

EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE RODOVIA BASEADA EM UM PAR ESTÉREO DE IMAGENS AÉREAS E EM OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NO ESPAÇO-OBJETO

Semiautomatic road extraction based on a stereopar of aerial images and object-space dynamic programming optimization

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ¹

RODRIGO DE ARAÚJO GALLIS²

JOÃO FERNANDO CUSTÓDIO DA SILVA¹

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)

¹ Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 - Presidente Prudente, SP

² Ex-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
aluir@fct.unesp.br; rodrigogallis@pos.prudente.unesp.br; jfcSilva@fct.unesp.br

RESUMO

Este artigo propõe um método para a extração 3D de rodovias a partir de um par estéreo de imagens aéreas. O algoritmo de programação dinâmica (PD) é usado para realizar o processo de otimização no espaço-objeto, em vez de realizá-lo no espaço-imagem como geralmente fazem as metodologias tradicionais baseadas em PD. Isto significa que os eixos de rodovia são diretamente traçados no espaço-objeto, implicando na necessidade de uma relação matemática para conectar os pontos de rodovia nos espaços-imagem e -objeto. Esta relação matemática possibilita a integração de informações radiométricas, presentes nas imagens, no modelo matemático de rodovia. Como o método depende de uma aproximação inicial de cada rodovia, é necessário fornecer alguns pontos sementes para descrevê-la grosseiramente. O método proposto geralmente obtém bons resultados, mas a presença de grandes anomalias ao longo da rodovia pode afetar seu desempenho. Portanto, o método pode ser usado em aplicação prática, embora é de se esperar algum tipo de edição local do eixo extraído da rodovia.

Palavras-chave: Programação dinâmica; modelo de rodovia; extração de feição; extração de rodovia; imagens aéreas.

ABSTRACT

This article proposes a method for 3D road extraction from a stereopair of aerial images. The dynamic programming (DP) algorithm is used to carry out the optimization process in the object-space, instead of usually doing it in the image-space such as the DP traditional methodologies. This means that road centerlines are directly traced in the object-space, implying that a mathematical relationship is necessary to connect road points in object and image-space. This allows the integration of radiometric information from images into the associate mathematical road model. As the approach depends on an initial approximation of each road, it is necessary a few seed points to coarsely describe the road. Usually, the proposed method allows good results to be obtained, but large anomalies along the road can disturb its performance. Therefore, the method can be used for practical application, although it is expected some kind of local manual edition of the extracted road centerline.

Keywords: Dynamic programming; road model; feature extraction; road extraction; aerial images.

1. INTRODUÇÃO

A aquisição de informações espaciais para Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) é comumente realizada através de técnicas fotogramétricas convencionais, que é completamente dependente de um operador para a interpretação do conteúdo das imagens e para o delineamento dos objetos de interesse. Devido à complexidade da cena e às imperfeições dos sistemas sensores, a extração de feições a partir de imagens aéreas e de satélite é muito difícil de ser completamente automatizada. Neste contexto a automação pode ser entendida como uma tentativa de imitar o sistema de visão humano. Dependendo do grau de automação, os sistemas são classificados como semi-automáticos e automáticos. Nos sistemas semi-automáticos o operador classifica o objeto de interesse e a tarefa de delineamento é deixada a cargo do algoritmo computacional. Assumindo que é virtualmente impossível imitar plenamente o sistema visual humano, os sistemas automáticos sempre necessitarão de algum tipo de edição manual e validação das informações espaciais extraídas.

O objeto rodovia constitui uma importante classe de informação espacial, fundamental no contexto de mapeamento e dos SIG's. Muitas pesquisas têm sido realizadas desde a década de 1970, destacando-se os trabalhos pioneiros de Bajcsy e Tavakoli (1976) e Quam (1978). A maioria dos trabalhos baseia-se em problemas inteiramente formulados e resolvidos no espaço-imagem. A grande maioria destes trabalhos é de concepção semi-automática, com estratégias de delineamento seqüencial ou global. As estratégias seqüenciais combinam passos sucessivos de predição e refinamento para extrair ponto a ponto o eixo da rodovia, podendo-se

citar como exemplos os trabalhos de McKeown e Denlinger (1988), Vosselman e de Kenecht (1995); Geman e Jedynak (1996), Kim et al. (2004) e Zhou et al. (2006). Já as estratégias globais utilizam alguma função objetivo para modelar todo o eixo da rodovia, utilizando os modelos de contorno ativo (Kass et al., 1987) ou modelos derivados. Várias soluções foram propostas, como, por exemplo, as que se baseiam no conceito original de contorno ativo (Kass et al., 1987; Neuenschwader et al., 1997; Agouris et al., 2000) ou no ajuste local de parábolas (Hu et al., 2004) ou na otimização por programação dinâmica de um modelo geral de rodovia (Grüen and Li, 1997; Merlet e Zerubia, 1996; Dal Poz et al., 2006). Por outro lado, os métodos de concepção automática geralmente requerem a integração de conhecimento contextual e de conhecimento *a priori* para reconhecer e delinear toda a malha viária, a fim de obter um todo topologicamente correto (Baumgartner et al., 1999; Hu et al., 2004).

Poucas metodologias foram desenvolvidas tendo por base a formulação do problema no espaço-objeto ou em ambos os espaços-imagem e -objeto. Estas metodologias podem basear-se em uma única imagem, necessariamente combinada a um MDT (Modelo Digital do Terreno), ou em duas ou mais imagens. Esse último caso pode beneficiar-se da integração de um MDT, podendo tornar mais estável o processo de extração. É possível, em ambos os casos, tratar de forma mais eficiente os problemas de oclusão e de ocorrência de falsos positivos (Gruen e Li, 1997; Hinz et al., 2001; Hinz e Wiedemann, 2004). Esses benefícios decorrem basicamente da facilidade em introduzir restrições de suavidade vertical nos eixos das rodovias, o que não é possível para os métodos formulados no espaço-imagem. As metodologias desenvolvidas com concepção discutida acima são brevemente discutidas abaixo.

O LSB-Snakes (*Least-Squares B-spline Snakes*) é um método proposto por Gruen e Li (1997) para extração semi-automática de rodovias no espaço-objeto a partir de múltiplas imagens. Uma função de energia modelando rodovias no espaço-objeto é desenvolvida com base na combinação entre um modelo B-spline 3D e funções de energia associadas com múltiplas imagens. A extração de cada rodovia fica reduzida a um problema de minimização da função de energia no espaço-objeto, cujos parâmetros a determinar são os parâmetros da função B-spline e que correspondem às coordenadas dos vértices de uma linha poligonal, representativa do eixo da rodovia. O mencionado problema de minimização é resolvido através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Hinz e Baumgartner (2003) propuseram um sistema híbrido para a extração automática de rodovias a partir de imagens aéreas de regiões urbanas. Primeiro, as regiões de interesse (RoI – *Region of Interest*) de rodovia são determinadas nas várias imagens. Isso é feito em dois passos: 1) detecção de vales num MDS (Modelo Digital de Superfície) através do detector de linhas de Steger, que geralmente correspondem a representações aproximadas dos eixos de rodovia; 2) projeção das linhas extraídas para o espaço-imagem. As regiões nas imagens

próximas às linhas são as ROI. Segundo, os segmentos de rodovias são reconstruídos usando dois grupos de linhas ou bordas extraídos das imagens: 1) linhas demarcatórias de faixas das rodovias; 2) linhas correspondentes às bordas das rodovias. Estas linhas são validadas verificando o paralelismo entre linhas de cada grupo e entre as linhas de ambos os grupos. Terceiro, os segmentos de linha validados são projetados sobre o MDS e posteriormente são fusionados aqueles que representam uma mesma feição. Nesta etapa são também filtrados os objetos que não pertencem ao terreno. A última etapa consiste de uma estratégia de complementação para obter uma malha viária topologicamente correta.

Zhang (2004) propôs uma metodologia automática para a reconstrução 3D de rodovias através da combinação de imagens coloridas e base de dados espaciais (BDE). O BDE contém, entre outros dados, um MDS, um DTM e um conjunto de linhas poligonais correspondentes às rodovias. Primeiro, visto que os lados de rodovia são geralmente compostos por segmentos de reta, o sistema previamente extraí segmentos de reta no par estéreo de imagens coloridas e, na seqüência, encontra as correspondências entre retas homólogas no par estéreo e, finalmente, transforma as retas homólogas para o espaço-objeto. Segundo, o sistema filtra os segmentos de reta projetados que estão distantes das rodovias presentes no BDE e que não pertencem ao terreno. A detecção de objetos não pertencentes ao terreno é feita com base na diferença entre o MDS e o MDT. Terceiro, os segmentos de rodovia são construídos com base em critérios de proximidade e paralelismo entre os segmentos de reta filtrados, os quais devem também atender a propriedades radiométricas de rodovias cujos parâmetros foram mensurados no par estéreo de imagens coloridas. Finalmente, a malha viária é reconstruída através da verificação e reconstrução das conexões válidas entre os segmentos de rodovia.

Gallis et al. (2005) e Dal Poz et al. (2006) propuseram uma metodologia semi-automática para a extração de rodovias no espaço-objeto utilizando uma imagem aérea e um MDT. Um modelo matemático de rodovia no espaço-objeto é formulado em dois passos. Primeiro, a rodovia é modelada no espaço-imagem considerando várias propriedades geométricas e radiométricas. Posteriormente, este modelo é modificado para descrever as rodovias no espaço-objeto, tendo por base, principalmente, o modelo do sensor. Como o modelo matemático de rodovia obtido desta forma não admite solução única, uma restrição é introduzida para forçar as rodovias extraídas a pertencerem à superfície de um MDT. A linha poligonal que maximiza o modelo matemático resultante de rodovia é a solução procurada. Esta solução é obtida através do algoritmo de otimização de programação dinâmica.

Esse trabalho apresenta uma extensão do método descrito no parágrafo anterior. Em vez de se utilizar apenas uma imagem e um MDT, o método a ser proposto baseia-se somente num par estéreo de imagens aéreas, além de respectivos parâmetros de orientação interior e exterior. Ambos os métodos têm em comum a necessidade de inicialização por parte de um operador, via fornecimento de alguns pontos sementes de forma esparsa e grosseira ao longo da rodovia. São duas as

principais motivações para a extensão proposta. A primeira delas está relacionada com a independência do método de um MDT. A outra motivação é o desafio para o desenvolvimento de uma função objetivo para modelar consistentemente uma rodovia no espaço-objeto, tendo em vista que a mesma deve basear-se num par estéreo de fotos e que também deve possuir uma estrutura adequada para possibilitar o emprego do algoritmo de otimização de programação dinâmica.

Este artigo está organizado em seis seções principais. A Seção 2 apresenta o modelo matemático de rodovia para uma única foto. O modelo matemático de rodovia para um par estéreo de imagens aéreas é formulado na seção 3. A solução de otimização por programação dinâmica é discutida na Seção 4. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção 5. O artigo é encerrado na Seção 6 com as principais conclusões.

2. MODELO MATEMÁTICO DE RODOVIA NO ESPAÇO-OBJETO PARA UMA FOTO ISOLADA

Várias propriedades geométricas e radiométricas são usadas para formular um modelo de rodovia no espaço-imagem. Assumindo-se que uma rodovia pode ser representada pela linha poligonal $P^i = \{p_0, \dots, p_{n-1}\}$, onde p_i é seu i -ésimo vértice, pode-se modelá-la matematicamente através da função objetivo (equação 1) e da injunção de desigualdade (expressão 2), como segue (Gruen e Li, 1997),

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

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

onde, E_{p_1} é uma função que depende do vértice p_i e que expressa o fato de que os pixels de rodovia são mais claros que seus vizinhos em ambas as margens da rodovia; E_{p_2} é uma função que depende de dois pontos consecutivos (p_{i-1} e p_i) da linha poligonal P^i e que expressa o fato de que os níveis de cinza ou cor da rodovia não variam muito, sobretudo em curtas distâncias; E_{p_3} é uma função que depende do vértice p_i e que expressa o fato de que uma rodovia é uma feição linear de alto valor de brilho; α_i é a direção do segmento de reta definido pelos pontos p_{i-1} e p_i ; β e γ são constantes positivas; $|\Delta S_i|$ é a distância entre os pontos p_{i-1} e p_i ; e T é um limiar que limita a mudança de direção entre dois segmentos sucessivos da linha poligonal P^i .

A equação 1 mostra que somente três pontos consecutivos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) da linha poligonal P^i são simultaneamente inter-relacionados e que, em decorrência, pode ser decomposta numa soma de $n-1$ subfunções do tipo $E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1})$, ficando:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (3)$$

A solução deste problema é uma linha poligonal $P^i = \{p_0, \dots, p_{n-1}\}$ que representa uma rodovia selecionada por um operador e corresponde ao máximo da função objetivo dada pela equação 1 ou 3. Esta função é apropriada para a extração semi-automática de rodovias em imagens de baixa-resolução, apresentando rodovias variando em espessura de 1 a 3 pixels. A fim de possibilitar a extração acurada do eixo de rodovia em imagens de maior resolução, Dal Poz e Vale (2003) propuseram uma modificação na equação 3. Basicamente, um termo de injunção de borda foi adicionado na função objetivo original, forçando a linha poligonal extraída a coincidir com o eixo da rodovia. Na função objetivo modificada, somente os vértices consecutivos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal P^i e as larguras (w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) da rodovia nestes vértices são simultaneamente inter-relacionados, ficando (Dal Poz e Vale, 2003):

$$E^m = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) \quad (4)$$

Nesse caso, o processo de otimização deve fornecer não só a linha poligonal $P^i = \{p_1, \dots, p_n\}$ que representa o eixo da rodovia, mas também as larguras da rodovia nos respectivos vértices.

As equações 3 e 4 podem ser modificadas a fim de expressar as rodovias em função de coordenadas 3D do espaço-objeto. O sistema de coordenadas do espaço-objeto escolhido para representar os vértices 3D do eixo de rodovia é o UTM (*Universal Transverse Mercator*) (E, N) com altura elipsoidal ou geométrica (h). A relação matemática, entre um ponto $P(E, N, h)$ no espaço-objeto e seu correspondente ponto $p(L, C)$ no espaço-imagem, é estabelecida levando em conta três passos. Primeiro, tendo em vista uma solução rigorosa para o problema, é necessário relacionar matematicamente um ponto no sistema UTM com altura elipsoidal com o correspondente ponto $(P(X, Y, Z))$ no sistema cartesiano local de coordenadas, cujos modelos matemáticos de transformação de coordenadas são bem conhecidas. Segundo, as equações de colinearidade são usadas, juntamente com os parâmetros de orientação exterior, para transformar o ponto $P(X, Y, Z)$ no sistema de coordenadas fotogramétricas. Finalmente, o ponto resultante desta última operação matemática é transformado para o sistema de coordenadas da imagem (L, C), valendo-se do modelo de orientação interior e dos parâmetros associados de orientação interior. Os conceitos e modelos envolvidos nas operações matemáticas acima são bem conhecidos em Fotogrametria. Informações detalhadas podem ser encontradas, por exemplo, em Wolf e Dewitt (2000) e Lugnani (1987).

Assumindo agora que todas as operações matemáticas, entre as coordenadas (L_i, C_i) de um ponto no sistema de coordenadas de imagem e as coordenadas (E_i, N_i, h_i) do ponto correspondente no sistema de referência UTM com altura elipsoidal, possam ser estabelecidas através de duas funções conhecidas (f_1 e f_2), tem-se,

$$\begin{aligned} L_i &= f_1(P_{ar}, V_i) \\ C_i &= f_2(P_{ar}, V_i) \end{aligned} \quad (5)$$

onde, P_{ar} é um vetor de parâmetros conhecidos (por exemplo: os parâmetros de orientação interior e exterior da imagem, os parâmetros elipsoidais e os parâmetros relacionados com a projeção UTM); e $V_i = (E_i, N_i, h_i)$. Como P_{ar} é conhecido, um ponto no espaço-imagem ($p_i(L_i, C_i)$) pode ser expresso em função somente de V_i , ficando:

$$p_i(L_i, C_i) = p_i(f_1(V_i), f_2(V_i)) = p_i(f_1(E_i, N_i, h_i), f_2(E_i, N_i, h_i)) \quad (6)$$

A expressão 6 possibilita escrever a equação 3 como segue:

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1})) = \\ \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(f_1(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), f_2(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})), p_i(f_1(E_i, N_i, h_i), f_2(E_i, N_i, h_i)), \\ p_{i+1}(f_1(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), f_2(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}))) \end{aligned} \quad (7)$$

A equação 7 mostra que ela depende simultaneamente das coordenadas de três pontos sucessivos da linha poligonal que representa a rodovia no espaço-objeto, quais sejam: $P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})$, $P_i(E_i, N_i, h_i)$ e $P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})$. Assim a equação 7 pode ser simplificada e escrita como segue:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})) \quad (8)$$

A equação 8 parece, em primeira análise, apropriada para a extração de rodovias no espaço-objeto usando apenas uma imagem de baixa-resolução. Isso não é possível porque a equação 8 é ambígua, visto que existe uma classe não limitada de linhas poligonais que possibilitam obter um mesmo valor máximo para E . Isto decorre da conhecida propriedade da equação 5, pela qual existem infinitos pontos no espaço-objeto que correspondem a um mesmo ponto imagem. Em Gallis et al. (2005) e Dal Poz et al. (2006) essa ambigüidade foi removida forçando a rodovia extraída a pertencer à superfície de um MDT.

Em se tratando de imagens de média e alta-resolução, demonstra-se facilmente que a equação 4 pode ser modificada e expressa na forma,

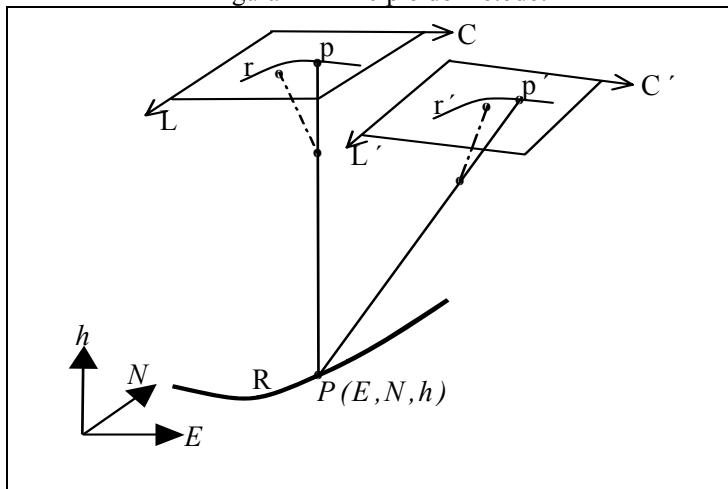
$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) \quad (9)$$

onde, W_{i-1} , W_i , e W_{i+1} são as larguras da rodovia, no espaço-objeto, dos pontos P_{i-1} , P_i , e P_{i+1} , respectivamente. A equação 9 é desenvolvida seguindo-se os mesmos princípios para se obter a equação 8. Nesse caso é necessário também transformar as larguras da rodovia no espaço-imagem (w_1, \dots, w_{n-1}) para as correspondentes larguras no espaço-objeto (W_1, \dots, W_{n-1}). Para imagens aéreas aproximadamente verticais e terrenos comportados, pode-se usar a relação de escala entre w_i e W_i , isto é, $w_i = W_i/D$, onde D é o denominador da escala da imagem aérea.

3. MODELO DE RODOVIA NO ESPAÇO-OBJETO PARA UM PAR ESTÉREO DE IMAGENS AÉREAS

A figura 1 ilustra o princípio do método, onde R é uma rodovia no espaço-objeto, cujas imagens sobre as imagens esquerda e direita são respectivamente r e r' . Para traçar uma rodovia no espaço-objeto, via otimização de um modelo matemático de rodovia, as propriedades geométricas e radiométricas de rodovia e as relações matemáticas entre pontos de ambos os espaços envolvidos necessitam ser modeladas. A solução ilustrada na figura 1 difere da solução fotogramétrica seqüencial geralmente empregada para extrair rodovias e outros objetos em 3D. A solução fotogramétrica seqüencial emprega três etapas básicas: a extração de rodovias homólogas (r e r') em ambas as imagens; a determinação de correspondência, geralmente ponto a ponto (p e p'), entre as rodovias r e r' ; a projeção das rodovias homólogas para o espaço-objeto, a fim de obter a rodovia R. A solução proposta integra todas estas etapas numa única, tendo por base o modelo matemático de rodovia a ser desenvolvido abaixo.

Figura 1 - Princípio do método.



O desenvolvimento do modelo matemático de rodovia no espaço-objeto, que leva em conta informações radiométricas provenientes de um par estéreo de imagens, requer que a equação 9 seja escrita para cada imagem,

$$\begin{aligned} E^l &= E_l^l(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2) + \\ &\quad E_2^l(P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), P_3(E_3, N_3, h_3), W_1, W_2, W_3) + \dots \quad (10) \\ &+ E_{n-1}^l(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), \\ &\quad W_{n-2}, W_{n-1}, W_n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E^r &= E_r^r(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2) + \\ &\quad E_2^r(P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), P_3(E_3, N_3, h_3), W_1, W_2, W_3) + \dots \quad (11) \\ &+ E_{n-1}^r(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), \\ &\quad W_{n-2}, W_{n-1}, W_n) \end{aligned}$$

onde, E^l é o modelo matemático de rodovia escrito para a imagem esquerda e E^r para a imagem direita.

Seja $P = \{P_0(E_0, N_0, h_0); \dots; P_n(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1})\}$ a solução correta de ambos os modelos matemáticos 10 e 11. Assim, o polígono P , juntamente com as larguras corretas da rodovia nos vértices de P , maximizam as equações 10 e 11. Entretanto, como a equação 9 é ambígua, a solução P não pode ser obtida usando a equação 10 ou 11. É possível provar que a soma das funções E^l e E^r não é ambígua, isto é, ela possui uma solução única (P) para o eixo da rodovia R. Além disso ela preserva, conforme será mostrada abaixo, a estrutura da equação 9, o que é fundamental para a aplicação do algoritmo de otimização de programação dinâmica. Seja P' uma linha poligonal que maximiza a função E^l . Se P' não coincide com o eixo da rodovia R (isto é, P' é uma falsa solução de E^l), então ela não maximizará a função E^r . O mesmo raciocínio pode ser aplicado para uma outra linha poligonal P'' , mas que agora é uma falsa solução da função E^r . Em outras palavras, P' e P'' maximizariam ambas as funções E^l e E^r , se e somente se, $P' = P'' = P$. Como E^l e E^r são funções positivas, P é a única solução de máximo do modelo matemático de rodovia definido pela soma das funções E^l e E^r . Somando então as funções E^l e E^r e agrupando os termos, obtém-se o modelo matemático de rodovia (E^T), formulado no espaço-objeto para um par estéreo de imagens, como segue:

$$\begin{aligned} E^T &= E^l + E^r = \\ &[E_l^l(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2) + \\ &\quad E_l^r(P_0(E_0, N_0, h_0), P_1(E_1, N_1, h_1), P_2(E_2, N_2, h_2), W_0, W_1, W_2)] + \dots \end{aligned}$$

$$+ [E^l_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), P_n(E_n, N_n, h_n), \\ W_{n-2}, W_{n-1}, W_n) + E^r_{n-1}(P_{n-2}(E_{n-2}, N_{n-2}, h_{n-2}), P_{n-1}(E_{n-1}, N_{n-1}, h_{n-1}), \\ P_n(E_n, N_n, h_n), W_{n-2}, W_{n-1}, W_n)] \quad (12)$$

A equação 12 mostra que o i-ésimo termo entre colchetes depende de três vértices sucessivos (P_{i-1} , P_i , e P_{i+1}) da linha poligonal e das respectivas larguras de rodovia (W_{i-1} , W_i , e W_{i+1}). Assim, a notação acima pode ser simplificada, substituindo os termos entre os colchetes ($i = 1, \dots, n-1$) com base na seguinte expressão geral,

$$E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), \\ W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) = [E_i^l (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), \\ P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) + E_i^r (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), \\ P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1})] \quad (13)$$

possibilitando escrever a equação 12 na forma:

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) \quad (14)$$

A equação 14 mostra que a estrutura da equação 9 foi plenamente preservada. Embora esta equação tenha 12 variáveis inter-relacionadas simultaneamente, é possível reduzir o número de variáveis e, consequentemente, diminuir também o esforço computacional. A próxima seção mostra como reduzir o número de variáveis e como resolver o problema de otimização baseado na equação 14 e no algoritmo de programação dinâmica.

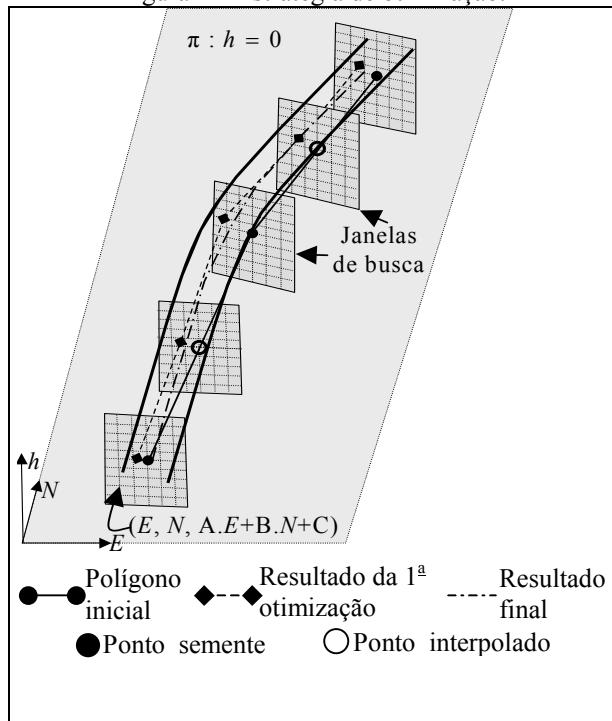
4. ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAR O MODELO DE RODOVIA

Quando num problema de otimização as variáveis da função objetivo (modelo matemático de rodovia) não estão inter-relacionadas simultaneamente, uma forma eficiente para resolver o problema é através do algoritmo de programação dinâmica (Ballard e Brown, 1982). A estrutura da equação 14 está de acordo com este pressuposto, visto que somente 12 variáveis estão inter-relacionadas simultaneamente. A estratégia para resolver eficientemente a equação 14 pelo algoritmo de programação dinâmica é apresentada abaixo. Os fundamentos matemático e algorítmico de programação dinâmica podem ser encontrados, por exemplo, em Ballard e Brown (1982).

A figura 2 ilustra o princípio da estratégia proposta de otimização por programação dinâmica. O processo de otimização inicia com uma linha poligonal definida por alguns pontos sementes (pontos escuros na figura 2). Esta linha poligonal inicial é progressivamente refinada durante o processo de otimização. Os pontos sementes podem ser fornecidos em diferentes formas. Uma forma prática de

se fazer a escolha e a medição de pontos sementes é através da medição de pontos sementes homólogos sobre o par estéreo e projetá-los no espaço-objeto. Como os pontos sementes no espaço-objeto necessitam de localização aproximada, ao longo ou próxima da rodovia, apenas uma determinação grosseira dos correspondentes homólogos no par estéreo é necessária.

Figura 2 – Estratégia de otimização.



Cada rodovia é separadamente extraída através de um esquema iterativo baseado no algoritmo de programação dinâmica. Cada iteração é realizada através de uma densificação da linha poligonal atual, seguida de um ciclo de otimização. A densificação da linha poligonal é realizada via interpolação linear de pontos centrais entre cada par de vértices preexistentes. Por exemplo, a figura 2 mostra um exemplo ilustrativo com um polígono inicial densificado com dois novos vértices (identificados na figura 2 como duas pequenas circunferências). Após a densificação, a linha poligonal densificada serve de referência para gerar um espaço de busca composto de linhas poligonais candidatas à linha poligonal ótima na iteração atual. As linhas poligonais candidatas são geradas durante o ciclo de otimização deixando cada vértice da linha poligonal de referência mover em torno

da respectiva posição inicial. Uma janela de busca cúbica (um cubo com um vértice de referência no centro) poderia ser adotada para restringir a variação de cada vértice, mas mesmo assim, pode implicar num número grande de vértices a considerar. Isto pode ser particularmente crítico nas primeiras iterações quando as linhas poligonais atuais, isto é, aquelas que resultam de cada iteração, são ainda aproximações grosseiras para o eixo da rodovia. Nesses casos, para assegurar a convergência do processo de otimização, é necessária uma vizinhança grande no entorno de cada vértice. Para diminuir drasticamente o número de vértices candidatos e assegurar um grande raio de convergência, pode-se mostrar que é mais apropriado o uso de janela bidimensional. Como mostra a figura 2, este tipo de janela de busca pode ser definido em 3D, desde que seus elementos sejam restringidos a pertencerem a um plano. Define-se então a janela de busca bidimensional como uma malha regular de pontos pertencentes a um plano perpendicular à linha poligonal atual num dado vértice. Em geral, se m for o número de vértices candidatos numa janela de busca e n o número de vértices em cada linha poligonal candidata, haveria m^n linhas poligonais candidatas no espaço de busca. Especialmente para o caso da janela de busca cúbica, com dimensões $l \times l \times l$, o número total de linhas poligonais candidatas seria l^3n . Para o caso da janela de busca bidimensional o número de linhas poligonais candidatas seria l^2n . Isto é, o espaço de busca com janelas cúbicas é l^3 vezes maior que o baseado em janelas bidimensionais. Outra vantagem da janela de busca bidimensional é a possibilidade de redução do número de variáveis do modelo de rodovia (equação 14). Isto é possível porque as coordenadas dos vértices candidatos na janela bidimensional (ou planar) são matematicamente relacionadas pela equação do plano,

$$h_i = A.E_i + B.N_i + C \quad (15)$$

onde, A , B , e C são os coeficientes do plano. Considerando a equação 15 na equação 14, obtém-se:

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}), P_i(E_i, N_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) \quad (16)$$

A equação 16 mostra que os vértices candidatos em cada janela de busca podem ser amostrados através das coordenadas E e N , ficando a coordenada h para ser computada internamente através da equação 15. Outras variáveis podem ser eliminadas assumindo que a rodovia não varia muito, sobretudo em pequenos segmentos. Na prática, um parâmetro W_i para cada seção definida por três vértices é suficiente. Nesse caso, o número de variáveis inter-relacionadas na equação 16 cai para sete.

Outras duas estratégias podem ser usadas para melhorar a eficiência computacional do processo de otimização. A primeira baseia-se no uso de janelas

de busca de resolução variável. Visando aumentar o raio de convergência, nas primeiras iterações são usadas janelas de busca bidimensionais de baixa resolução e de grande extensão espacial. Para obter alta precisão e pequeno espaço de busca, nas últimas iterações são usadas janelas de busca pequenas e de alta-resolução. Outra importante estratégia para reduzir o espaço de busca consiste em selecionar apenas linhas poligonais suaves, visto que a suavidade é uma das características geométricas de rodovia. Os ângulos de deflexão horizontal e vertical em cada vértice da linha poligonal candidata devem estar abaixo de limiares pré-estabelecidos.

Por ultimo, retornando ao exemplo ilustrativo da figura 2, nota-se que depois da primeira iteração a linha poligonal inicial foi melhorada, mas ainda não descreve acuradamente o eixo da rodovia. O processo de otimização prossegue até que todos os novos vértices inseridos linearmente permaneçam, após um ciclo de otimização por programação dinâmica, colineares em relação aos vértices vizinhos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A metodologia proposta foi implementada usando o compilador Borland C++ Builder 5 para Windows XP. Foram utilizados nos experimentos dois pares estéreo de imagens aéreas (tomadas por uma câmera métrica) na escala aproximada de 1:9.200 e com resolução espacial aproximada de cerca de 25 cm. Estas imagens são de uma região da Suíça e estão disponíveis no sistema fotogramétrico LPS (*Leica Photogrammetry Suite®*), juntamente com dados de orientação interior e exterior.

As constantes α e β do modelo matemático de rodovia foram empiricamente determinados, valendo respectivamente 0,6 e 0,7 e permanecendo fixos em todos os experimentos. A posição e distribuição dos pontos sementes depende basicamente da forma da rodovia. As seguintes regras gerais mostraram-se efetivas para permitir a convergência do processo de otimização e evitar um espaço de busca muito grande: 1) os pontos sementes podem ser posicionados sobre a rodovia ou nas adjacências; 2) seções de rodovia de baixa curvatura requerem apenas dois pontos próximos das extremidades de cada seção; 3) seções de rodovia de média e alta curvatura podem ser suficientemente definidas por três pontos sementes, sendo dois (P_1 e P_2) nas proximidades das extremidades de cada seção e um outro mais distante do segmento de reta $\overline{P_1P_2}$.

Os resultados obtidos serão expostos de acordo com as seguintes três classes de rodovia: rodovias principais, com largura aproximada de 40 pixels; rodovias secundárias, com largura aproximada de 30 pixels; e rodovias terciárias, com larguras aproximadas de 15 pixels. O objetivo principal é avaliar a acurácia da metodologia proposta na extração de diferentes classes de rodovia. Uma análise qualitativa dos resultados é realizada através da inspeção visual das rodovias sobrepostas sobre a imagem de entrada. Visto que a metodologia proposta depende também de informações radiométricas medidas no espaço-imagem, a análise

qualitativa facilita o entendimento do comportamento do método frente a anomalias presentes na imagem, tais como obstruções causadas por sombras e árvores. Uma avaliação quantitativa dos resultados obtidos também é fornecida, tendo por base a discrepância média dos eixos de rodovia extraídos em relação aos correspondentes eixos de rodovia extraídos manualmente. A seguir são apresentados exemplos dos resultados obtidos para cada classe de rodovia. Para possibilitar uma boa visualização de detalhes dos resultados, são recortadas pequenas janelas ao longo das rodovias em ambas as imagens, nas quais os eixos extraídos são superpostos. Vale ressaltar que as dimensões destas janelas foram modificadas para facilitar a visualização de detalhes ou para possibilitar a construção das figuras, podendo então diferir bastante em escala.

A figura 3 mostra janelas retiradas de um par estéreo de imagens e que mostram o resultado da extração de um segmento de rodovia principal. Este segmento de rodovia apresenta-se radiometricamente bem definido. É também geometricamente suave, visto que é composto por um segmento aproximadamente reto e por curvas com curvaturas comportadas, e regular por apresentar largura constante. As duas únicas anomalias são causadas por um cruzamento em 'T' com uma rodovia secundária e por uma edificação em sua margem, as quais provocam duas pequenas falhas em uma das bordas da rodovia. A figura 3 mostra que estas anomalias não suficientes para interferir nos resultados, os quais se mostram bem acurados.

Figura 3 – Visualização do eixo extraído de rodovias principais.

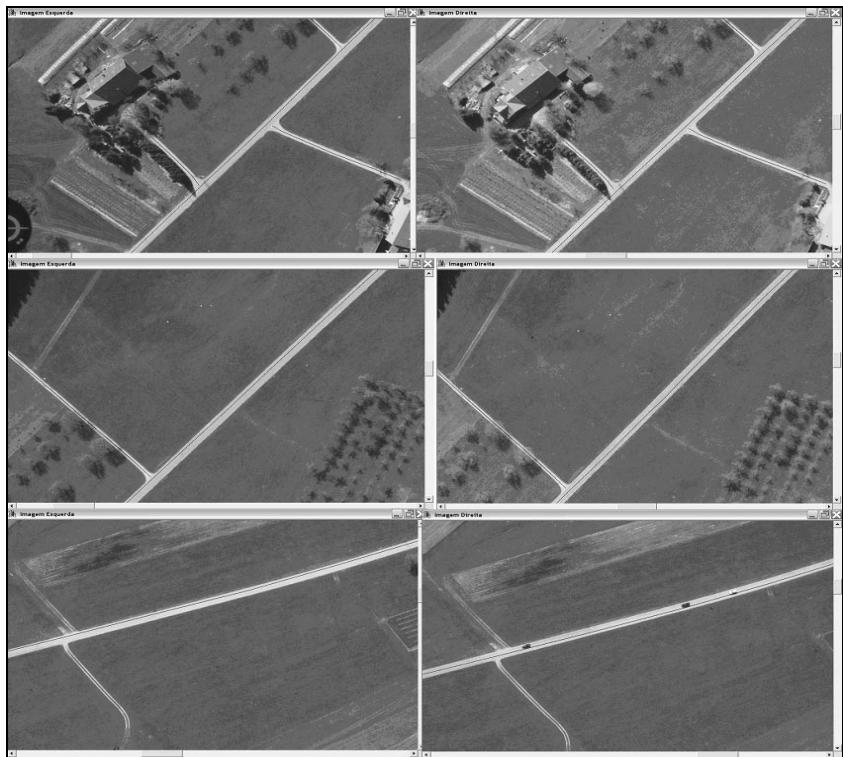


A figura 4 mostra que os resultados podem ser severamente deteriorados quando grandes anomalias estão presentes ao longo da rodovia, ocorrendo quando todo o leito é parcial ou totalmente obstruído por árvores ou sombras, ou quando uma ou ambas as bordas da rodovia não estão presentes. Estas anomalias são consideradas grandes quando são pelo menos duas vezes maiores que a largura da rodovia. Nestes trechos o modelo matemático de rodovia não se verifica, podendo resultar em deslocamentos nos eixos extraídos de rodovia.

Figura 4 – Grandes anomalias provocam falhas na extração.



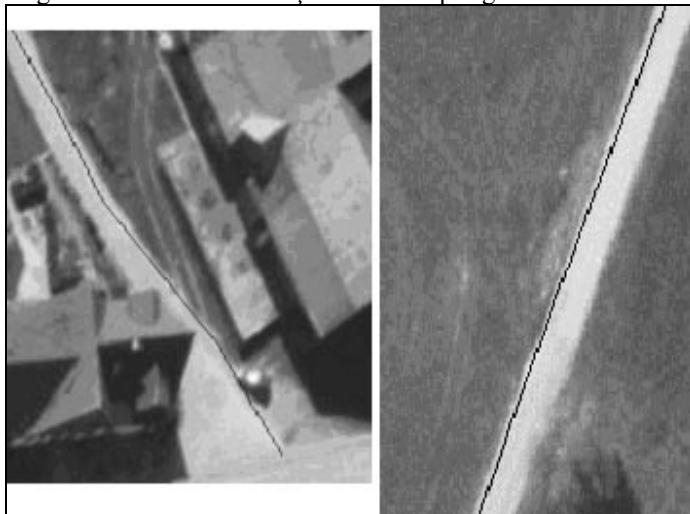
Figura 5 – Visualização do eixo extraído de rodovias secundárias.



A figura 5 mostra um exemplo envolvendo um segmento de rodovia secundária, estendendo-se aproximadamente ao longo das diagonais das janelas. As características favoráveis desta rodovia são: o bom contraste com as regiões adjacentes; a regularidade geométrica, na medida que sua largura é visualmente constante; a suavidade geométrica, com curvatura praticamente nula. As irregularidades presentes, isto é, elementos de contexto de rodovia não modeláveis, são: a ausência de pequenos segmentos de borda de rodovia causada por intersecções em 'T' com rodovias terciárias; as obstruções causadas pela projeção parcial de sombra de árvore sobre o leito da rodovia e por veículos. Como estes elementos de contexto são pouco significativos, os efeitos deles sobre os resultados não são notados. Nota-se entretanto um pequeno deslocamento do eixo nas janelas esquerdas do par estéreo, o que pode estar ligado a problemas de orientação da imagem esquerda, visto que o registro dos eixos na imagem direita é excelente.

A figura 6 mostra que anomalias maiores (à esquerda: obstrução perspectiva e grande variação na largura da rodovia; à direita: bordas irregulares e não bem definidas) não modeláveis pelo modelo matemático de rodovia provocam deslocamentos no eixo de rodovia.

Figura 6 – Falhas na extração causadas por grandes anomalias.



A figura 7 mostra exemplos de resultados envolvendo rodovias terciárias, cujas características radiométricas e geométricas são semelhantes às das rodovias envolvidas nos exemplos anteriores. As anomalias são também semelhantes às presentes nos casos anteriores. Notar que, conforme mostra o último par de janelas da figura 7, no local em que uma das rodovias é interceptada em 'Y' pela outra, um

segmento de borda relativamente grande (quando comparado à largura da rodovia) está ausente. Esta anomalia dá origem a um deslocamento visível do eixo de rodovia na região de cruzamento. De uma forma geral, a precisão do eixo extraído é boa, mas novamente, como no caso anterior, são visíveis os problemas de registro dos eixos de rodovia nas janelas da esquerda.

Figura 7 – Visualização do eixo extraído de rodovia terciária.

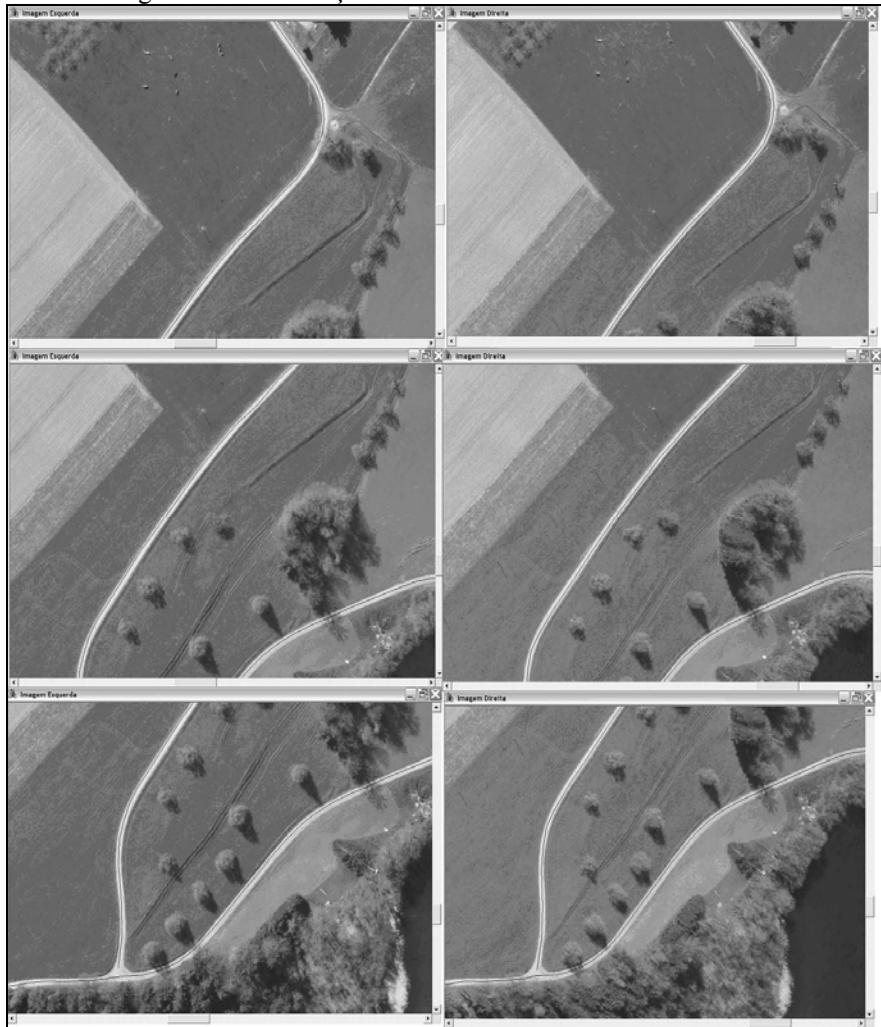


Figura 8 - Falhas na extração causadas por grandes anomalias.



A exemplo dos casos analisados anteriormente, a presença de grandes anomalias não impede que o método extraia o eixo de rodovia, mas a qualidade pode ser bastante afetada. A figura 8 mostra um exemplo onde vários elementos contextuais (obstrução perspectiva, sombra, mudança abrupta de largura etc.) estão presentes, prejudicando a correta extração do eixo da rodovia.

Tabela 1 - Discrepâncias médias para as três classes de rodovia.

	CLASSE DE RODOVIA		
	Principal	Secundária	Terciária
Discrepâncias médias (m)	1,3	1,7	1,4

A Tabela 1 mostra as discrepâncias médias para as três classes de rodovias, resultantes da distância média entre os eixos de rodovia extraídos computacionalmente e os correspondentes eixos extraídos manualmente. Os eixos extraídos manualmente foram obtidos em duas etapas: 1) determinação visual de pontos homólogos ao longo das rodovias no par estéreo; e 2) determinação das rodovias no espaço-objeto via intersecção fotogramétrica. Vale ressaltar que as discrepâncias médias não se limitam às rodovias presentes nos exemplos discutidos acima, mas sim em todas as rodovias extraídas nos dois pares de imagem. As seguintes discrepâncias médias foram encontradas para as rodovias principais, secundárias e terciárias, respectivamente (Tabela 1): 1,3 m, 1,7 m, e 1,4 m. A discrepância máxima entre estes valores é 0,4 m, correspondendo a cerca de 1,5

pixels no espaço-imagem. Levando em conta que, justamente por se tratar de uma entidade imaginária, é difícil para um operador extrair com destreza o eixo de rodovia, as acuráncias das três classes de rodovia podem ser consideradas relativamente próximas.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um método para extração de rodovias no espaço-objeto com base num par estéreo de imagens aéreas. Ele permite integrar num único processo as etapas de extração de rodovias, de correspondência estéreo e de projeção das rodovias para o espaço-objeto.

De uma forma geral, os experimentos realizados com dois pares de imagem permitiram concluir que, conforme os exemplos apresentados e independentemente da classe de rodovia, o método possui bom desempenho quando as rodovias possuem características geométricas e radiométricas assumidas pelo modelo de rodovia proposto ou, no caso da presença de anomalias, estas não são significativas em relação à largura da rodovia. Entretanto, quando as anomalias são significativamente maiores que a largura da rodovia, a qualidade do eixo de rodovia extraído pode não ser boa. Por último, as acuráncias obtidas para as três classes de rodovia não foram significativamente discrepantes entre si e possibilitaram concluir que o método permite geralmente obter resultados suficientemente acurados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e da CAPES na forma de bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.; STEFANIDIS, A. *Uncertainty in image-based change detection*. In: Accuracy 2000, Amsterdam, p. 1 – 8, 2000.
- BAJCSY, R.; TAVAKOLI, M. *Computer recognition of roads from satellite picture*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 6, 1976, p. 76 – 84.
- BALLARD, D. H.; BROWN, C.M. *Computer Vision*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982, 523 p.
- BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H. *Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping, and Context*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 65, n. 7, 1999, p. 777–785.
- DAL POZ, A. P.; VALE, G. M. *Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high-resolution images*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, Part 3/W8, p. 87-92, 2003.

- DAL POZ, A. P.; GALLIS, R. B. A.; SILVA, J. F. C. *Semiautomatic road extraction by dynamic programming optimisation in the object space: Single image case*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, Part 3, p. 215-220, 2006.
- GALLIS, R. B. A.; DAL POZ, A. P.; BARBOSA, R. L.; SILVA, J. F. C. *Extração semi-automática de rodovias através de programação dinâmica no espaço-objeto: Caso mono*. Revista Brasileira de Cartografia, v. 57, n. 3, 2005, p. 168-179.
- GEMAN, D., JEDYNAK, B. *An active testing model for tracking roads in satellite images*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 18, n. 1, 1996, p. 1-14.
- GRUEN, A.; LI, H. *Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 63, n. 8, 1997, p. 985-995.
- HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. *Automatic extraction of urban road networks from multi-view aerial imagery*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 58, n. 1-2, 2003, p. 83-98.
- HINZ, S.; BAUMGARTNER, A.; MAYER, H.; WIEDEMANN, C.; EBNER, H. *Road extraction focussing on urban areas*. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Rotterdam, p. 255-265, 2001.
- HINZ, S.; WIEDEMANN, C. *Increasing efficiency of road extraction by selfdiagnosis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 70, n. 12, 2004, p. 1457-1466.
- HU, X.; TAO C.V.; HU, Y. *Automatic Road Extraction from Dense Urban Area by Integrated Processing of High Resolution Imagery and Lidar Data*. In: XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. CD-ROM, 2004.
- KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D. *Snakes: Active Contour Models*. In: 1st International Conference on Computer Vision, London, England, p. 259-268, 1987.
- 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, v. 70, n. 12, 2004, p. 1417-1422.
- LUGNANI, J. B. *Introdução à Fototriangulação*. Ed. UFPr, 1987, 134p.
- MCKEOWN, D. M.; DELINGER, J. L. *Cooperative methods for road tracking in aerial imagery*. In: Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition, p. 662-672, 1988.
- MERLET, N.; ZERUBIA, J. *New prospects in line detection by dynamic programming*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 18, n. 4, 1996, p. 426-431.

- NEUENSCHWADER, W. M.; FUÀ, P.; IVERSON, L.; SZEKELY, G.; KUBLER, O. *Ziplock snakes*. International Journal of Computer Vision, v. 25, n. 6, 1997, p. 191- 201.
- QUAM, A. *Road tracking and anomaly detection in aerial imagery*. In: DARPA Image Understanding Workshop, p. 51-55, 1978.
- VOSSELMAN, G.; de KENECHT, J. *Road tracing by profile matching and Kalman filter*. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 265-274, 1995.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill, 3rd Ed, Boston-MA, 2000.
- ZHANG, C. *Towards an operational system for automated updating of road databases by integration of imagery and geodata*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 58, n. 3-4, 2004, p. 166-186.
- ZHOU, J.; BISCHOF, W. F.; CAELLI, T. *Road tracking in aerial images based on human - computer interaction and Bayesian filtering*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 61, n. 1, 2006, p. 108-124.

(Recebido em janeiro de 2009. Aceito em novembro de 2009)