

USO DE DADOS FOTOGRAMÉTRICOS NO REFINAMENTO GEOMÉTRICO DE CONTORNOS DE TELHADOS DE EDIFÍCIOS EXTRAÍDOS DE DADOS LASER

*Geometric refinement of laser-derived building roof contours using
photogrammetric data*

ALUIR P. DAL POZ¹

AYMAN F. HABIB²

VANESSA JORDÃO MARCATO³

LARISSA DE SOUZA CORREIA³

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT

¹ Departamento de Cartografia

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

³ Bolsista de IC/FAPESP

aluir@fct.unesp.br; vanessamarcato@yahoo.com.br; larissa.engcart@hotmail.com

² The University of Calgary

Department of Geomatics Engineering

Schulich School of Engineering

2500 University Drive NW, T2N 1N4, Calgary, Canadá.

habib@geomatics.ucalgary.ca

RESUMO

Neste artigo uma metodologia é proposta para o refinamento geométrico de contornos de telhados extraídos de dados de varredura a laser, usando imagens aéreas de alta resolução e modelos de campo aleatório de Markov (MRF - *Markov Random Field*). A metodologia proposta assume que a descrição 3D (isto é, um poliedro) de cada telhado de edifício reconstruído de dados de varredura a laser está topologicamente correta e que é necessário apenas melhorar sua acurácia. Visto que as cumeeiras de telhado são acuradamente extraídas de dados de varredura a laser, o objetivo básico é usar imagens aéreas de alta resolução para melhorar somente a qualidade geométrica dos contornos de telhado. A fim de atingir esta meta, os contornos 3D representando contornos de telhados são primeiramente transformados para o espaço imagem. Na sequência, as retas extraídas da imagem e

as retas resultantes dos polígonos projetados são utilizadas para estabelecer uma descrição MRF com base em relações (de comprimento, proximidade e orientação) entre ambos os conjuntos de retas. A função de energia associada com a descrição MRF é minimizada através de uma versão modificada do algoritmo de força bruta, resultando num agrupamento de retas para cada contorno de telhado. Finalmente, cada agrupamento de retas é topologicamente reconstruído baseando-se na topologia do correspondente polígono projetado no espaço imagem. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia proposta é promissora, visto que geralmente os polígonos refinados são geometricamente melhores que os correspondentes polígonos resultantes da projeção dos contornos 3D de telhados.

Palavras-chave: MRF; extração de feição; extração de edifício; imagem aérea, dados laser.

ABSTRACT

In this paper, a methodology is proposed for the geometric refinement of laser scanning building roof contours using high-resolution aerial images and Markov Random Field (MRF) models. The proposed methodology assumes that the 3D description of each building roof reconstructed from the laser scanning data (i.e., a polyhedron) is topologically correct and that it is only necessary to improve its accuracy. Since roof ridges are accurately extracted from laser scanning data, our main objective is to use high-resolution aerial images to improve the accuracy of roof outlines. In order to meet this goal, the available roof contours are first projected onto the image-space. Then, the projected polygons and the straight lines extracted from the image are used to establish an MRF description, which is based on relations (relative length, proximity, and orientation) between the two sets of straight lines. The energy function associated with the MRF is minimized using a modified version of the brute force algorithm, resulting in the grouping of straight lines for each roof object. Finally, each grouping of straight lines is topologically reconstructed based on the topology of the corresponding laser scanning polygon projected onto the image-space. The preliminary results showed that the proposed methodology is promising, since most sides of the refined polygons are geometrically better than corresponding projected laser scanning straight lines.

Keywords: MRF; feature extraction; building extraction; aerial image; laser data.

1. INTRODUÇÃO

A aquisição de informações espaciais usando técnicas fotogramétricas tem sido realizada quase que exclusivamente por um operador a partir de imagens aéreas e de satélite. Esta forma de coleta de dados é reconhecidamente eficiente quanto aos quesitos de confiabilidade e acurácia, mas, por outro lado, possui a desvantagem de ser morosa e custosa. Os incrementos no nível de automação têm sido frustrados por fatores tais como as imperfeições (principalmente ruídos) na fase de aquisição da imagem e a complexidade da cena.

As pesquisas em extração de edifícios vem sendo alvo de muita atenção em Fotogrametria desde a década de 1980. As metodologias desenvolvidas desde então podem ser classificadas em três categorias de acordo com o tipo de dados de entrada, sendo eles: dados fotogramétricos, laser e híbridos. Os dados fotogramétricos disponíveis na década de 1980 para a reconstrução detalhada de edifícios em 3D eram as imagens aéreas de alta-resolução. Por exemplo, Fua e Hanson (1987) propuseram uma metodologia para localizar e delinear edificações complexas em imagens aéreas. Em Shufelt (1987) é descrito o sistema PIVOT (*Perspective Interpretation of Vanishing points for Objects in Three dimension*), cujo objetivo básico é extrair automaticamente edificações a partir de uma única imagem aérea. Recentemente, Muller e Zaum (2005) propuseram uma metodologia para detectar edifícios em imagens aéreas, valendo-se da segmentação da imagem por crescimento de região e posterior separação entre regiões de edifícios e vegetação com base em atributos geométricos e fotométricos associados às regiões previamente segmentadas.

Os primeiros trabalhos que focaram o problema de extração de edifícios a partir de dados laser foram publicados na segunda metade da década de 1990. Por exemplo, em Vosselman (1999) a idéia básica é extrair planos de telhados e combiná-los para extrair por intersecção as cumeeiras. Já os contornos são detectados e delimitados através de algoritmos de detecção de descontinuidade. Rottensteiner et al. (2005) e Botelho e Centeno (2007) seguem, em linhas gerais, os mesmos princípios. Já Lafarge et al. (2008) desenvolveram uma metodologia para a extração de edifícios a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), em que as partes dos edifícios são extraídas como objetos retangulares. Estes objetos são posteriormente agregados para gerar modelos 3D completos de edificações. Uma metodologia específica para extração de contornos de telhados a partir de um MDE é proposta em Galvanin et al. (2008). Primeiramente, a fim de detectar objetos altos (edifícios altos, árvores etc.), o MDE é segmentado via divisão recursiva e fusão por inferência bayesiana. A extração dos contornos de telhados é focada nos objetos altos detectados, cujo problema é formulado e resolvido com base na teoria dos campos aleatórios de Markov (MRF - *Markov Random Field*).

As metodologias baseadas em dados híbridos procuram tirar vantagem da sinergia entre dados laser e de imagem. As técnicas baseadas em dados laser são superiores na obtenção de alturas de edifícios e de planos e cumeeiras de telhados, enquanto que as baseadas em dados fotogramétricos são superiores na extração de contornos de telhados (Kaartinen et al., 2005). Várias metodologias dessa classe podem ser encontradas na literatura. Hala e Brenner (1999) combinaram imagens multiespectrais e dados MDE/laser (Modelo Digital de Elevação gerado a partir de dados laser) para separar edifícios de vegetação. Já Santos e Tommaselli (2002) combinaram uma imagem aérea e um MDE para eliminar retas com pouca probabilidade de pertencerem a edificações e, assim, facilitar a extração de contornos de telhado. Sohn e Dowman (2003) propuseram uma outra metodologia,

onde primeiramente os edifícios são extraídos separadamente de uma imagem Ikonos e de dados MDE/laser e, após, ambos os resultados são combinados para a remoção de inconsistências. Já Vosselman (2002) combinou dados laser, planta urbana e imagem aérea de alta-resolução para a reconstrução poliédrica de edifícios. Basicamente, as plantas urbanas são usadas como referência para gerar automaticamente representações poliédricas de edifícios. As imagens aéreas de alta-resolução são usadas para refinar os contornos de telhados. Machado e Mitshita (2006) combinaram imagens aéreas de pequeno formato e dados laser para extrair contornos de telhados. O sistema desenvolvido inicialmente segmenta a imagem no espaço de cores CEILUV e filtra as regiões correspondentes à vegetação e a objetos baixos (estes são identificados através dos dados laser). O último passo consiste em regularizar os contornos remanescentes da filtragem usando o algoritmo de Douglas-Peucker. Em Cheng et al. (2008) os edifícios segmentados nos dados laser são usados para isolar as regiões na imagem aérea que os contêm. Na sequência, as duas direções principais de cada edifício são determinadas nos dados laser e refinadas nas regiões pré-selecionadas da imagem. As direções principais dos edifícios permitem realizar a detecção direcional de segmentos de retas. Os segmentos de reta distantes dos contornos dos edifícios, previamente segmentados nos dados laser e registrados nas regiões da imagem, são eliminados. As retas remanescentes são agrupadas para gerar os contornos fechados dos edifícios. Já em Jaw e Cheng (2008) os contornos de telhados são extraídos independentemente dos dados laser e da imagem aérea, via extração de segmentos de retas e posterior complementação topológica. Na sequência ambos os resultados são fusionados para gerar contornos de telhados mais consistentes.

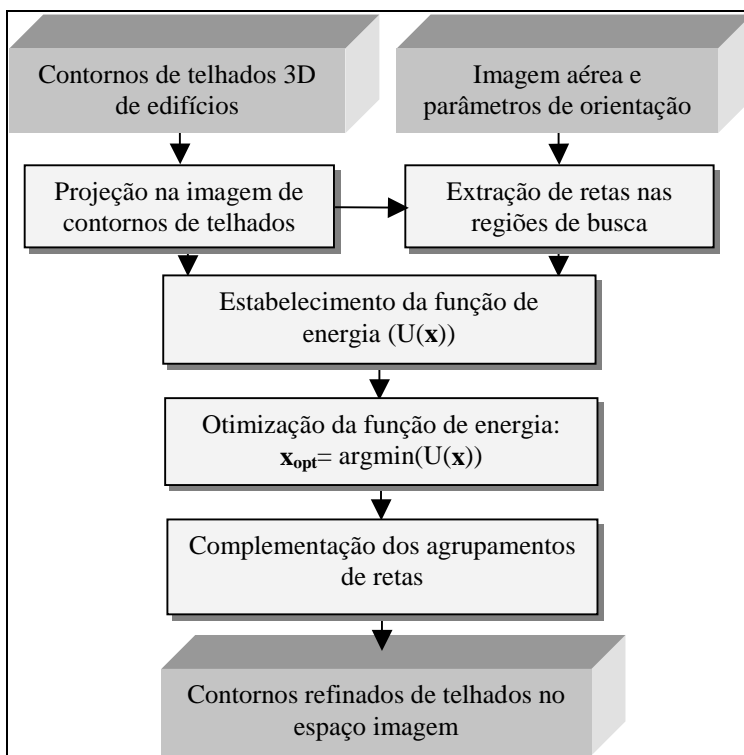
Neste artigo é proposta uma metodologia para o refinamento geométrico de contornos de telhados, previamente extraídos de dados laser, usando imagens aéreas de alta-resolução. Trata-se portanto de desenvolvimento metodológico compatível com a categoria de métodos baseados em dados híbridos. Geralmente os métodos existentes, sejam para a reconstrução de modelos completos em 3D ou para o delineamento dos contornos de edifícios, empregam estratégias hierárquicas combinadas com filtragem de entidades não relacionadas com edifícios. A metodologia apresentada neste trabalho se caracteriza, principalmente, como não hierárquica, visto que o principal problema a ser resolvido consiste em encontrar agrupamentos de retas que representam os contornos de telhados, via otimização de uma função de energia. Esta função de energia é formulada com base nos modelos MRF. Estes modelos vêm sendo cada vez mais utilizados em problemas de análise de imagem porque eles possibilitam tratar localmente a dependência estatística entre primitivas da imagem, tais como arestas de edificações. Além disso, eles possibilitam o tratamento global dos problemas, mas com a vantagem de se valer de computação local de acordo com as interações válidas (isto é, onde existe dependência estatística) entre as primitivas da imagem. Isto particularmente faz sentido no contexto de extração de contornos de telhados porque não é necessário

permitir que todas as retas (primitivas) extraídas da imagem interajam simultaneamente. Em vez disso, somente retas espacialmente próximas e com específicas relações angulares necessitam interagir. A metodologia proposta neste artigo (Seção 2) utiliza a projeção de contornos de telhados extraídos de dados laser para, juntamente com os respectivos erros de registro, limitar o número de retas extraídas da imagem e que potencialmente podem interagir entre si e constituir contornos de telhados. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção 3. O artigo é finalizado na Seção 4, onde são apresentados os principais resultados e perspectivas futuras.

2. METODOLOGIA

A figura 1 mostra as principais etapas da metodologia proposta para o refinamento de contornos de telhados previamente extraídos de dados laser.

Figura 1 - Principais etapas da metodologia.



A figura 1 mostra que as principais etapas são o pré-processamento, o estabelecimento da função de energia ($U(\mathbf{x})$) baseado em um modelo MRF, a

solução da função de energia através de um algoritmo de otimização e a complementação dos agrupamentos de retas obtidos para a geração de contornos completos de telhados. As etapas de pré-processamento compreendem basicamente a projeção na imagem de contornos de telhados e a extração de retas ao redor dos contornos de telhado projetados. As subseções seguintes apresentam detalhes sobre a metodologia, mas uma maior ênfase será dada à construção da função de energia.

2.1 Pré-processamento

As etapas de pré-processamento compreendem principalmente a projeção de contornos 3D de telhados de edifícios no espaço-imagem e a extração de retas na imagem que estão no entorno dos contornos de telhado projetados.

Dois passos são necessários para a projeção de contornos 3D de telhados no espaço-imagem. No primeiro passo a equação de colinearidade é utilizada, juntamente com os parâmetros de orientação exterior, para transformar os contornos de telhados no sistema de coordenadas fotogramétricas. Na sequência, um modelo interno da câmera e os parâmetros associados de orientação interior são utilizados para adicionar erros sistemáticos (distorções das lentes, refração fotogramétrica e deslocamento do ponto principal em relação ao centro da imagem) e transformar os contornos de telhados do sistema de coordenadas fotogramétricas para o sistema de coordenada da imagem (LC). Os erros de projeção são estimados para construir um modelo de erro de projeção.

O modelo de erro de registro é uma simples janela retangular construída no entorno de cada reta projetada do contorno 3D de telhado. As retas são extraídas na imagem dentro apenas destas janelas, evitando então a extração de informações irrelevantes ou que tenham pouca probabilidade de constituir contornos de telhado. Como as retas de interesse são geralmente pequenas, as distorções das lentes não as deformam significativamente. Existe na literatura uma vasta gama de métodos para a extração de retas em imagens digitais. Alguns exemplos de métodos são o detector de retas de Burns (Burns et al., 1984) e os métodos baseados na transformada de Hough (Balard e Brown, 1982). O algoritmo utilizado neste trabalho para a extração de retas baseia-se em algoritmos padrão de processamento de imagem. Primeiro, o algoritmo de Canny é utilizado para gerar um mapa binário de bordas afinadas. Segundo, um algoritmo de vetorização é aplicado para organizar as cadeias de bordas presentes no mapa binário. As retas são então extraídas através de um algoritmo de poligonização, conhecido como algoritmo de divisão recursiva (Jain et al., 1995). As retas extraídas dessa forma geralmente estão conectadas ao longo de polígonos ou linhas poligonais. Na sequência, as retas menores (de 2 a 3 pixels) e as que diferem muito em orientação (por exemplo, acima de 20°), em relação aos contornos projetados, são removidas, visto que são candidatas improváveis a constituir agrupamentos de telhados. Finalmente, regras simples de agrupamento perceptual (isto é, proximidade e colinearidade) são usadas para fundir retas

colineares e possibilitar uma redução maior do número de candidatas a representar agrupamentos de contornos de telhados.

2.2 Conceitos de MRF e a função de energia

2.2.1 Conceitos básicos de MRF

O MRF possibilita o tratamento eficiente de problemas em que se deseja modelar as relações espaciais (isto é, o contexto) entre as primitivas. Este é o caso, por exemplo, de retas que necessitam ser agrupadas para formar contornos de telhado. Num MRF, as posições em $S = \{1, \dots, n\}$ estão relacionadas entre si de acordo com um sistema de vizinhança definido como $N = \{N_i, i \in S\}$, onde N_i é o conjunto de posições vizinhas da posição $i \in S$. Um campo aleatório X é um MRF em S e em relação ao sistema de vizinhança N , se e somente se:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x}) &> 0, \forall_{\mathbf{x}} \in \mathbf{X} \\ P(x_i | x_{S-\{i\}}) &= P(x_i | x_{N_i}) \end{aligned} \quad (1)$$

Notar que \mathbf{x} é uma configuração de X e \mathbf{X} é o conjunto de todas as possíveis configurações. Notar também que $x_i \in \mathbf{x}$ e $x_{S-\{i\}}$ (ou x_{N_i}) $\subset \mathbf{x}$. Como estatuído pelo teorema de Hammersley-Clifford, um MRF pode também ser caracterizado pela distribuição de Gibbs (Kopparapu and Desai, 2001), isto é,

$$P(\mathbf{x}) = \frac{\exp(-U(\mathbf{x}))}{Z} \quad (2)$$

onde:

$$Z = \sum_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} \exp(-U(\mathbf{x})) \quad (3)$$

é uma constante normalizada e $U(\mathbf{x})$ é a função de energia, que pode ser expressa na forma:

$$U(\mathbf{x}) = \sum_{c \in C} V_c(\mathbf{x}) \quad (4)$$

A equação 4 mostra que a função de energia é uma soma de funções potencial ($V_c(\mathbf{x})$) dependendo de cliques $c \in C$, onde C é o conjunto de todas as possíveis cliques. Uma clique c é um subconjunto de posições em S , para a qual, todas as posições são, de acordo com um conceito válido de vizinhança, vizinhas aos pares. O valor de $V_c(\mathbf{x})$ depende da configuração local estabelecida pela clique c . Mais detalhes sobre a teoria de MRF podem ser encontrados em Kopparapu e Desai (2001) e em Modestino e Zhang (1992).

2.2.2 Função de energia

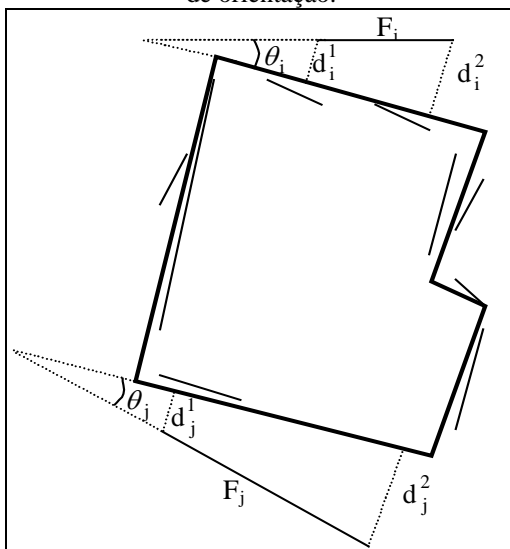
As retas extraídas na etapa de pré-processamento são usadas para construir um MRF expressando formas específicas de contornos de telhados de edifícios, tendo por referência os polígonos resultantes da projeção de contornos 3D de telhados. A função de energia associada é definida de tal forma que cada reta é associada com uma variável randômica (x_i), que assume valores binários de acordo com a seguinte regra:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow \text{a } i\text{-ésima reta pertence a} \\ & \text{um contorno de telhado; e} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5)$$

A regra acima dá origem a um vetor aleatório n-dimensional, onde n é o número de retas. Este vetor randômico é a variável a ser determinada no processo de otimização. Teoricamente, o espaço de busca contém 2^n combinações a serem submetidas ao processo de encontrar o valor mínimo da função de energia.

Antes de proceder com o desenvolvimento da função de energia, é necessário definir duas métricas, denominadas métrica de proximidade e métrica de orientação. Ambas as métricas são necessárias para definir o sistema de vizinhança para o problema em questão. Estas métricas baseiam-se nos elementos geométricos mostrados na figura 2.

Figura 2 – Elementos geométricos para a definição das métricas de proximidade e de orientação.



A métrica que mede a proximidade entre as retas F_i e F_j é definida como segue,

$$P(i, j) = \frac{1}{2}(d_i^1 + d_i^2 + d_j^1 + d_j^2) \quad (6)$$

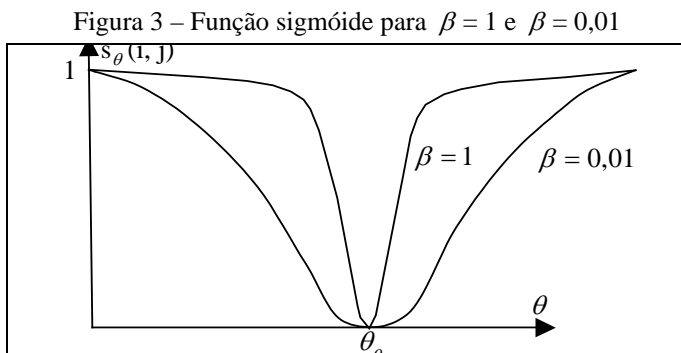
onde (figura 2), d_i^1 e d_i^2 são as distâncias entre pontos extremos da reta F_i e a reta projetada mais próxima de F_i ; e d_j^1 e d_j^2 são as distâncias entre os pontos extremos da reta F_j e a reta projetada mais próximas de F_j .

A equação 6 tem por base o princípio de que as retas que estão de alguma forma inter-relacionadas e próximas, são percebidas como pertencentes a uma mesma unidade. Neste caso, a unidade é o contorno de telhado de referência, isto é, o contorno 3D de telhado projetado. A equação 6 é então uma medida indireta de proximidade entre F_i e F_j , visto que ela explicita a proximidade entre um par de retas (F_i e F_j) e o contorno 3D de telhado. Pode-se então interpretar que se F_i e F_j estão próximas da unidade, então elas estão próximas também. Vale destacar que as seguintes propriedades verificam: $P(i, j) \geq 0$ e $P(i, j) = P(j, i)$. Em particular, $P(i, j) = 0$ se e somente se ambas as retas (F_i e F_j) superpõem aos respectivos lados do contorno 3D de telhado projetado.

A métrica de orientação entre duas retas F_i e F_j segue o mesmo princípio da métrica de proximidade e é definida com base na função sigmóide, isto é,

$$s_\theta(i, j) = \frac{2}{1 + \exp[-\beta \cdot (\theta - \theta_o)^2]} - 1 \quad (7)$$

onde (figura 2), $\theta = \theta_i + \theta_j$; θ_i é o ângulo entre a reta F_i e a reta projetada mais próxima de F_i ; θ_j é o ângulo entre a reta F_j e a reta projetada mais próxima de F_j ; β é uma constante positiva; θ_o é o valor ótimo (0° ou 180°) do parâmetro θ .



A função sigmóide tem algumas propriedades importantes (figura 3): 1) tem somente um ponto de mínimo em $\theta = \theta_0$; 2) varia no intervalo $[0; 1]$; 3) é simétrica em relação ao valor $\theta = \theta_0$; e 4) a constante β pode ser usada para controlar a forma da função sigmóide. Referente a esta última propriedade, quanto maior for o parâmetro β , maior será a penalização dos desvios entre θ e θ_0 .

Considerando que cada posição i em S corresponde a uma reta F_i , pode-se utilizar o formalismo apresentado anteriormente para definir cada elemento do sistema de vizinhança. Se N_i contém posições em S vizinhas à posição i , então $j \in N_i$ se e somente se,

$$\begin{cases} P(i, j) \leq t_p \\ s_\theta(i, j) \leq t_s \end{cases} \quad (8)$$

onde, t_p e t_s são os limiares de proximidade e orientação, respectivamente.

A função de energia $U(\mathbf{x})$ é elaborada com base em três termos de energia. O primeiro termo é definido com base numa clique de primeira ordem e visa favorecer as retas longas tendo por referência a reta projetada mais próxima. Este termo de energia ($U_1(\mathbf{x})$) é definido como segue,

$$U_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_i \frac{L_{F_i}^L}{L_{F_i}} \quad (9)$$

onde, n é o número de retas extraídas da imagem; $L_{F_i}^L$ é o comprimento da reta projetada mais próxima da i -ésima reta extraída da imagem (F_i); L_{F_i} é o comprimento da i -ésima reta extraída da imagem (F_i).

O segundo termo de energia é baseado numa clique de segunda ordem e visa favorecer as retas mais próximas do contorno de telhado projetado. Este termo de energia é denominado termo de proximidade e é formulado como segue,

$$U_2(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} x_i \cdot x_j \cdot P(i, j)}{\sum_{i=1}^n x_i \cdot (\sum_{i=1}^n x_i - 1)}$$

O terceiro termo de energia baseia-se também numa clique de segunda ordem e beneficia retas com orientações similares aos lados do contorno de telhado projetado. Este termo é denominado termo de energia de orientação e é formulado na forma:

$$U_3(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} x_i \cdot x_j \cdot s_{\theta}(i, j)}{\sum_{i=1}^n x_i \cdot (\sum_{i=1}^n x_i - 1)} \quad (11)$$

A função de energia é finalmente formulada como,

$$U(\mathbf{x}) = \alpha_1 \cdot U_1(\mathbf{x}) + \alpha_2 \cdot U_2(\mathbf{x}) + \alpha_3 \cdot U_3(\mathbf{x}) \quad (12)$$

onde, α_1 , α_2 , e α_3 são constantes positivas, sendo que a soma delas é igual a um.

Os segundo e terceiro termos de energia têm no denominador o termo $\sum_{i=1}^n x_i > 1$. Isto significa que cada configuração necessita de pelo menos duas correspondências. A configuração ótima (\mathbf{x}_{opt}) é obtida através da minimização da função de energia, isto é, $\mathbf{x}_{\text{opt}} = \text{argmin}(U(\mathbf{x}))$. O problema de minimização será discutido na próxima seção.

2.3 Solução da equação de energia

A fim de obter a configuração ótima (\mathbf{x}_{opt}) é necessário encontrar o mínimo global da função de energia ($U(\mathbf{x})$). O mínimo global pode ser encontrado através do método de busca por força bruta. Trata-se de um método simples e geral para a obtenção de solução de mínimo de uma função de energia, consistindo na busca exaustiva do melhor candidato entre todos os possíveis. É simples de implementar e, se a solução existe, sempre será encontrada. O grande problema do método de busca por força bruta é que em muitos problemas práticos o número de candidatos pode ser muito grande, tornando o problema intratável. Em geral, o método de busca por força bruta pode ser atrativo quando: 1) a complexidade do problema é relativamente baixa; 2) existem heurísticas relacionadas com o problema específico que possibilita a redução do espaço de busca para um tamanho tratável; 3) se quer avaliar a consistência ou estabilidade da função de energia. No método proposto é possível utilizar algumas heurísticas para reduzir o espaço de busca a tamanhos tratáveis, mesmo que a complexidade do edifício for relativamente alta.

A fim de evitar a explosão combinatorial associada com o problema em questão, duas heurísticas são utilizadas:

- 1) **Heurística de unicidade:** cada lado do contorno de telhado projetado deve ter no máximo uma correspondência, que é uma reta extraída da imagem ou

nenhuma reta. Isto significa que $\sum_{i=1}^n x_i \leq m$, onde m é o número de lados do

contorno projetado. Sejam n_1, n_2, \dots, n_m o número de retas extraídas da imagem em torno dos correspondentes lados do contorno projetado. Tem-se que $n = n_1 + n_2 + \dots + n_m$. O número de configurações que necessita ser checado é $C_1 = (n_1 + 1) \cdot (n_2 + 1) \dots (n_m + 1) \ll |\mathbf{X}| = 2^n$.

2)

- 3) **Heurística do número mínimo de correspondências esperadas:** o ideal seria que todos os lados projetados do contorno de telhado possuíssem correspondências válidas com retas extraídas na imagem. Entretanto, problemas na extração das retas na imagem podem ocorrer e em alguns casos nenhuma das retas extraídas correspondem aos respectivos lados do contorno projetado. Geralmente, esse problema ocorre com frequência relativamente baixa, não ultrapassando algo em torno de 10%. Se p for a porcentagem mínima de correspondências esperadas, então as configurações \mathbf{x} que deveriam ser verificadas deveriam respeitar a seguinte restrição: $\mathbf{a} \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq m$, onde \mathbf{a}

significa o inteiro inferior de $m' = \frac{p \cdot m}{100}$. Assumindo agora por simplicidade

que $n_1 = n_2 = \dots = n_m = n'$, então o número de configurações a ser verificado é

$$C_2 = \left[\binom{m}{m'} + \binom{m}{m'+1} + \dots + \binom{m}{m-1} \right] \cdot n'^2 + 2^m \ll C_1.$$

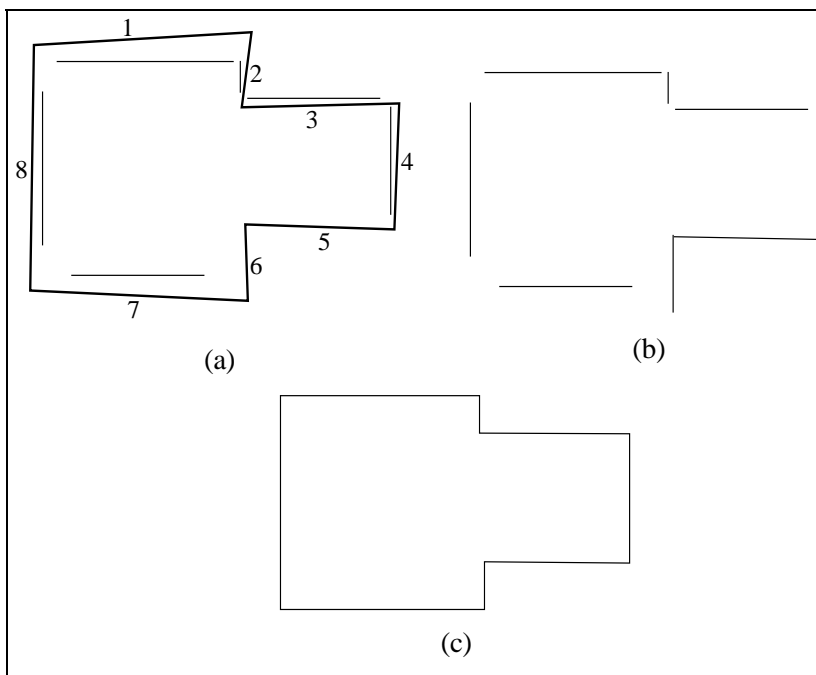
A fim de mostrar a eficácia das duas heurísticas propostas, analisa-se a seguir um exemplo hipotético envolvendo um edifício relativamente complexo com um contorno definido por 20 retas ($m = 20$). Geralmente, as técnicas de pré-processamento propostas extraem de um a três retas no entorno de cada lado do contorno de edifício projetado. Assumindo então uma média de 2 retas extraídas em torno de cada lado do contorno de telhado projetado, têm-se: 1) $n = 40$; 2) $n_1 = n_2 = \dots = n_{20} = n' = 2$; 3) $|\mathbf{X}| = 2^n = 1.099.511.627.776$; 4) $C_1 = 3.486.784.401$ (redução de ~99,7%); 5) $C_2 = 1.048.786$ ($p = 90$), que corresponde a uma redução de cerca de 99,9996% quando comparado ao número de candidatos resultantes da aplicação da heurística de unicidade. Em outras palavras, têm-se que $C_2 \ll C_1 \ll |\mathbf{X}| = 2^n$.

2.4 Complementação dos agrupamentos de retas

A figura 4 mostra um exemplo ilustrativo para facilitar o entendimento da estratégia de complementação do agrupamento de retas otimizado. O método de otimização gera para cada edifício um agrupamento de retas, cujas correspondências, com os respectivos lados (retas) do contorno de telhado projetado, são conhecidas. A figura 4(a) ilustra uma situação hipotética envolvendo um telhado com 8 lados. Supor que não foram encontradas as correspondências para

as retas projetadas 5 e 6. As retas projetadas que não têm correspondências com as retas extraídas da imagem são integradas ao agrupamento de retas resultante do processo de otimização. No exemplo hipotético em discussão, as retas projetadas 5 e 6 são integradas ao agrupamento obtido no processo de otimização, resultando, como mostra a figura 4(b), num novo agrupamento. O agrupamento otimizado, e complementado onde for necessário com as retas projetadas, é utilizado para gerar o polígono final de contorno de telhado. O problema básico a resolver consiste em determinar os vértices do polígono de contorno de telhado através da intersecção de retas. Este é um problema simples porque basta usar a topologia do correspondente contorno de telhado projetado para selecionar os pares de retas que são adjacentes. Retornando ao exemplo hipotético, o resultado final é o polígono mostrado na figura 4(c).

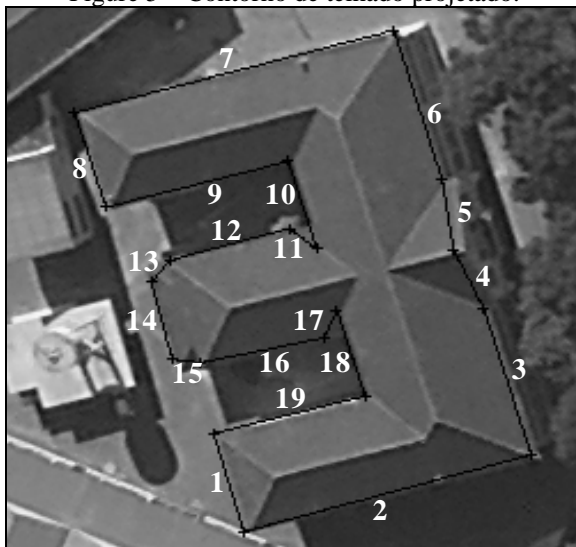
Figura 4 – Ilustração da estratégia de complementação. (a) Contorno de telhado projetado e agrupamento de retas resultante da otimização da função de energia; (b) Agrupamento de retas acrescido das retas projetadas 5 e 6; (c) Polígono representando o contorno de telhado refinado.



3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

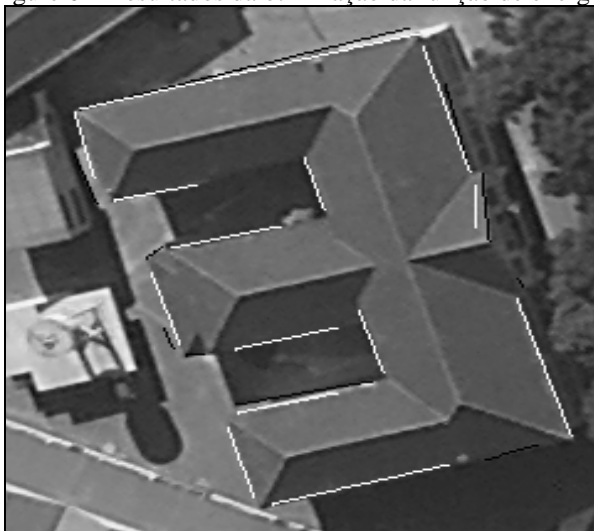
Os dados utilizados nos experimentos compreendem uma imagem aérea de alta-resolução e dois modelos 3D de edifícios gerados automaticamente a partir de dados de varredura a laser. A área teste está localizada na cidade de Curitiba, Pr. A imagem possui dimensões de 4500 pixels x 3000 pixels e resolução espacial aproximada de 20 cm. Os parâmetros de orientação interior e exterior da imagem são conhecidos. Para demonstrar o potencial do método proposto, apresentam-se abaixo dois testes com edifícios de diferentes complexidades.

Figure 5 – Contorno de telhado projetado.



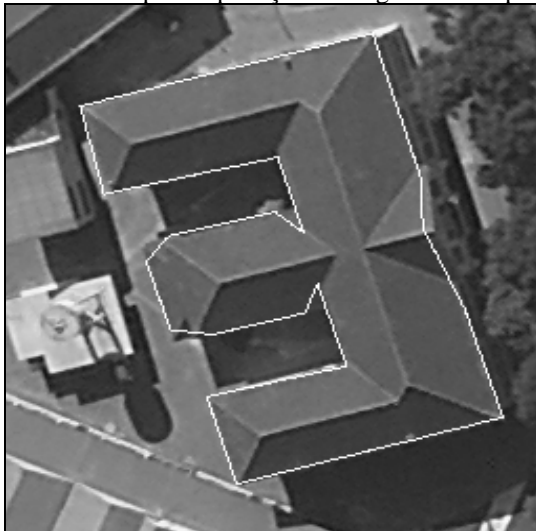
O primeiro edifício teste possui a forma de um 'E' invertido e seu contorno é definido por 19 retas. Em geral, nota-se que as bordas em vários locais não estão bem definidas, sobretudo as que definem as faces de telhado ligeiramente sombreadas. A figura 5 mostra o contorno de telhado 3D projetado e sobreposto na imagem. O polígono resultante está relativamente próximo das bordas do telhado do edifício, visto que o erro de registro máximo é de cerca de 5 pixels. O maior erro de registro é observado na reta correspondente ao lado 5 do polígono sobreposto na imagem. Pode-se observar também que as retas 13 e 15 não representam corretamente os detalhes do telhado. Isso ocorre devido a erros na geração do modelo 3D do edifício a partir de dados de varredura a laser.

Figure 6 – Resultados da otimização da função de energia.



Na figura 6 estão projetadas vinte e quatro retas extraídas da imagem através das técnicas de pré-processamento propostas. Estas retas são candidatas a substituir os lados projetados dos contornos de telhas, cuja distribuição ao redor das retas do telhado projetado é a seguinte: dez retas projetadas possuem apenas uma reta candidata; sete retas projetadas possuem duas retas candidatas; e duas retas projetadas não possuem candidatas. Este resultado mostra que as técnicas de pré-processamento propostas foram eficientes na filtragem de detalhes irrelevantes que, conseqüentemente, possuíam baixíssima probabilidade de representar lados de contorno de telhado. As retas selecionadas como lados de contornos de telhados pelo processo de otimização são identificadas em tom claro e as demais em tom escuro. A metodologia proposta encontrou 14 (74%) correspondências, das quais treze (69%) estão corretas e uma (5%) está incorreta (falsa positiva). Esta falha mostra uma deficiência da metodologia quando as candidatas possuem orientação e comprimento similares. Nesse caso, a reta mais próxima é escolhida, como foi o caso da correspondência obtida para o lado 5 do contorno de telhado projetado. Nota-se também que cinco (26%) correspondências não foram encontradas (falsas negativas). Todas estas falsas negativas estão relacionadas com duas situações, sendo elas: 1) a ausência de candidatas, que são os casos das retas correspondentes aos lados 11 e 17 do contorno de telhado projetado; e 2) a presença de somente candidatas inválidas, como são os casos das retas projetadas 4, 13 e 15.

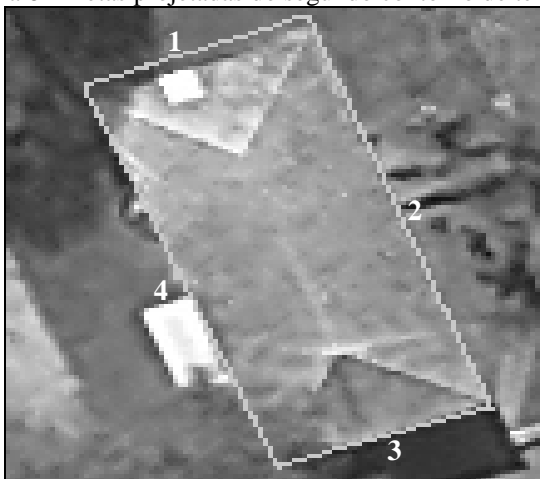
Figure 7 – Resultado após a aplicação das regras de complementação.



A figura 7 mostra o resultado obtido após a aplicação da estratégia proposta de complementação. Quatorze retas do contorno de telhado projetado foram substituídas pelas correspondentes retas selecionadas via otimização da função de energia. Estas retas são potencialmente melhores que as correspondentes retas projetadas. As retas projetadas 4, 11, 13, 15 e 17 foram mantidas porque não foram encontradas correspondências válidas entre as retas extraídas pelas técnicas de pré-processamento. O contorno de telhado refinado no espaço-imagem é determinado através do agrupamento resultante das regras acima, juntamente com a topologia do contorno de telhado projetado. O contorno obtido é melhor que o contorno projetado porque a maioria de seus lados representa de forma mais fiel os respectivos lados de contorno de telhado. A metodologia proposta não foi capaz de prover resultados satisfatórios ao longo de quatro lados do polígono refinado. A pequena seção de contorno de telhado definida pelos lados 4 e 5 permaneceu com uma pobre descrição geométrica. As razões principais são duas: 1) a deficiência, já mencionada, da metodologia proposta em encontrar a correspondência correta para a reta projetada 5; e 2) a ausência de candidata válida para a reta projetada 4. Os detalhes do contorno de telhado ao longo dos lados 13 e 15 foram pobremente descritos por uma razão básica: a descrição geométrica das partes correspondentes no contorno 3D não foi bem feita. Finalmente, tendo por base a análise acima, a completeza e a correção dos resultados foi de 100% e 79% ($\cong 15/19$), respectivamente. Vale lembrar que, como o contorno refinado sempre será obtido de forma completa, sempre a completeza será de 100%. Assim, o parâmetro de

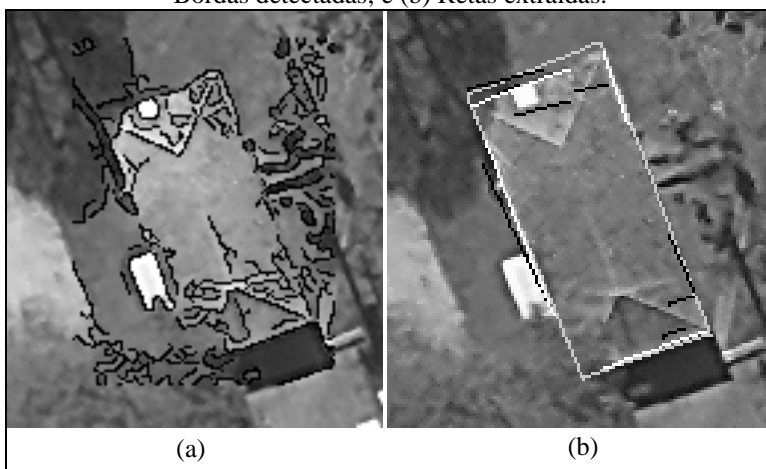
completeza, embora usual na análise de resultados de extração de feições, não é significativo para o presente caso.

Figura 8 – Retas projetadas do segundo contorno de telhado.



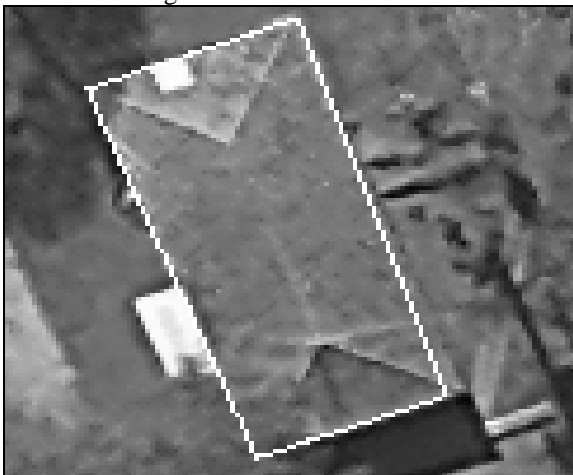
A figura 8 mostra o segundo contorno de telhado 3D, superimposto numa sub-imagem que contém o segundo edifício teste. Pode-se notar claramente que a projeção não apresentou bom resultado apenas com o lado 1, embora erros de registro são também visíveis com os lados 2 e 3.

Figura 9 – Correspondências obtidas via otimização da função de energia. (a) Bordas detectadas; e (b) Retas extraídas.



As bordas detectadas sobre e na vizinhança do segundo edifício teste são mostradas na figura 9(a). Como a imagem deste edifício é afetada por várias anomalias (por exemplo: baixo contraste; sombra no canto superior esquerdo do edifício; e vegetação cobrindo o canto inferior esquerdo do edifício etc.), as bordas em geral foram detectadas de forma bastante confusa. São poucos os trechos em que as bordas referentes aos lados do edifício foram detectadas. A figura 9(b) mostra que a aplicação das técnicas de pré-processamento possibilitou a extração de retas nas adjacências das correspondentes retas projetadas, dentre as quais se têm aquelas que correspondem às bordas do edifício. No total foram extraídas doze retas, sendo cinco vizinhas da feição reta projetada 1, duas vizinhas da feição reta projetada 2, três vizinhas da feição reta projetada 3 e duas vizinhas da feição reta projetada 4. As retas selecionadas na otimização da função de energia são identificadas em tom claro e as que foram rejeitadas em tom escuro. Notar que o polígono de telhado projetado está superposto também na imagem em tom intermediário. Com exceção da reta selecionada como correspondente ao lado 2, todas as demais correspondem a pelo menos 60% do comprimento dos respectivos lados. Vale ressaltar que este resultado depende fundamentalmente da etapa de pré-processamento e da qualidade das bordas. Ressalta-se também que, a despeito dos problemas geométricos e radiométricos apontados, a qualidade posicional das retas aceitas na otimização é muito boa.

Figura 10 – Resultado final.



O resultado da complementação do agrupamento com quatro retas, gerado pela metodologia de otimização da função de energia, é mostrado na figura 10. Como todas as correspondências foram obtidas no processo de otimização, é

necessário usar somente a topologia do polígono projetado. Vale notar que os parâmetros de completeza e correção dos resultados obtidos são ambos de 100%, que é consequência da excelente qualidade geométrica do polígono que representa o contorno de telhado refinado.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste artigo foi proposta uma metodologia para o refinamento geométrico de contornos de telhados 3D projetados numa imagem aérea de alta-resolução. Uma descrição MRF para agrupamento de retas foi desenvolvida, assumindo que cada contorno de telhado projetado está topologicamente correto e necessita somente de refinamento geométrico. A descrição MRF é formulada com base em relações (de comprimento, proximidade e orientação) entre retas extraídas da imagem e o polígono que representa o contorno de telhado projetado. O agrupamento de retas é obtido através da otimização da equação de energia associada à descrição MRF. Na sequência o agrupamento de retas otimizado é transformado num polígono completo, o qual representa de forma mais fiel a geometria do telhado projetado. A topologia do telhado projetado é usada na reconstrução topológica do polígono refinado.

Os resultados obtidos com base em testes com dois edifícios mostraram que a metodologia proposta é promissora. O primeiro teste teve por base um edifício cuja complexidade geométrica é relativamente alta. Além disso, o baixo contraste das faces de telhado em relação às adjacências do edifício dificultou a obtenção de retas com boa qualidade e, em alguns casos, não foi possível extrair a reta correta. Mesmo assim, a maioria dos lados do polígono refinado foi geometricamente melhorada. Foram obtidos os valores de 100% e 79% para os parâmetros de completeza e correção, respectivamente. O segundo edifício, embora composto por apenas 4 lados, apresenta anomalias importantes, como obstruções completas em duas de suas quinas. Este teste mostrou a importância de técnicas de agrupamento perceptual para diminuir a fragmentação das bordas detectadas. A combinação das retas selecionadas pelo processo de otimização e a topologia do telhado projetado possibilitou a correta reconstrução do contorno do telhado, visto que ambos os parâmetros de qualidade obtiveram o valor ótimo de 100%.

Algumas direções para desenvolvimentos futuros são apresentadas a seguir. Uma delas é o refinamento da função de energia. Neste sentido, a integração de conhecimentos relacionados com sombras, quinas, alturas provenientes de dados laser, entre outros, pode melhorar substancialmente a função de energia, evitando, por exemplo, a correspondência errada obtida para o lado 5 do telhado do primeiro edifício. Outra direção importante é a incorporação de algoritmos mais apropriados para tratar problemas com alta dimensionalidade. Por exemplo, o uso de algoritmos genéticos seria relativamente fácil, visto que a incógnita da função de energia é um vetor binário.

AGRADECIMENTOS

Este artigo contou com apoio do CNPq, na forma de bolsa de pós-doutorado no exterior, e da FAPESP, através de Auxílio à Pesquisa e bolsas de IC.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLARD, D. H.; BROWN, C.M. *Computer Vision*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982, 523 p.
- BOTELHO, F. M.; CENTENO, J. A. S. *Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados laser scanner aerotransportados*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 13, n. 1, 2007, p. 107-126.
- BURNS, J. B.; HANSON, A. B.; RISEMAN, E. M. *Extracting straight lines*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 8, n. 4, 1984, p. 425-455.
- CHENG, L.; GONG, J.; CHEN, X.; HAN, P. *Building boundary extraction from high resolution imagery and LIDAR data*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 37, p. 693-698, 2008.
- FUA, P.; HANSON, A. J. *Resegmentation using generic shape: Locating general cultural objects*. Pattern Recognition Letters, v. 5, 1987, p. 243-252.
- GALVANIN, E. A. S.; DAL POZ, A. P.; SOUZA, A. D. P. *Extração automática de contornos de telhados usando dados de varredura a laser e Campos Randômicos de Markov*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 14, n. 2, 2008, p. 221-241.
- HAALA, N.; BRENNER, C. *Extraction of buildings and trees in urban environments*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, 1999, p. 130-137.
- JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. *Machine Vision*. MIT Press and McGraw-Hill, New York, 1995, 549p.
- JAW, J. J., CHENG, C. C. *Building roof reconstruction by fusing laser range data and aerial images*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 37, p. 707-712, 2008.
- KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; GÜLCH, E.; VOSSELMAN, G. et al. *Accuracy of the 3D city model: EuroSDR comparison*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, p. 227-232, 2005.
- KOPPARAPU, S. K.; DESAI, U. B. *Bayesian approach to image interpretation*. Springer, 2001, 127p.
- LAFARGE, F.; DESCOMBES, X.; ZERUBIA, J.; PIERROT-DESEILLIGNY, M. *Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 63, 2008, p. 365-381.

- MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A. *Detecção automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmera digital de pequeno formato e dados LIDAR*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 12, n. 3, 2006, p. 215-233.
- MODESTINO, J. A.; ZHANG, J. A. **Markov Random Field model based approach to image interpretation**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 6, 1992, p. 606-615.
- MÜLLER, S.; ZAUM, D. W. *Robust building detection in aerial images*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, p. 143-148, 2005.
- ROTTENSTEINER, F.; TRINDER, J.; CLODE, S.; KUBIK, K. *Automated delineation of roof planes from LIDAR Data*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, p. 221-226, 2005.
- SHUFELT, J. A. *Geometric constraints on hypothesis generation for monocular building extraction*. In: SPIE – Conference Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III, Orlando, USA, v. 3072, 1987.
- SANTOS, D. R.; TOMMASSELLI, A. M. G. *Extração semi-automática de edificações com análise do MNE*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 8, n. 1, 2002, p. 25-45.
- SOHN, G.; DOWMAN, I. J. *Building extraction using Lidar DEMs and Ikonos images*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, 2003.
- SOWMYA, A; TRINDER, J. C. *Modelling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 55, n. 1, 2000, p. 34-47.
- VOSSelman, G. *Building reconstruction using planar faces in very high density height data*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v.37, pp. 87-92, 1999.
- VOSSelman, G. *Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction*. In: IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Toronto, 2002.

(Recebido em Janeiro de 2009. Aceito em agosto de 2009.)