
EXTRAÇÃO DE CONTORNO 3D DE TELHADO DE EDIFÍCIO COM A INTEGRAÇÃO DE DADOS LIDAR E UMA IMAGEM AÉREA DE ALTA-RESOLUÇÃO

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ¹

ANTÔNIO JULIANO FAZAN²

MICHELLE SAYURI YANO³

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT

¹Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, SP

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

²Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT

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

RESUMO - Este artigo apresenta um método semiautomático para a extração tridimensional de telhados de edifícios, tendo por base a integração de uma imagem aérea de alta resolução e dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*). O método proposto é formulado como um problema de otimização, em que uma função de energia baseada na teoria de contorno ativo (*snakes*) é desenvolvida para modelar contornos de telhado em um sistema de coordenadas tridimensionais no espaço-objeto. Esta função de energia pode ser eficientemente resolvida usando o método de otimização por programação dinâmica, resultando em polígonos 3D que descrevem os contornos de telhado no espaço-objeto. Os resultados obtidos com dados reais possibilitaram concluir que o método proposto possibilita o eficiente delineamento 3D de contornos de telhados de edifícios.

ABSTRACT - This paper presents a semiautomatic method for rectilinear building roof boundary extraction, based on the integration of high-resolution aerial image and LiDAR (*Light Detection and Ranging*) data. The proposed method is formulated as an optimization problem, in which a snakes-based objective function is developed to represent the building roof boundaries in an object-space coordinate system. Three-dimensional polylines representing building roof boundaries are obtained by optimizing the objective function using the dynamic programming optimization technique. The results of our experiments showed that the proposed method satisfactorily performed the task of extracting different building roof boundaries from aerial image and LiDAR data.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas a disponibilidade de dados ópticos e não ópticos vem crescendo de forma significativa mas, entretanto, a interpretação e compilação desses dados ainda é dependente de operadores bem treinados. Por um lado, este procedimento está muito bem estabelecido por décadas e é bastante confiável e preciso, por outro lado, é bastante moroso e custoso. Naturalmente isto impacta a frequência dos ciclos de atualização das bases de dados de informações espaciais. Esta constatação vem impulsionando cada vez mais o desenvolvimento de novas técnicas para a eficiente interpretação e compilação automática e semiautomática de informação espacial a partir de dados ópticos e não ópticos, por parte de pesquisadores de várias áreas, incluindo os da área de Fotogrametria.

Várias representações de edifícios, desde as que focam um aspecto específico (por exemplo, o contorno ou estrutura de telhado) até as que focam o edifício como um todo, constituem informações espaciais de importância fundamental para o planejamento e a administração urbana. Os métodos existentes para a extração de edifícios a partir de dados ópticos e não ópticos, independente do aspecto a focar, é realizado a partir de imagens, de dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ou a partir de alguma combinação entre dados LiDAR e de imagem.

Os métodos baseados apenas em dados de imagens ópticas faziam inicialmente o uso de imagens aéreas digitalizadas e as primeiras propostas metodológicas vêm da década de 1980, a exemplo do método proposto em Fua e Hanson (1987). Mais recentemente vários métodos foram propostos usando imagem aérea ou de satélite (Müller e Zaum, 2005; Akçay e Aksoy, 2008; Ferraioli, 2010; Sırmaçek e Ünsalan, 2011; Fazan e Dal Poz, 2013; Fazan, 2014).

Os métodos de detecção ou extração de edifícios que usam dados LiDAR são bem mais recentes, podendo envolver a detecção de edifícios (Matikainen et al., 2003; Tóvari e Vögtle, 2004; Tarsha-Kurdi et al., 2006), a reconstrução de contornos de telhado (Sampath e Shan, 2007; Wei, 2008; Galvanin e Dal Poz, 2012) e a reconstrução de telhados de edifício (Rottensteiner et al., 2005; Sampath e Shan, 2010). Estes três tipos de métodos são normalmente empregados quando o objetivo é a reconstrução completa de edifício (Haala e Kada, 2010).

Os métodos para a extração de edifícios que se baseiam na combinação de dados LiDAR com imagens procuram tirar proveito da sinergia entre ambas as fontes de dados. Haala e Brenner (1999) combinaram, com o intuito de separar edificações de vegetação, uma imagem multiespectral com informações altimétricas obtidas a partir de dados LiDAR. Sohn e Dowman (2003) extraíram separadamente edificações em imagem Ikonos e em um MDS (Modelo Digital de Superfície) derivado de dados LiDAR, com posterior combinação de ambos os resultados de extração para remover inconsistências. Um método para a extração de edificação em 3D combinando dados LiDAR, planta baixa de edificações e imagens aéreas de alta resolução é encontrado em Vosselman (2002). Em Jaw e Cheng (2008) os contornos de edifícios eram primeiramente extraídos em dados LiDAR e posteriormente refinados usando uma imagem aérea. Kim e Habib (2009) propuseram um método para a geração de modelos tridimensionais de edificações complexas, tendo por base três etapas principais: 1) detecção de edifícios e extração de telhados a partir de dados LiDAR; 2) refinamento dos contornos dos telhados usando uma imagem aérea; e 3) geração das estruturas tridimensionais de edificações a partir dos telhados extraídos no passo 1 e refinados no passo 2. Cheng et al. (2011) propuseram um método para a extração tridimensional de edifícios, usando dados LiDAR e imagens aéreas em cobertura estéreo. Finalmente, Tian et al. (2014) utilizaram um par estereoscópico de imagens de satélite e um MDS para detectar mudanças em áreas edificadas. Gilani et al. (2015) combinaram imagens multiespectrais e dados LiDAR com base em análise de grafo e de componentes conexos.

Os métodos existentes para a extração de edifícios combinando dados LiDAR e de imagem normalmente realizam a extração separada de diversas feições de edifício em ambas as fontes de dados e depois as combinam para se obter um resultado mais completo. Nesse artigo é proposto um método não hierárquico para a extração de contornos de telhados integrando dados de imagem e LiDAR, via modelagem *snakes* em 3D. A diferença básica desse método em relação aos métodos existentes é a incorporação de relações matemáticas entre os espaços imagem e objeto, além de propriedades de edifício nos dados LiDAR e de imagem, numa única equação, denominada função de energia *snakes*. Os contornos de telhados são obtidos diretamente no espaço-objeto, via otimização por programação dinâmica (PD) da função de energia *snakes*. O restante deste artigo está organizado na forma que segue: a Seção 2 apresenta o método proposto; a Seção 3 apresenta e discute alguns exemplos práticos; a Seção 4 finaliza o artigo com as principais conclusões, obtidas a partir das evidências experimentais discutidas na Seção 3.

2 MODELAGEM SNAKES DE CONTORNO DE TELHADO NO ESPAÇO-OBJETO E PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO USANDO PD

A extração de contorno de telhado no espaço-objeto visa obter uma sequência fechada de segmentos de reta conectados em 3D (doravante denominada polígono 3D), tendo por base a otimização de uma função de energia que modela relações matemáticas entre os espaços -imagem e -objeto, incorporando também propriedades fotométricas e geométricas de contorno de telhado. O fundamento básico para construir essa função de energia vem da teoria de *snakes*. Inicialmente esta função de energia é estabelecida no espaço-imagem usando propriedades fotométricas e geométricas de contornos de telhado, sendo depois modificada para incorporar propriedades de telhado no espaço-objeto. Esta modificação requer o estabelecimento da relação matemática rigorosa entre pontos do espaço-objeto e seus correspondentes no espaço-imagem, implicando no conhecimento do modelo da câmera e dos correspondentes parâmetros de orientação exterior, estimados para o instante de obtenção da imagem, além dos parâmetros de orientação interior. Os polígonos 3D que representam contornos de telhado são obtidos por otimização da função de energia resultante usando o algoritmo de otimização por PD.

2.1 Função de energia

Fazan e Dal Poz (2013) propuseram um método baseado em snakes para a extração de contornos de telhados a partir de imagens aéreas. A suposição básica era que os telhados fossem retilíneos, com contornos delimitados por lados retos e que se interceptam em aproximadamente 90° em suas quinas. Dessa suposição resultou a seguinte função de energia:

$$E(v) = \sum_{i=2}^{n-1} \left[\alpha_i |v_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1}) - v_i(L_i, C_i)|^2 + \beta_i |v_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}) - 2v_i(L_i, C_i) + v_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1})|^2 \right. \\ \left. - \gamma_i |\nabla G(v_i(L_i, C_i))|^2 - \eta_i \left[(1 - \cos(\delta_i(L_i, C_i))) CS(v_i(L_i, C_i)) \right]^2 \right] \quad (1)$$

onde:

- $v_i(L_i, C_i)$ é o i -ésimo vértice (suas coordenadas imagem são L_i e C_i) do polígono (v) que representa um determinado contorno de telhado;
- os dois primeiros termos da somatória são conhecidos como termos de primeira e segunda ordem, respectivamente, e ambos definem a denominada energia interna da snakes; α_i e β_i são constantes positivas que controlam a importância relativa dos termos de primeira e segunda ordem, respectivamente;
- os dois últimos termos da somatória são os termos de energia de borda e de quina, respectivamente, e ambos compõem a parcela de energia externa para possibilitar a atração da snakes para o contorno de telhado selecionado; γ_i e η_i são constantes positivas que controlam as importâncias dos termos de borda e quina, respectivamente;
- $|\nabla G(v_i)|$ é a magnitude do gradiente da imagem no vértice v_i do contorno de telhado;
- $CS(v_i)$ é a resposta (valor extremo) de um operador de detecção de quina;
- δ_i é o ângulo de deflexão numa quina cuja localização é dada pelo vértice v_i .

Os valores de β_i , γ_i e η_i dependem do tipo de descontinuidade existente no vértice v_i : borda (normalmente do tipo degrau) ou quina. Quando num dado vértice existe uma quina ($\delta_i \sim 90^\circ$ para a maioria dos casos), neste vértice do polígono ocorre uma mudança abrupta de direção. Isto implica na necessidade de anular β_i para possibilitar a ocorrência de uma descontinuidade de segunda ordem no vértice v_i . Além disso, o termo de energia de borda (terceiro termo da equação 1) não tem nenhum poder de discriminação da descontinuidade de quina no vértice v_i , sendo então necessário fazer $\gamma_i = 0$. Por outro lado, quando no vértice v_i existe descontinuidade de borda, o termo de energia de quina (último termo na equação 1) não possui poder de discriminação. Neste caso, deve-se fazer $\eta_i = 0$. Por fim, o polígono v que melhor representa um dado contorno de telhado deve minimizar a função de energia $E(v)$.

A equação 1 mostra que a função de energia pode ser decomposta em sub-funções que dependem apenas de três pontos consecutivos ($(v_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), v_i(L_i, C_i), v_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1}))$) do polígono v . Sendo a i -ésima sub-função expressa na forma $E_i^{im}(v_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), v_i(L_i, C_i), v_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1}))$, pode-se expressar a equação 1 na seguinte forma geral:

$$E(v) = \sum_2^{n-1} E_i^{im}(v_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), v_i(L_i, C_i), v_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1})) \quad (2)$$

As variáveis da função de energia $E(v)$ são as coordenadas imagem (L_i, C_i) dos vértices que constituem o polígono v . A solução, denominado polígono ótimo, é o que minimiza a função de energia $E(v)$. Esta função pode ser modificada para que a mesma passe a depender de vértices em 3D de "polígonos 3D" no espaço-objeto. A princípio, basta usar uma função matemática do tipo $(L_i, C_i) = (f_1(X_i, Y_i, Z_i), f_2(X_i, Y_i, Z_i))$. Nesse caso, $V = [V_1(X_1, Y_1, Z_1), \dots, V_n(X_n, Y_n, Z_n)]$ é o polígono 3D no espaço-objeto homólogo ao polígono no espaço-imagem $v = [v_1(L_1, C_1), \dots, v_n(L_n, C_n)]$, sendo que os vértices $V_i(X_i, Y_i, Z_i)$ e $v_i(L_i, C_i)$ são matematicamente correspondentes. As equações (f_1, f_2) são bem conhecidas em Fotogrametria, compondo-se das equações de colinearidade e transformações no espaço-imagem (Wolf e Dewitt, 2000). Nesse contexto, deve-se ter os parâmetros de orientação interior e os parâmetros estimados de orientação exterior relativos ao instante de tomada da imagem. Se o sistema de coordenadas adotado para expressar o polígono 3D no espaço-objeto (V) não for o mesmo usado na estimativa dos parâmetros de orientação exterior, será necessário incorporar nas equações (f_1, f_2) os modelos matemáticos que transformam os pontos do sistema de coordenadas onde V será extraído para o sistema de coordenadas do espaço-objeto onde a imagem foi orientada. Considerando as equações (f_1, f_2) na função de energia dada na forma expressa na Equação 2, é imediato que a mesma pode ser reescrita como a soma de sub-funções (E_i^{ob}) dependentes apenas de três vértices consecutivos ($(V_{i-1}(X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}), V_i(X_i, Y_i, Z_i), V_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}))$):

$$E(V) = \sum_2^{n-1} E_i^{ob}(V_{i-1}(X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}), V_i(X_i, Y_i, Z_i), V_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1})) \quad (3)$$

A Equação 3 é ambígua porque é teoricamente possível selecionar um número ilimitado de polígonos 3D no espaço-objeto (V', V'', \dots) que resultam numa mesma imagem (v) no espaço-imagem. Distó decorre que $E(V') = E(V'') = \dots$. Consequentemente, a Equação 3 possui infinitas soluções. Propõe-se utilizar uma superfície poliédrica com faces triangulares, gerada a partir de uma nuvem de pontos na forma triangulada (TIN - *Triangulated Irregular Network*), para mitigar este problema de ambiguidade, forçando cada vértice do polígono 3D, candidato a representar um dado contorno de telhado, a pertencer a uma das faces do poliedro. Matematicamente pode-se impor que as coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) de um i -ésimo vértice V_i se relacionam na forma $Z_i = f(X_i, Y_i)$, onde f representa a equação do plano que representa a face do poliedro que contém V_i . Substituindo $Z_i = f(X_i, Y_i)$ na Equação 3, obtém-se uma equação como a mostrada na Equação 4 (notar que é uma soma de sub-funções $E_i^{ob'}$), a qual não é ambígua e não explicitamente dependente das coordenadas Z_i . Assim, o problema passa a ser o de encontrar um polígono 3D cujos vértices $(X_i, Y_i, f(X_i, Y_i))$ estão contidos em faces do poliedro e que minimiza a Equação 4.

$$E(V) = \sum_2^{n-1} E_i^{ob'}(V_{i-1}(X_{i-1}, Y_{i-1}), V_i(X_i, Y_i), V_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1})) \quad (4)$$

2.2 Otimização da função de energia por PD

O procedimento de otimização tem por base a ideia de que um determinado polígono 3D inicial, que descreve aproximadamente um dado contorno de telhado no espaço-objeto, desliza sobre o telhado do edifício controlado por forças externas (de quina e borda) da *snakes*, ao mesmo tempo que as forças internas da *snakes* (associadas com os termos de primeira e segunda ordem) permitem ao polígono 3D (V) delinear precisamente o contorno do telhado. O processo de otimização para encontrar o polígono 3D que minimiza a função de energia (Equação 4) é realizado segundo as seguintes etapas principais:

- 1) Determinação dos polígonos 3D iniciais de telhado: O processo de extração de contornos 3D de telhados de edifício é aplicado isoladamente em cada telhado. Isso implica na necessidade de isolar cada edifício na nuvem de pontos LiDAR, via isolamento de pontos de cada telhado. A partir desses pontos é obtido o polígono 3D inicial (V^0 , conforme ilustra a Figura 1) que delimita um segmento de superfície poliédrica representando o telhado do edifício em análise. Foram utilizadas as ferramentas (Axelsson, 1999) de filtragem (que permite a separação de pontos pertencentes a objetos elevados) e classificação (que permite o isolamento de pontos da classe telhado) de dados LiDAR disponíveis no *software* LASTools para isolar regiões contendo pontos de telhado e então gerar segmentos poliédricos que representam telhados. Os correspondentes polígonos 3D iniciais foram também determinados automaticamente no LASTools. Os vértices de quina dos polígonos 3D iniciais foram identificados visualmente, sendo este o aspecto que caracteriza o procedimento de determinação de polígonos 3D iniciais como semiautomático.

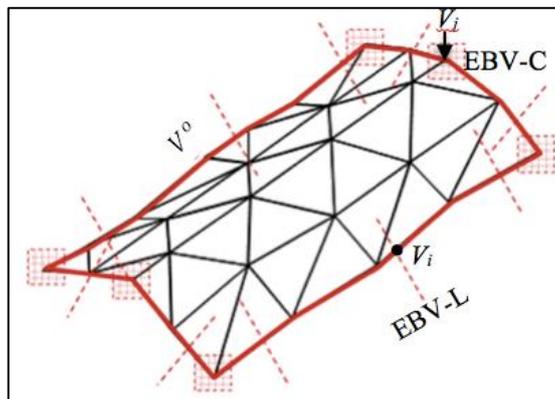


Figura 1 – Espaços de busca de vértices de lado e quina.

- 2) Construção do espaço de busca do processo de otimização por PD: O espaço de busca é constituído de um número finito de polígonos 3D candidatos a representar um dado contorno de telhado. O processo é iterativo e a cada iteração o espaço de busca é estabelecido, sempre tendo por referência o melhor polígono 3D obtido na iteração anterior. No início do processo de extração do contorno de um telhado selecionado, o polígono 3D de referência é V^0 . Tendo por base o melhor polígono 3D disponível, são estabelecidos dois tipos de janelas locais de busca: 1) janelas regulares de pontos amostrados e ao longo de linhas poligonais transversais a V^0 , tomadas em pontos (por exemplo, V_i , Figura 1) de lado de contorno de telhado, que se estendem sobre o telhado e no prolongamento dele, cuja extensão depende da incerteza de localização dos lados de contorno de telhado; estas janelas são denominadas *espaço de busca de vértice de lados* - EBV-L (Figura 1); 2) janelas regulares de pontos amostrados sobre superfícies que se ajustam em regiões de telhado vizinhas às quinas (como em V_j , Figura 1) e que seguem localmente o prolongamento do telhado, em conformidade com a incerteza de localização das quinas; estas janelas são denominadas *espaço de busca de vértice de quina* – EBV-C (Figura 1). A dimensão do espaço de busca em termos do número de polígonos 3D candidatos pode ser determinada. Por simplicidade, supor que as EBV-L e EBV-C possuem, cada um, o mesmo número de vértices candidatos. Seja então n o número de vértices candidatos em cada EBV-L ou EBV-C. Se k for o número de vértices em V^0 , o número de polígonos 3D candidatos no espaço de busca será n^k .
- 3) Otimização da função de energia (Equação 4) usando PD: A função de energia dada pela Equação 4 mostra que apenas seis variáveis estão inter-relacionadas simultaneamente. Nesse caso o algoritmo de PD é apropriado para encontrar o polígono 3D ótimo, visto que a suposição básica deste algoritmo é exatamente que poucas variáveis da função de energia devam estar inter-relacionadas simultaneamente. Detalhes sobre este algoritmo de otimização podem ser encontrados em Ballard e Brown (1982).
- 4) Refinamento iterativo: A princípio, parece que simplesmente usar os vértices de quina resolveriam o problema colocado, visto que os lados de telhado são assumidos como retos. Entretanto, o suporte para a caracterização de uma quina depende de apenas um ponto. Outro problema é como caracterizar de forma robusta a descontinuidade

de quina, de forma a evitar a ocorrência de inúmeros falsos positivos, as vezes com resposta superior as quinas corretas. Soma se a isso a possibilidade de ocorrência de falsos negativos. Ao contrário, ao longo de lados de telhado pode-se semear vários pontos, provendo dessa forma um grande suporte. Além disso, pequenas anomalias existentes ao longo dos lados de telhado podem ser controlados forçando que os correspondentes segmentos do polígono 3D sejam retos. Essa restrição é imposta na função de energia atribuindo alto valor para o peso do termo de energia de primeira ordem. Isso significa que falsas quinas poderão ser indiretamente penalizadas, diminuindo a chance de aceitação de um vértice não significativo. Portanto, um processo de adensamento progressivo da poligonal 3D, obtida na iteração anterior, é recomendável para garantir precisão e confiabilidade na definição das quinas. O procedimento iterativo, consistindo na repetição sucessiva dos dois últimos procedimentos (etapas 2 e 3), é repetido até que haja a estabilização do i -ésimo polígono 3D ótimo (V^i). Isso pode ser verificado fazendo $\|V^i - V^{i-1}\| < L$, onde L é um limiar pré-estabelecido.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de exemplificar o funcionamento do método proposto, seis exemplos são apresentados e discutidos abaixo (Figura 2). O resultado obtido para cada edifício é um polígono 3D ótimo, que posteriormente foi projetado na imagem de entrada com o objetivo de visualização do resultado obtido. A imagem¹ de entrada possui GSD de aproximadamente 0,2 m, sendo portanto de alta resolução. Os parâmetros de orientação interior e exterior dessa imagem estavam disponíveis. Os dados LiDAR² utilizados são de baixa densidade (aproximadamente 2 pts./m²). Esses dados referem-se a uma área teste localizada em Curitiba-Pr.

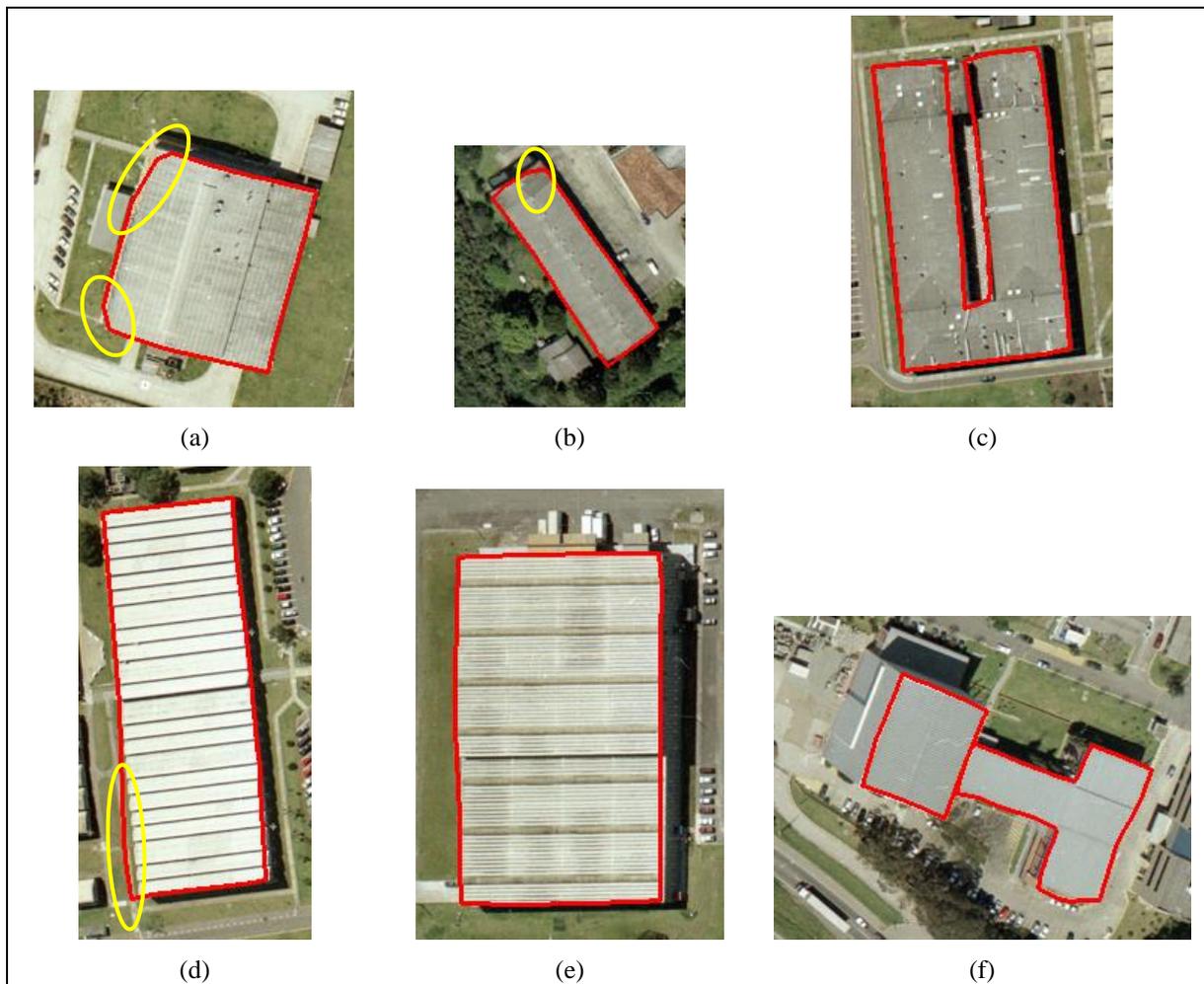


Figure 2 – Contornos extraídos em 3D e sobrepostos na imagem.

¹Imagem cedida pelo Prof. Edson A. Mitishita – UFPr

²Dados LiDAR cedidos pela LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Curitiba-Pr

Os resultados apresentados na Figura 2 mostra que os pontos de borda e quina, que são bem definidos na imagem, permitiram em boa parte dos casos um bom delineamento do polígono 3D que modela o contorno de cada telhado. Isso pode ser inferido pela boa coincidência dos contornos projetados na imagem com os contornos dos telhados. Entretanto, algumas exceções ocorreram com os edifícios mostrados nas Figuras 2(a, b, d). Nos casos destacados nas Figuras 2(a,b) alguns dos vértices não foram bem delineados, o que possivelmente resultou da falha em detectar os vértices corretos na imagem. Esse problema poderia ter sido minimizado aumentando a amostragem de pontos de lado de telhado na região vizinha às quinas. Ambos exemplos também mostram que o uso de quina nem sempre é confiável, podendo gerar resultados não satisfatórios. Já a falha verificada na Figura 2(d) pode ter ocorrido em função da detecção de uma falsa quina com alta resposta do operador de quina. Para os outros casos (Figuras 2(c, e, f)) os resultados da extração sobrepostos na imagem indicam um desempenho satisfatório do método. Os polígonos 3D extraídos pelo método proposto foram numericamente comparados com correspondentes polígonos 3D extraídos por restituição fotogramétrica usando o sistema fotogramétrico LPS (*Leica Photogrammetry Suite*). O RMSE (*root mean square error*) foi calculado para todos edifícios, obtendo-se os seguintes valores mínimo, máximo e médio, respectivamente: 0,623 m, 1,702 m e 0,987 m. Como esperado, o maior RMSE foi obtido para o edifício mostrado na Figura 2(a), visto que as maiores falhas ocorreram neste exemplo. Apesar de ter apresentado uma pequena falha de extração num de seus vértices, o menor RMSE foi obtido para o exemplo da Figura 2(b).

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo apresentou um método semiautomático para a extração de contornos 3D de telhados retilíneos de edifícios, a partir de dados LiDAR e de imagens aéreas de alta-resolução. O método proposto foi formulado como um problema de otimização, em que a função de energia foi desenvolvida com base na teoria de *snakes* para representar contornos de telhados de edifícios num sistema de coordenadas 3D do espaço-objeto. Polígonos 3D representando contornos de telhado de edifício foram obtidos via otimização da função de energia usando o algoritmo de otimização por PD. Esta técnica de otimização é adequada visto que a função de energia pode ser decomposta em sub-funções dependentes de apenas três pontos sucessivos de cada polígono 3D candidato ao polígono 3D ótimo.

Alguns testes com dados reais foram apresentados e analisados, mostrando que o método proposto é promissor na tarefa de extração de contornos 3D de telhado via integração não hierárquica de dados LiDAR e de imagem. Uma importante direção para trabalho futuro é a modelagem de contexto relacionado com vários tipos de obstrução que afetam edificações, como as provenientes de obstrução perspectiva, vegetação e sombra.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – Processo no. 306842/2013-0 e FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) – Processo no. 2013/13138-0.

REFERÊNCIAS

- AKÇAY, H. G.; AKSOY, S. Automatic detection of geospatial objects using multiple hierarchical segmentations. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 46, n. 7, p. 2097–2111, 2008.
- AXELSSON, P. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing**, v. 54, p. 138-147, 1999.
- BALLARD, D. H., BROWN, C. M. **Computer Vision**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- CHENG, L.; GONG, J.; LI, M.; LIU, Y. 3D Building model reconstruction from multi-view aerial imagery and LiDAR data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 77, n. 2, p. 125-138, 2011.
- GALVANIN, E. A. S; DAL POZ, A. P. Extraction of building roof contours from LiDAR data using a markov-random-field-based approach. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 50, p. 981-987, 2012.
- GILANI, S. A. N.; AWRANGJEB, M.; LU, G. Fusion of LiDAR data and multispectral imagery for effective building detection based on graph and connected component analysis. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, p. 65-72, 2015.
- FAZAN, A. J., DAL POZ, A. P. Rectilinear building roof contour extraction based on snakes and dynamic programming. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 1 - 10, 2013.

- FAZAN, A. J. **Extração de contornos de telhados de edifícios no espaço-objeto baseada em snakes e programação dinâmica a partir de TIN/LASER e imagens aéreas de alta resolução.** Tese (doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014.
- FERRAIOLI, G. Multichannel InSAR Building Edge Detection. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, p. 1224–1231, 2010.
- FUA, P.; HANSON, A. J. Resegmentation Using Generic Shape: Locating General Cultural Objects. **Pattern Recognition Letters**, v. 5, p. 243-252, 1987.
- HAALA, N.; BRENNER, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 130-137, 1999.
- HAALA, N.; KADA, M. An Update on Automatic 3D Building Reconstruction. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 570–580, 2010.
- JAW, J. J.; CHENG, C. C. Building roof reconstruction by fusing laser range data and aerial images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2008.
- KIM, C.; HABIB, A. Object-Based Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Automated Generation of Complex Polyhedral Building Models, **Sensor**, v. 9, p. 5679-5701, 2009.
- MATIKAINEN, L.; HYYPPÄ, J., AND HYYPPÄ, H. Automatic Detection of Buildings from Laser Scanner Data for Map Updating. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2003.
- MÜLLER, D, S.; ZAUM, W. Robust building detection in aerial images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2005.
- ROTTENSTEINER, F.; TRINDER, J.; CLODE, S.; KUBIK, K. Automated Delineation of Roof Planes from LiDAR Data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2005.
- SAMPATH, A.; SHAN, J. Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne LiDAR Point Clouds. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 73, n. 7, p. 805–812, 2007.
- SAMPATH, A.. SHAN, J. Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs from Aerial LiDAR Point Clouds. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, p. 1554–1567, 2010.
- SIRMAÇEK, B.; ÜNSALAN, C. A. Probabilistic Framework to Detect Buildings in Aerial and Satellite Images. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p. 211-221, 2011.
- SOHN, G.; DOWMAN, I. J. Building extraction using LiDAR DEMs and Ikonos images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2003.
- TARSHA-KURDI, F.; LANDES, T.; GRUSSENMEYER, P.; SMIGIEL, E. New Approach for Automatic Detection of Buildings in Airborne Laser Scanner Data Using First Echo Only. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2006.
- TIAN, J.; CUI, S.; REINARTZ, P. Building Change Detection Based on Satellite Stereo Imagery and Digital Surface Models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 406-417, 2014.
- TÓVARI, D.; VÖGTLE, T. Object Classification in Laserscanning Data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2004.
- VOSELNAN, G. Fusion of laser scanning data, maps, and aerial photographs for building reconstruction. **IEEE International Symposium on Geosciences and Remote Sensing**, 2002.
- WEI, S. Building Boundary Extraction Based on LiDAR Point Clouds Data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2008.

WOLF, P.; DEWITT, B. **Elements of photogrammetry – with applications in GIS**. 3rd Ed., Mc Graw Hill, 2000.