento de arco meridiano, conforme segue:

$$B_\varphi \cong A_0 c \varphi \quad (45)$$

isolando φ tem-se,

$$\varphi \cong \frac{B_\varphi}{A_0 c} \quad (46)$$

Portanto ao assumir $B_\varphi = x$ na equação 47, a latitude φ_1 pode ser calculada por procedimento baseado em aproximações sucessivas (BLACHUT et al., 1979):

$$\varphi_i = \frac{x}{A_0 c} \quad (47)$$

na qual, x é valor da coordenada TM do ponto e os valores de c e A_0 são calculados em função dos parâmetros do elipsóide adotado, e dados pelas equações 38 e 39, respectivamente.

O próximo passo é o cálculo de $B_\varphi = B(\varphi_i)$, para a próxima aproximação:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \frac{x - B_{\varphi(i)}}{A_0 c} \quad (48)$$

Se o termo $x - B_{\varphi(i)} < \varepsilon$ (ε é uma tolerância pré-estabelecida), assume-se $\varphi_i = \varphi_{i+1}$, caso contrário, deve-se continuar a iteração.

A.5.5 Transformação de Coordenadas Geodésicas em Cartesianas

A fórmula que relaciona as coordenadas cartesianas e geodésicas é dada por

Vaníček (1986):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \varphi \sin \lambda \\ [(1-e^2)N+h] \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (49)$$

onde, φ é a latitude geodésica; λ é longitude geodésica; h é a altura geométrica. Além das coordenadas geodésicas, para se obter as coordenadas cartesianas, é necessário a utilização dos parâmetros (a , f) que definem o elipsóide de referência adotado, para referenciar o sistema de coordenadas. A partir dos parâmetros – semi-eixo maior (a) e achatamento (f) – pode-se calcular as grandezas (equações 50 e 51) necessárias à transformação.

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (50)$$

$$e^2 = 2f - f^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (51)$$

sendo N o raio de curvatura da seção primeiro vertical (também chamado de *grande normal*), enquanto que e^2 é o quadrado da primeira excentricidade.

A.5.6 Transformação de Datum

De posse das coordenadas cartesianas, a transformação entre *data*, realizada aplicando os parâmetros de translação, é dada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Datum(2)}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Datum(1)}} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (52)$$

A aplicação dos valores apresentados na Tabela 6 pode ser feita conforme exemplo: assume-se que as coordenadas cartesianas estão no SAD-69, e deseja-se a transformação para WGS-84. Utilizando os parâmetros oficiais adotados no Brasil, tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SAD69}} + \begin{bmatrix} -66,87 \\ 4,37 \\ -38,52 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Têm-se, agora, após aplicar a equação 52, coordenadas cartesianas no *datum* desejado. Com certa frequência utiliza-se as coordenadas geodésicas, portanto o próximo passo consiste na transformação das coordenadas cartesianas para coordenadas geodésicas.

A.5.7 Transformação de Coordenadas Cartesianas Geocêntricas em Coordenadas Cartesianas Locais e vice-versa

A fórmula que relaciona as coordenadas cartesianas geocêntricas e locais é dada por (GALO, 2002):

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = R_1(90 - \varphi_0)R_3(90 + \lambda_0) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

onde, R_1 e R_3 são matrizes de rotação; φ_0 e λ_0 são respectivamente, a latitude e a longitude do ponto adotado como origem do sistema cartesiano local; e X_0 , Y_0 e Z_0 , são as coordenadas cartesianas geocêntricas, do ponto origem do sistema local.

As coordenadas X_0 , Y_0 e Z_0 , são calculadas em função das coordenadas geodésicas $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$ do ponto origem. Logo, para que se possa realizar qualquer tipo de transformação utilizando coordenadas cartesianas locais é necessário conhecer previamente as coordenadas geodésicas da origem do sistema local, e a partir destas calcular suas correspondentes (X_0, Y_0, Z_0) no sistema cartesiano geocêntrico, através da equação 49.

As matrizes R_1 e R_3 são calculadas em função das coordenadas geodésicas $(\varphi_0$ e $\lambda_0)$ do ponto origem. Logo, as matrizes de rotação podem ser obtidas por:

$$R_1(90 - \varphi_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90 - \varphi_0) & \sin(90 - \varphi_0) \\ 0 & -\sin(90 - \varphi_0) & \cos(90 - \varphi_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \\ 0 & -\cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (55)$$

e

$$R_3(90 + \lambda_0) = \begin{bmatrix} \cos(90 + \lambda_0) & -\sin(90 + \lambda_0) & 0 \\ -\sin(90 + \lambda_0) & \cos(90 + \lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & -\cos \lambda_0 & 0 \\ -\cos \lambda_0 & -\sin \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (56)$$

Adotando-se uma matriz de rotação R , dada por:

$$R = R_1(90 - \varphi_0)R_3(90 + \lambda_0) \quad (57)$$

tem-se

$$R = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\operatorname{sen} \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\operatorname{sen} \varphi_0 \operatorname{sen} \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \operatorname{sen} \lambda_0 & \operatorname{sen} \varphi_0 \end{bmatrix}, \quad (58)$$

substituindo a equação 57 em 58,

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\operatorname{sen} \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\operatorname{sen} \varphi_0 \operatorname{sen} \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \operatorname{sen} \lambda_0 & \operatorname{sen} \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}. \quad (59)$$

A Equação 59 permite a transformação de coordenadas cartesianas num sistema geocêntrico para um sistema local.

Há casos em que é de interesse a transformação inversa a esta descrita acima. Essa transformação se refere ao problema inverso daquele dado pela Equação 59. A transformação das coordenadas cartesianas de um sistema local para um sistema geocêntrico pode ser realizada por (GALO, 2002):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_3^T(90 + \lambda_0)R_1^T(90 - \varphi_0) \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

A proposta básica desta conversão é: dadas as coordenadas X_L , Y_L , e Z_L , bem como as coordenadas da origem $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$, obter as coordenadas geocêntricas X , Y e Z .

A.5.8 Transformação de Coordenadas Geodésicas Cartesianas Locais em Fotogramétricas

A transformação de coordenadas cartesianas locais em fotogramétricas requer o relacionamento entre dois espaços diferentes, ou seja, o espaço objeto (3D) e o espaço imagem (2D). Tal relacionamento pode ser obtido através das equações de colinearidade.

As equações de colinearidade (Equação 61) reproduzem matematicamente o processo de formação da imagem, sob a condição de que, o centro perspectivo, o ponto objeto e seu correspondente na imagem, pertencem à mesma reta (MIKHAIL et al., 2001). Esta condição é ilustrada na Figura 13, onde C_P , a' e A pertencem a mesma reta.

$$x = -f \frac{r_{11}(X_L - X_{CP}) + r_{12}(Y_L - Y_{CP}) + r_{13}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})} \quad (61)$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X_L - X_{CP}) + r_{22}(Y_L - Y_{CP}) + r_{23}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})}$$

onde:

- f : distancia focal;
- (x, y) : coordenadas fotogramétricas;
- (X_L, Y_L, Z_L) : coordenadas no espaço objeto referidas a um sistema local;
- (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) : coordenadas do centro perspectivo no espaço objeto referidas a um sistema local; e
- r_{ij} : elementos da matriz de rotação determinados em função dos ângulos de orientação exterior (κ, ϕ, ω).

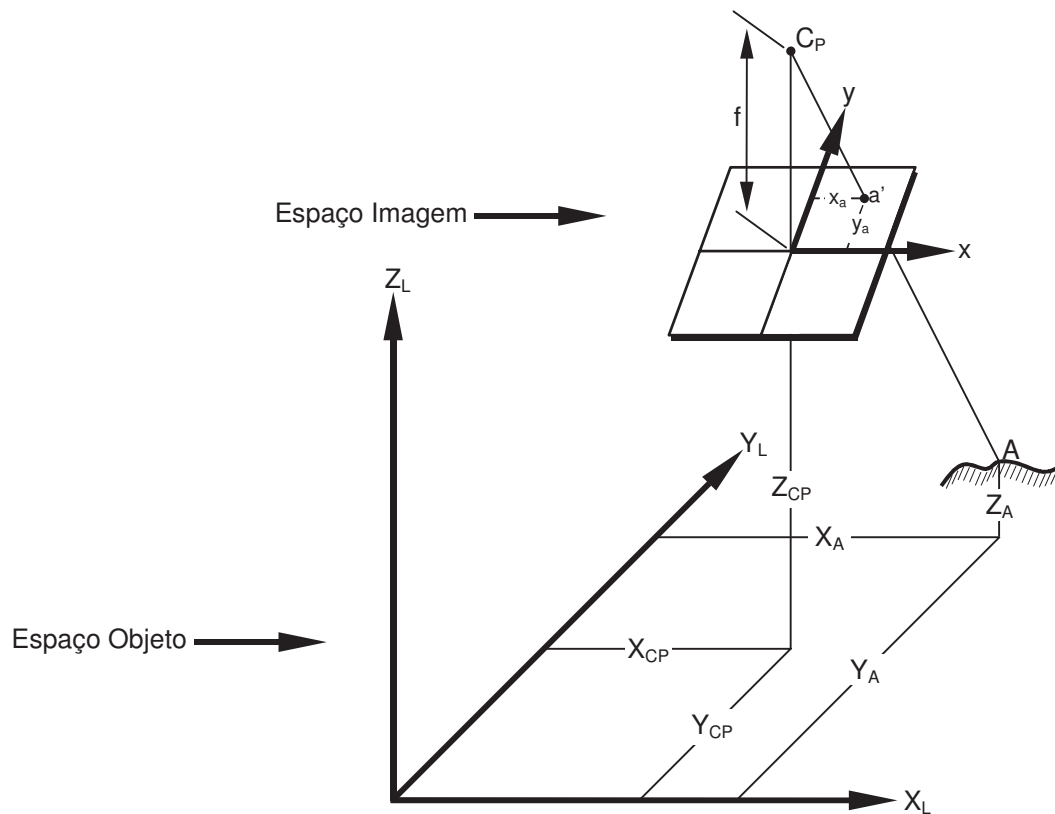


Figura 13 – Condição de Colinearidade (Fonte: Wolf e Dewitt, 2000).

Como mostra a Equação (61) e a Figura 13, o relacionamento entre os espaços imagem e objeto requer a orientação prévia da imagem, ou seja, o conhecimento dos parâmetros de orientação exterior da imagem (X_{CP} , Y_{CP} , Z_{CP} , κ , ϕ , ω). Neste trabalho os parâmetros de orientação exterior das imagens são considerados como conhecidos.

Como apresentado anteriormente, as equações de colinearidade são utilizadas para relacionar os espaços imagem e objeto. Para cada ponto, duas equações são formadas, resultando em seis equações se o mínimo de três pontos foram adotados. Se quatro ou mais pontos são utilizados, mais de seis equações são formadas, permitindo a solução pelo MMQ. Como as equações de colinearidade são não lineares, aproximações iniciais são necessárias para as incógnitas $(X_{CP}^0, Y_{CP}^0, Z_{CP}^0, \kappa_{CP}^0, \phi_{CP}^0, \omega_{CP}^0)$.

A.5.9 Transformação de Coordenadas Fotogramétricas em Digitais

A transformação de coordenadas fotogramétricas em digitais necessita de uma transformação intermediária. Primeiramente, as coordenadas fotogramétricas devem ser transformadas para o sistema fiducial, sendo, posteriormente, transformadas para o sistema digital.

O ponto principal e o centro fiducial dificilmente coincidem. Desta maneira, o sistema fotogramétrico e o sistema fiducial encontram-se transladados de uma pequena parcela (x_0 , y_0). Portanto, os sistemas fotogramétrico (x , y) e fiducial (x_f , y_f) são relacionados por (Equação 62):

$$\begin{aligned}x_f &= x_0 + x \\y_f &= y_0 + y\end{aligned}\tag{62}$$

O estabelecimento de relação entre os sistemas fiducial e digital corresponde a realização de um primeiro passo do processo de orientação interior em Fotogrametria Digital.

A orientação interior consiste na operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmara. Sendo assim, a orientação interior permite a reconstrução dos feixes perspectivos que formaram a imagem (ANDRADE, 1998). Na Fotogrametria Analógica, esse processo era realizado através da colocação do diapositivo no porta-placas fazendo-se coincidir as marcas fiduciais de ambos e, posicionando-se o projetor à distância focal calibrada. Na Fotogrametria Digital esse processo é realizado matematicamente através de dois passos básicos. No primeiro passo, os parâmetros de transformação entre os sistemas digital e fiducial são determinados. Num segundo passo, os erros sistemáticos presentes no processo de formação das imagens são corrigidos para reconstrução completa dos feixes de raio.

Vale ressaltar que no contexto deste trabalho o interesse destina-se a orientação interior “inversa”. Isto é, tem-se por objetivo distorcer o feixe de raios ideal obtido pelas equações de colinearidade, de forma a reproduzir um feixe bem próximo do real, obtido no instante de imageamento.

De posse das coordenadas das marcas fiduciais calibradas e suas correspondentes digitais, utilizando-se a transformação afim, o relacionamento entre ambos os sistemas é dado por:

$$\begin{bmatrix} c \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (63)$$

onde:

- a, b, c, d, Δx e Δy : parâmetros de transformação afim;
- (c, l): coordenadas das marcas fiduciais no sistema digital; e
- (x_f , y_f): coordenadas calibradas das marcas fiduciais.

Visto que, para cada ponto observado duas equações são geradas, se o número mínimo de marcas fiduciais existentes na imagem (4) forem observadas, os parâmetros de transformação são obtidos pelo MMQ. Caso contrário, no mínimo três pontos devem ser observados para se obter solução única.

A.5.10 Modelo matemático para a transformação de Coordenadas UTM em digitais

Conforme pode-se concluir pelas seções anteriores, a transformação de coordenadas UTM em digitais requer uma série de transformações intermediárias entre sistemas do espaço objeto e espaço imagem. A equação (64) apresenta um modelo global para a transformação

de coordenadas UTM em digitais, para o caso de imagens com marcas fiduciais. Como poderá ser observado nesta equação além das transformações entre sistemas de coordenadas, as coordenadas no espaço imagem são refinadas inversamente em relação aos erros sistemáticos (refração atmosférica, distorção das lentes e, no caso de fotografia digitalizada, deformação do filme). Pelo fato das variáveis envolvidas nesta transformação já terem sido definidas nas seções anteriores, apenas algumas são novamente descritas aqui.

$$\begin{aligned} c &= a_1 \cdot (x_0 + x + d_x k + d_x P + d_x R) + a_2 \cdot (y_0 + y + d_y k + d_y P + d_y R) + a_3 \\ l &= a_4 \cdot (x_0 + x + d_x k + d_x P + d_x R) + a_5 \cdot (y_0 + y + d_y k + d_y P + d_y R) + a_6 \end{aligned} \quad (64)$$

onde:

- (c, l): coordenadas digitais;
- a_i : parâmetros de transformação Afim;
- (x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal;
- $(d_x k, d_y k, d_x P, d_y P, d_x R, d_y R)$: parcelas de distorção radial, distorção descentrada e refração atmosférica, respectivamente.

A magnitude de cada um destes erros é dada por:

$$\begin{aligned} d_x k &= (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot x \\ d_y k &= (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot y \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} d_x P &= P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \\ d_y P &= P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} d_x R &= x \cdot \frac{\Delta r}{r} \\ d_y R &= y \cdot \frac{\Delta r}{r} \end{aligned} \quad (67)$$

- (x, y): coordenadas fotogramétricas dadas pelas equações de colinearidade, ou seja:

$$x = -f \cdot \frac{r_{11}(X_L - X_{CP}) + r_{12}(Y_L - Y_{CP}) + r_{13}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})}$$

$$y = -f \cdot \frac{r_{21}(X_L - X_{CP}) + r_{22}(Y_L - Y_{CP}) + r_{23}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})}$$
(68)

Na Equação (68) (X_L , Y_L , Z_L) representam as coordenadas de um ponto qualquer no Sistema Geodésico Local. Como apresenta as equações (69 e 70), tais coordenadas são obtidas em função das coordenadas UTM (E, N, h).

$$X_L = \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta X - \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta Y$$

$$Y_L = -\text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta X - \text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta Y + \text{cos}(\varphi_0) \cdot \Delta Z$$

$$Z_L = \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta X + \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta Y + \text{sen}(\varphi_0) \cdot \Delta Z$$
(69)

onde:

- (ΔX , ΔY , ΔZ): representa o deslocamento entre o sistema geodésico cartesiano e o geodésico cartesiano local;

$$\Delta X = \left[(N'+h) \cdot \text{cos}(\varphi_1 + b_2 \cdot D^2 + b_4 \cdot D^4 + b_6 \cdot D^6) \cdot \text{cos}(\lambda_{mc} + b_1 \cdot D + b_3 \cdot D^3 + b_5 \cdot D^5) \right] - \left[(N'+h) \cdot \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \right]$$

$$\Delta Y = \left[(N'+h) \cdot \text{cos}(\varphi_1 + b_2 \cdot D^2 + b_4 \cdot D^4 + b_6 \cdot D^6) \cdot \text{sen}(\lambda_{mc} + b_1 \cdot D + b_3 \cdot D^3 + b_5 \cdot D^5) \right] - \left[(N'+h) \cdot \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \right]$$

$$\Delta Z = \left[(1-e^2) \cdot N'+h \right] \cdot \text{sen}(\varphi_1 + b_2 \cdot D^2 + b_4 \cdot D^4 + b_6 \cdot D^6) - \left[(1-e^2) \cdot N'+h_0 \right] \cdot \text{sen}(\varphi_0)$$

$$D = \frac{E - 500.000}{m_0}$$

Na equação acima, λ_{mc} é a longitude do meridiano central, $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$ corresponde a origem do Sistema Geodésico Local, N' é o raio de curvatura da seção primeira vertical e, φ_1

é a latitude correspondente ao comprimento do arco meridiano determinada iterativamente em função da componente N do sistema UTM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BAKKER, M. P. R.. *Cartografia, Noções Básicas*. Marinha do Brasil – Hidrologia e Navegação, 1965.

BLACHUT, T.J., CHRZANOWISKI, A., SAASTAMOINEN, J. H. *Urban Surveying and Mapping*. Springer-Verlag, New York, 372p., 1979.

BRUNETTI, M. F. Um pouco mais sobre o Sistema UTM, *Fator GIS - A Revista do Geoprocessamento*, nº 5, p.33, abril/maio/jun 1994.

GALO, M.. *Revisão de Sistemas de Coordenadas*. Presidente Prudente, 2002. Notas de aulas da disciplina Fotogrametria III, do Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica – FCT/UNESP.

GALO, M. *Sistemas de projeção derivados da Projeção Transversa de Mercator: conceitos básicos*. Presidente Prudente, 2000. Notas de aulas da disciplina Cartografia I, do Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica – FCT/UNESP.

IBGE. *Sistemas de Referência*, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: www.ibge.gov.br/geodesia

LUGNANI, J. B. *Introdução à Fototriangulação*, Curitiba, 1987.

MALING, D. H. *Coordinate Systems and Map Projections*, 2nd edition, Oxford: Pergamon Press, 1992.

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

MOFFIT, F. H., MIKHAIL, E. M. *Photogrammetry*. New York: Harpen & Row, 1980.

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

MONIWA, S. F. *Advanced photogrammetric system with self-calibration and its applications*. Ph.D. Dissertation, Department of Surveying Engineering, U.N.B., Fredericton, 1977.

ROBINSON, A. H., MORRISON, J. L., MUEHRCKE, P. C., KIMERING, A. J., GUPTILL, S. C. *Elements of Cartography*. 6th Edition. John Wiley and Sons, New York, 1995.

VANÍČEK, P., KRAKIWSKY, E. J. *GEODESY: The Concepts*. 2nd edition, Amsterdam, New York, Oxford, Tokio, Elsevier Science Publishers B.V., 714p., 1986.

VOSSelman, G., DE KNECHT, J. Road Tracing by Profile Matching and Kalman Filtering. *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (I)*, Ascona, Switzerland, April 24-28, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin: 265-275, 1995