

EXTRAÇÃO E REGULARIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE POLÍGONOS REPRESENTANDO CONTORNOS DE TELHADO A PARTIR DE UM MDS NORMALIZADO

MICHELLE SAYURI YANO¹
ALUIR PORFÍRIO DAL POZ²
TATIANA SUSSEL GONÇALVES MENDES³

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT

²Departamento de Cartografia, Presidente Prudente – SP

³Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente – SP

¹ Bolsista de IC/FAPESP

michelle.yano@gmail.com, aluir@fct.unesp.br, tatisussel@gmail.com

RESUMO – Este trabalho apresenta uma metodologia para extração e regularização de polígonos representando contornos de telhados, tendo por base dados de varredura a LASER estruturados segundo um Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn). Um MDSn ideal apresenta apenas os objetos existentes (edifícios, árvores etc.) sobre a superfície física da Terra. A base destes objetos possui cota 0 (zero) e os pontos do topo possuem cotas iguais às alturas deles em relação ao terreno. Tendo por base esta propriedade, é possível extrair, e posteriormente regularizar, polígonos representando contornos de telhados de edificações com base em quatro etapas: 1) Transformar o MDSn numa malha binária, onde os pontos com cota superior a um dado limiar recebem o número um (representando os objetos altos) e os demais pontos recebem zero (fundo); 2) Detectar as bordas entre os objetos altos e o fundo; 3) Vetorizar e poligonizar os contornos dos objetos altos; e 4) Regularizar os contornos de modo que formem polígonos com ângulos perfeitamente ortogonais. Os resultados obtidos mostraram um desempenho satisfatório do método proposto.

Palavras chave: Varredura a LASER, detecção de bordas, poligonização, regularização.

ABSTRACT – This paper presents a methodology for extraction and regularization of polygons representing roof contours, based on LASER scanning data structured according to a normalized Digital Surface Model (nDSM). An ideal nDSM presents only existing objects (buildings, trees etc) on the Earth's surface. The basis of these objects has quota 0 (zero) and the points of the top have quotas equal to their heights relative to ground. Based on this property, it's possible to extract and regularize polygons representing buildings roofs contours based on four steps: 1) Transform the nDSM into a binary grid, where points with quotas higher than a given threshold are set to one (representing the tall objects) and other points are set zero (background); 2) Detect the edges between the tall objects and the background; 3) Vectorize and polygonize the contours of the tall objects; and 4) Regularize the contours so that they form polygons with orthogonal angles. The obtained result showed a satisfactory performance of the proposed method.

Key words: LASER scanning, edges detection, polygonization, regularization.

1 INTRODUÇÃO

As pesquisas voltadas para a reconstrução em 3D de edifícios a partir de imagens digitais ganharam grande impulso na década de 1980. Nessa época os dados disponíveis, e que possibilitavam este tipo de reconstrução, eram as imagens aéreas de alta-resolução. A partir de meados da década de 1990 surgiram novos dados para aplicação no problema em questão, destacando-se os

dados de varredura a LASER. Os métodos utilizados para a extração de edifícios a partir de dados LASER geralmente baseiam-se na extensão de métodos de detecção de bordas para a detecção de contornos de telhados, no agrupamento de pontos coplanares para detectar planos de telhados e na intersecção de planos de telhados para a extração de cumeeiras. Nessa linha pode-se citar Vosselman (1999), Rottensteiner et al. (2005) e Botelho e Centeno (2007).

O desenvolvimento de métodos semi-automáticos e automáticos para coletar eficientemente informações espaciais a partir de imagens digitais (aéreas e de satélite) e de outras fontes de dados, como os de varredura a LASER, tem sido um dos principais focos em Fotogrametria (DAL POZ, 2002). O uso de dados de sistemas de varredura a LASER vem se tornando comum nas mais diversas áreas, em especial no mapeamento, envolvendo reconstrução de superfícies e extração de objetos. Isso implica na solução de problemas que envolvem segmentação, classificação e filtragem de objetos (malha viária, edificações, vegetação etc.) para a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e de Superfície (MDS). Esses dados podem fornecer informação complementar e redundante para apoiar o processo de extração e melhorar os resultados.

Neste contexto o presente trabalho apresenta uma proposta para a extração dos contornos dos telhados de edifícios a partir de um Modelo Digital Superfície normalizado (MDSn) gerado a partir de dados LASER, e posterior regularização dos contornos extraídos, tendo por base métodos convencionais de processamento de imagem (limiarização e detecção de bordas) e técnicas de modelagem do contorno (vetorização, poligonação e regularização). O trabalho está estruturado em 4 seções principais. A seção 2 apresenta a metodologia utilizada no trabalho. Os resultados e análises dos experimentos são descritos na seção 3. E as considerações finais são apresentadas na seção 4.

2 EXTRAÇÃO E REGULARIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTORNOS DE TELHADOS

A metodologia proposta neste trabalho para a extração de polígonos representando contornos de telhados a partir de dados LASER é baseada em 4 etapas principais:

- Geração do MDSn;
- Transformação do MDSn em uma malha binária;
- Detecção das bordas dos objetos altos da malha binária gerada;
- Vetorização e poligonação das bordas detectadas anteriormente.

Por fim, após a extração dos polígonos, é realizado um pós-processamento para obter representações poligonais regulares, isto é, compostas por retas paralelas ou ortogonais entre si.

2.1 Geração do MDSn

Os dados de varredura a LASER consistem em uma nuvem de pontos com coordenadas 3D irregularmente distribuídos. Deste modo, a primeira etapa do trabalho foi a geração da malha regular que representa o MDSn, a qual é obtida subtraindo o Modelo Digital de Terreno (MDT) do Modelo Digital de Superfície (MDS).

O MDS e o MDT são malhas regulares geradas a partir da interpolação dos pontos LASER. Inúmeros métodos de interpolação para a densificação dos modelos digitais podem ser citados. Entre eles se destacam: krigagem, vizinho mais próximo, inverso da distância, *spline*, mínimos quadrados e bilinear. Para a escolha adequada do método de interpolação é necessário conhecer as características de cada interpolador bem como os dados que serão utilizados. Neste sentido, utilizou-se o método de interpolação krigagem para a geração do MDT, pelo fato deste método fazer uma representação suavizada do relevo. Já para a geração do MDS, foi utilizado o interpolador vizinho mais próximo, por ele preservar a agudeza das bordas dos edifícios.

2.2 Geração de uma malha binária

A segunda etapa do trabalho consiste em separar as regiões de edifícios das regiões de terreno a partir da geração de uma malha binária através de um processo de limiarização. O processo de limiarização permite isolar regiões de edifícios, além de outros objetos altos, das regiões de terreno, pois considera que em um MDSn:

- Os pontos pertencentes ao terreno possuem alturas normalizadas aproximadamente iguais a zero; e
- Os pontos pertencentes aos topos dos edifícios possuem alturas normalizadas aproximadamente iguais às alturas desses pontos em relação ao terreno.

Dessa forma, escolhendo-se um limiar adequado L , as regiões de edifícios são separadas das regiões de terreno atribuindo-se o valor unitário (1) para os pontos da malha do MDSn com alturas superiores a L e para os demais pontos atribuindo-se o valor nulo (0). As regiões associadas com o valor unitário corresponderiam aos edifícios e a outros objetos altos, e às associadas ao valor nulo formam um todo denominado fundo, que pode ser considerado como terreno. O resultado (MDSn limiarizado) é uma malha binária que pode ser representada por uma imagem binária, na qual os objetos altos são representados pela cor branca e o terreno é representado pela cor preta.

2.3 Detecção de bordas

A etapa seguinte é a detecção das bordas dos edifícios na imagem binária. A detecção de bordas é um processo no qual se tem por objetivo capturar propriedades significativas dos objetos em uma imagem. Estas propriedades incluem descontinuidades de características fotométricas, geométricas e físicas dos objetos. Tais informações são detectadas pelas variações ou descontinuidades dos níveis de cinza da imagem. Na literatura relacionada, vários detectores podem ser encontrados. Neste trabalho optou-se por utilizar as máscaras de diferenciação de Canny.

Os primeiros detectores propostos eram baseados nos operadores do gradiente e Laplaciano, os quais se limitavam a operação de diferenciação e limiarização para separar as regiões de bordas. O método mais comum de diferenciação é o do gradiente. Neste método, considerando uma função $f(x,y)$, por definição, sabe-se que o vetor gradiente dessa função irá apontar na direção onde há uma mudança mais rápida de f na posição (x,y) . Sendo assim, em regiões de bordas o vetor gradiente irá apontar na direção transversal a essas bordas (GONZALEZ e WOODS, 2000). O gradiente de f na posição (x,y) é dado pelo vetor:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A magnitude desse vetor, denotada por $\|\nabla f\|$, equivale à maior taxa de aumento de $f(x,y)$ por unidade de distância na direção de ∇f , e é dada por:

$$\|\nabla f\| = \text{mag}(\nabla f) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (2)$$

Geralmente aproxima-se a magnitude do vetor gradiente com valores absolutos:

$$\|\nabla f\| \approx |G_x| + |G_y| \quad (3)$$

O cálculo da magnitude do vetor gradiente é realizado em cada pixel da imagem para a obtenção da imagem de magnitude do gradiente. E, finalmente, para a obtenção de bordas afinadas, dois passos podem ser aplicados: 1) separação das regiões de borda via limiarização simples da imagem do gradiente; e 2) afinamento das regiões de borda via algoritmo de afinamento de bordas. Os detectores de bordas de Sobel e Prewitt são os principais exemplos de métodos de detecção de bordas baseados no cálculo do gradiente.

O detector de bordas de Canny é um método mais sofisticado, que envolve suavização Gaussiana, algoritmo de supressão máxima e algoritmo de histerese. Porém, neste trabalho optou-se por utilizar apenas as máscaras de diferenciação do detector de Canny, visto que as imagens utilizadas são imagens binárias. As máscaras de diferenciação de Canny são dadas por:

$$[-1; 1] \text{ e } [-1; 1]^T \quad (4)$$

A primeira máscara detecta as bordas na direção vertical e a segunda detecta as bordas na direção horizontal (CANNY, 1986). A imagem de bordas final é obtida através do cálculo da resultante dessas duas máscaras.

2.4 Vetorização dos mapas de bordas detectadas

O resultado da detecção de bordas é um mapa de bordas. Apesar dos pixels da imagem de borda se

conectarem para formar cadeias lineares de pixels, a ligação entre os pixels adjacentes nestas cadeias lineares não é conhecida. Assim, a ligação entre os pixels de um mesmo contorno deve ser realizada por um processo de vetorização. Esse processo consiste em formar listas ordenadas de pixels de borda, a partir de uma lista não ordenada de pixels proveniente de algum processo de detecção e afinamento de bordas (JAIN et al., 1995).

Segundo Dal Poz (2002), a vetorização consiste em varrer todos os pixels de uma imagem de borda. Quando um determinado pixel de borda for encontrado, uma busca é iniciada para encontrar a sequência de pixels da borda detectada. Como geralmente o pixel de borda encontrado localiza-se no meio da borda, isto é, não no início ou no fim da lista, a busca é realizada em um sentido e depois no outro e, após isso, as duas listas resultantes são conectadas. A busca pelos pixels de borda adjacentes é realizada sequencialmente utilizando pequenos segmentos de três pixels. Os pixels de borda que já foram ordenados são apagados na imagem de borda, e quando a conexão de todos os pixels de uma borda for finalizada, a varredura ao longo das linhas é retomada a partir do primeiro pixel detectado da borda ordenada. Isso garante que todos os pixels da imagem sejam conectados para formarem bordas, ou eliminados no caso de estarem isolados ou pertencerem às bordas muito pequenas.

2.5 Representação para o contorno

Posteriormente à obtenção das listas ordenadas de pixels que representam as bordas existentes em uma imagem, é necessário utilizar uma representação mais eficiente para as bordas. Essa representação é denominada contorno. Neste trabalho o método utilizado para a representação dos contornos foi a poligonização por divisão recursiva.

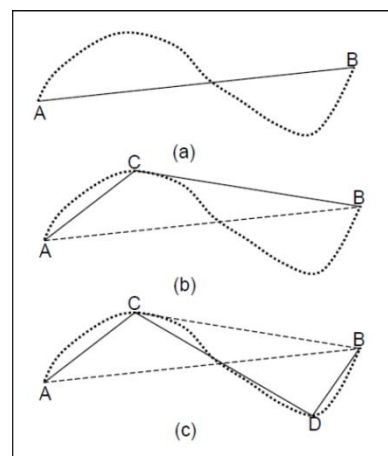


Figura 1 – Algoritmo de divisão recursiva (Fonte: Adaptado de JAIN et al., 1995).

O algoritmo de divisão recursiva funciona de tal forma que, partindo dos pontos extremos de uma cadeia de pixels de borda, o algoritmo insere recursivamente novos vértices, até que a linha poligonal definida pelos

extremos e os vértices gerados aproximem-se, com a precisão desejada, da curva inicial. A Figura 1 apresenta uma esquematização do algoritmo de divisão recursiva.

Como mostra a Figura 1(a), primeiramente a curva inicial é modelada grosseiramente pelo segmento de reta definido pelos pontos A e B. Na sequência (Figura 1(b)), o segmento \overline{AB} é subdividido através da inclusão de um novo ponto C, que é o ponto da curva inicial mais distante do segmento de reta \overline{AB} . O polígono definido pelos pontos A, C e B é uma modelagem melhor para a curva inicial. O mesmo é feito com o segmento de reta \overline{CB} , dando origem ao ponto D e ao polígono definido pelos pontos A, C, D e B (Figura 1(c)). Este polígono é uma melhoria significativa da modelagem anterior (Figura 1(b)). O procedimento continua até que nenhum ponto da curva inicial esteja a uma distância da linha poligonal superior a um limiar pré-definido.

2.6 Regularização geométrica dos contornos

O primeiro passo do processo de regularização geométrica consiste em determinar os cantos de edifício através da análise dos ângulos de deflexão nos vértices dos polígonos extraídos. Os vértices com ângulo de deflexão próximos de 90° são considerados vértices de edifícios. Este procedimento permite separar nos contornos vetorizados sub-listas de pixels que representam lados de edifícios. Com isso, é possível ajustar retas para cada lado aplicando-se o método de regressão linear nas sub-listas de pixels de cada lado. Os resultados são refinados através da eliminação de pontos mais distantes das retas determinadas por regressão através de métodos estatísticos e, após isso, ajusta-se novas retas aos pontos restantes.

Para as retas com coeficientes angulares próximos determina-se uma direção média através do cálculo de um coeficiente angular médio ($b_{médio}$). Posteriormente, ajustam-se novas retas com base nesse coeficiente médio, tornado-as perfeitamente paralelas entre si. Para os lados ortogonais à essa direção, calcula-se e fixa-se um coeficiente angular através da expressão $-1/b_{médio}$. A partir desse coeficiente, é possível ajustar novas retas perfeitamente ortogonais à primeira direção.

3 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise experimental da metodologia proposta foram utilizados dados de varredura a LASER de uma região urbana de Curitiba-PR.

3.1 Geração do MDS, MDT e MDSn

A Figura 2 apresenta resultados ilustrativos referentes à geração do MDS, MDT e MDSn para uma das amostras utilizadas no presente trabalho.

Para a geração do MDS, com resolução igual a 0,7 m, utilizou-se o interpolador vizinho mais próximo (Figura 2(a)) presente no *software* SURFER. Como

mostra esta figura, este interpolador produz um aspecto serrilhado no contorno do edifício. Por outro lado, possui a propriedade de preservar as discontinuidades, como as existentes ao longo de contornos de edifícios.

Posteriormente, a malha de pontos regulares (MDS) foi sobreposta na imagem de intensidade da região utilizando o aplicativo MicroStation. A imagem de intensidade auxiliou na coleta manual de pontos do terreno, os quais foram coletados principalmente ao longo das ruas. A Figura 2(b) mostra uma das amostras e os pontos do terreno coletados. Esses pontos foram então utilizados para a geração do MDT através do aplicativo SURFER, realizando a interpolação dos pontos pelo método de krigagem, também com resolução 0,7 m. A Figura 2(c) apresenta uma representação 3D do MDT gerado.

O MDSn foi gerado utilizando também o aplicativo SURFER, através da ferramenta “*math*” que calcula automaticamente a subtração do MDT do MDS desejado. A Figura 2(d) traz uma representação 3D do MDSn gerado.

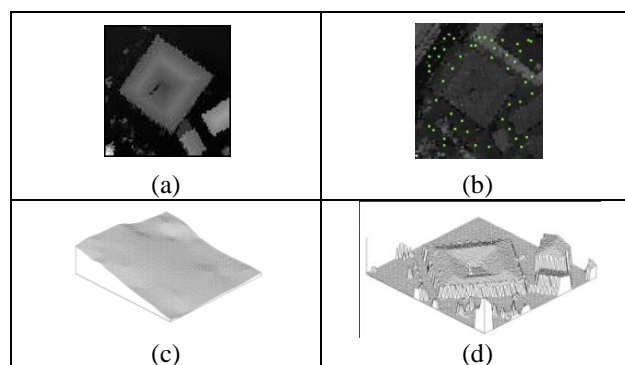


Figura 2 – Geração do MDS, MDT e MDSn.

3.2 Limiarização do MDSn

Nesta etapa os MDSns gerados passaram por um processo de limiarização simples para a geração da malha binária. Para isso, foi implementado um programa em linguagem C++, utilizando um limiar de 4 m, que seria a altura média de uma edificação. A Figura 3 apresenta os MDSns limiarizados. Pode-se notar que o resultado da limiarização apresenta ruídos, sendo que parte dos *groundels* detectados não está associada com edificações, mas sim com regiões de vegetação.

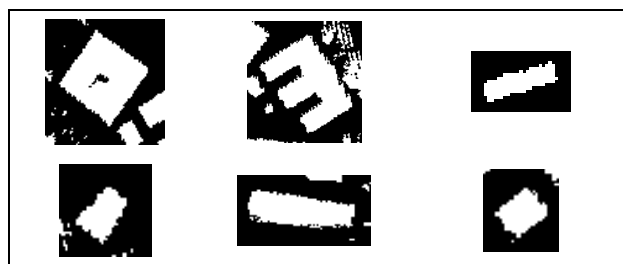


Figura 3 – MDSns Limiarizados.

3.3 Detecção de bordas

No processo de detecção de bordas, os contornos dos edifícios presentes na malha binária foram extraídos através das máscaras de diferenciação de Canny. Este processo foi realizado a partir da implementação de um algoritmo em linguagem C++. O resultado final é uma imagem binária das bordas. A Figura 4 apresenta as imagens das bordas detectadas.

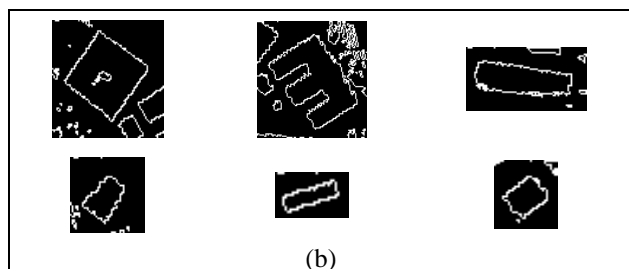


Figura 4 – Bordas detectadas pela diferenciação de Canny.

Observando a Figura 4 pode-se notar que as bordas geradas possuem espessura de 1 *groundel*. Assim, mesmo utilizando apenas as máscaras de diferenciação presentes no detector Canny não foi necessário realizar um processo de afinamento de bordas. Isto se deve aos tipos de descontinuidades presentes numa malha binária, que são do tipo degrau ideal.

3.4 Vetorização e poligonização

Os processos de vetorização e poligonização foram realizados no *software* HALCON. Desta forma, foi necessário transformar a malha binária que representa as bordas e está no referencial (E, N) do MDSn, em uma imagem binária cujo referencial é o de coluna e linha (C, L). Para isso foi desenvolvido um programa em linguagem C++, que implementa as operações geométricas elementares de reflexão, translação e escala.

A vetorização das bordas detectadas foi realizada utilizando um algoritmo seguidor de sequência linear de pixels disponível no *software* HALCON 7.1.

Em seguida, um método de poligonização foi aplicado usando o operador ‘gen_polygons_xld’, disponível no *software* HALCON 7.1, o qual realiza a aproximação dos contornos através de polígonos. No presente trabalho optou-se pelo algoritmo de divisão recursiva (JAIN et al., 1995), o qual aproxima os contornos de tal forma que a distância Euclidiana do polígono que se aproxima do contorno não seja maior que um limiar de aproximação, dado em pixels. O valor do limiar de aproximação adotado foi igual a 2 pixels. A Figura 5 apresenta a projeção dos polígonos na imagem aérea de alta-resolução.

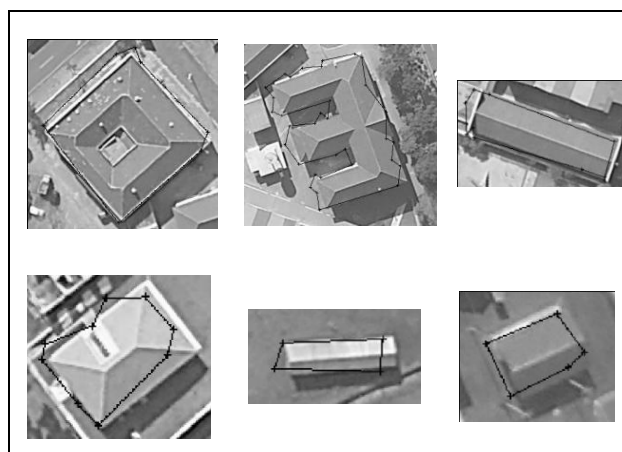


Figura 5 – Polígonos das bordas detectadas pela diferenciação de Canny.

3.5 Regularização dos contornos extraídos

Nessa etapa, primeiramente, cada lado do contorno foi separado através da ferramenta ‘split_countours_xld’ presente no *software* HALCON, que fornece como resultado uma lista com os pixels de cada lado separados. Após isso, aplicou-se todo o procedimento apresentado na seção 2.6 à essa lista, através de um algoritmo implementado em linguagem C++. A Figura 6 apresenta os contornos regularizados obtidos.

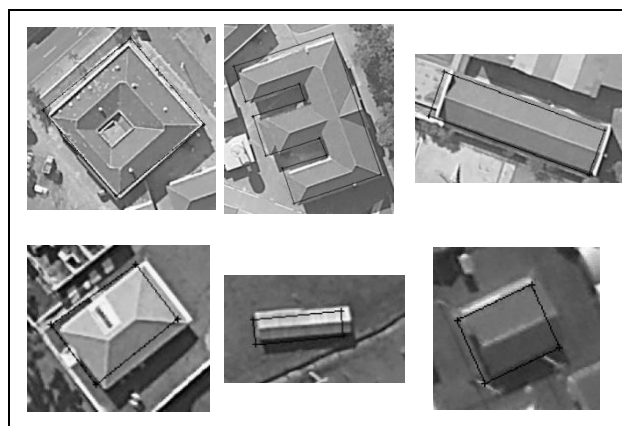


Figura 6 – Contornos regularizados.

Observa-se que há uma pequena diferença entre os polígonos representando as bordas e as bordas reais do edifício (Figura 6). Este fato pode estar relacionado ao fenômeno de ‘sombra’ dos dados LASER. Esse fenômeno é similar ao efeito de sombra causado pela luz do sol, por exemplo. Sendo assim, dependendo da direção do voo no processo de varredura a LASER, surgirão alguns espaços sem dados ao lado das bordas dos edifícios, pois o pulso LASER não consegue atingir tais espaços. Como se utilizou o método de interpolação vizinho mais próximo, os espaços sem dados receberam o valor das alturas dos edifícios, o que afetou na distinção das bordas desses edifícios e, conseqüentemente, na geração do polígono representando essas bordas.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia para a extração e regularização de polígonos representando contornos de edifícios.

Dada às características dos dados de entrada utilizados (dados de varredura a LASER), as descontinuidades não são densamente amostradas, ao contrário do que ocorre com os dados de imagem. Isso causou um deslocamento entre os contornos extraídos e as bordas originais dos edifícios. Contudo, verificou-se que a metodologia utilizada neste trabalho fornece resultados adequados, viabilizando sua utilização na extração de contornos de telhados de forma satisfatória. Mas conforme apontou o estudo experimental de Kaartinen et al. (2005), os contornos obtidos a partir de dados LASER necessitam ser melhorados através do uso de imagens aéreas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro através da bolsa de Iniciação Científica do primeiro autor e ao LACTEC pelo fornecimento dos dados de varredura a LASER.

REFERÊNCIAS

BOTELHO, F. M.; CENTENO, J. A. S. **Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados laser scanner aerotransportados.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 13, n. 1, p. 107-126, 2007.

CANNY, J. A. **Computational Approach to Edge Detection.** IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

DAL POZ, A. P. **Extração automática da malha viária rural a partir de imagens de média e alta resoluções.** Relatório de Pesquisa, Processo FAPESP nº. 2001/01168-5, 125p, 2002.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais.** 2000.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. **Machine Vision.** MIT Press and McGraw-Hill, New York, 1995, 549p.

KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; GÜLCH, E.; VOSSELMAN, G.; HYYPPÄ, H.; MATIKAINEN, L. et al. **Accuracy of 3D city models: EuroSDR comparison.** ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, The Netherlands, 2005.

ROTTENSTEINER, F.; TRINDER, J.; CLODE, S.; KUBIK, K. **Automated delineation of roof planes from LIDAR data.** In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 35, 2005.

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.