

AVALIAÇÃO DA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE EDIFICAÇÕES A PARTIR DE DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO

Evaluation of automatic building extraction from airborne LIDAR data

André Caceres Carrilho¹

carrilho.acc@gmail.com

Maurício Galo^{1,2}

mauricio.galo@unesp.br

Renato César dos Santos¹

renato_cstos@hotmail.com

Guilherme Gomes Pessoa¹

guilhermegpessoa@hotmail.com

Faculdade de Ciências e Tecnologia/ Universidade Estadual Paulista (FCT/UNESP)

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

² Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305 – Centro Educacional, Presidente Prudente/SP

Resumo: O processo de criação e atualização de bases cartográficas é caro e demorado por conta da necessidade da extração das informações a partir de levantamentos em campo, ou manualmente, a partir de vetorização de ortoimagens ou restituição de imagens aéreas. Alternativamente existem métodos automáticos para a detecção de edificações a partir de dados remotos, como imagens aéreas e dados obtidos por sistema LiDAR aerotransportado. Este trabalho busca propor e avaliar a qualidade da extração automática de contornos de telhados de edificações a partir de dados LiDAR aerotransportado utilizando algumas ferramentas do *software LAsTools*. Na etapa de avaliação foram utilizadas métricas que permitiram quantificar os erros cometidos a partir da comparação com referências geradas manualmente (restituição fotogramétrica). As análises indicaram que embora coerentes, os resultados podem não atender às demandas necessárias para algumas aplicações que requerem alta acurácia, como a validação da área construída enunciada em transações imobiliárias, por exemplo, cuja tolerância é estabelecida por lei.

Palavras-chave: Extração automática de edificações; Dados LIDAR aerotransportado; Cadastro Territorial Multifinalitário Urbano.

Abstract: The process of creating and updating cartographic databases is expensive and time consuming due to the need to extract information from field surveys, or manually from orthoimage vectorization or aerial image restitution. Alternatively, there are automatic methods for building detection from remote data, such as aerial images and airborne LiDAR data. This work proposes and evaluates the automatic extraction of building roof contours from airborne LiDAR data using LAsTools software suite. In the evaluation step, several metrics were used to quantify the errors from the results in comparison with manually generated references (aerial image restitution). The analysis of the results indicated that although consistent, the results may not meet some requirements expected in some applications that require high accuracy, such as the validation of the constructed area enunciated in real estate transactions, for instance, whose tolerance is established by law.

Keywords: Automatic building extraction; airborne LiDAR data; Multipurpose Urban Territorial Cadastre.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e social, juntamente com as ações naturais provocam alterações na cobertura terrestre, o que torna necessária a atualização da base cartográfica que a representa. Países emergentes apresentam mudanças significativas em seus centros urbanos, consequentes desses desenvolvimentos, as quais consistem principalmente da ampliação/modificação da malha viária, e ações como construção, reformas ou demolição de edificações.

A existência de uma base cartográfica atualizada é importante para uma série de tarefas, tais como o planejamento urbano, tributação, monitoramento do crescimento e avaliações de desastres naturais. Entretanto, o processo de criação e/ou atualização de bases cartográficas é oneroso e moroso, por conta da necessidade da extração das informações, que pode ser realizada de forma manual (seja por vetorização ou restituição, no caso da Fotogrametria) ou semi-automática/automática, desde que os sistemas computacionais forneçam esta alternativa, além da coleta a partir de métodos Geodésicos. A manutenção dessas bases cartográficas pode ser favorecida com o uso de métodos automáticos para a detecção de edificações, desde que sejam confiáveis (HERMOSILLA et al., 2011). Encontram-se na literatura diversas abordagens para a extração de edificações em regiões urbanas. Inicialmente foram propostos métodos baseados em imagens aéreas. Com o desenvolvimento tecnológico surgiram métodos que utilizam apenas nuvens de pontos LiDAR obtidos por sistemas aerotransportados (denominados aqui como dados LiDAR), como pode-se ver em Mass e Vosselman (1999), Kwak e Habib (2014), Awrangjeb et al. (2014) e Carrilho e Galo (2018), sendo que nas últimas décadas a comunidade científica tem estudado a utilização conjunta desses dados.

De acordo com Gonzáles-Aguilera et al. (2013), a utilização apenas de imagens aéreas pode ser insuficiente, uma vez que a presença de oclusões e sombras acabam interferindo na acurácia dos métodos que as utilizam. Por outro lado, é relevante destacar as vantagens dos dados LiDAR aerotransportados com relação à modelos digitais de superfície (MDS) obtidos por correspondência de imagens, sendo elas: melhor delineamento das faces planas em telhados complexos e a obtenção de maior acurácia na extração de métricas que envolvem altitude, como por exemplo o volume da edificação (GONZÁLES-AGUILERA et al., 2013). Um problema decorrente do processo de amostragem surge durante a extração de bordas de objetos a partir de dados LiDAR. Os contornos extraídos não possuem a mesma qualidade daqueles obtidos a partir das imagens aéreas, uma vez que estas permitem a extração dos contornos planimétricos dos objetos com maior nível de detalhe comparado aos dados LiDAR, salvo as possíveis diferenças em escala/resolução e densidade de pontos entre os produtos.

A comunidade científica toma como complementares as duas fontes de dados, cada qual com suas vantagens e desvantagens, assim como as mencionadas anteriormente. Métodos que fazem a utilização conjunta, como o proposto por Oliveira (2016), Gonçalves e Mitishita (2016) e Yousefhusien et al. (2018), por exemplo, procuram explorar a potencialidade de cada conjunto de dados, isto é, imagens aéreas para delineamento bidimensional dos objetos e dados LiDAR para extrair a informação altimétrica. O problema dessas abordagens acaba tendo cunho prático, uma vez que a obtenção desses dois conjuntos de dados pode encarecer os projetos, o que torna inviável a sua aplicação para uma parcela dos potenciais interessados, como por exemplo para pequenos municípios de países emergentes.

Com base no que foi exposto, este trabalho busca propor e avaliar a extração automática de contornos de telhados de edificações a partir de dados LiDAR aerotransportado utilizando algumas ferramentas do *software LAStools*, seguida da avaliação da qualidade dos contornos extraídos, tendo como foco a obtenção de informação cadastral em área urbana.

2. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTORNOS DE TELHADOS DE EDIFICAÇÕES

O método proposto, sintetizado na Figura 1, consiste na aplicação sequencial de quatro ferramentas do *software LAStools*. A primeira etapa resume-se à filtragem da nuvem de pontos, isto é, a classificação binária entre pontos de terreno e pontos de objetos (edificações, vegetação, entre outros). O método de filtragem empregado pela ferramenta *lasground* é baseado na densificação progressiva da malha triangular irregular (*Triangular Irregular Network - TIN*) proposta por Axelsson (2000). A segunda etapa consiste na determinação das alturas dos pontos de objeto em relação ao terreno, informação que é útil para os passos subsequentes. Este cálculo é realizado com a ferramenta *lasheight* a partir do TIN gerado na etapa anterior. Na terceira etapa do método proposto, os pontos de objeto são classificados entre vegetação e edificações com a ferramenta *lasclassify*. Por fim, os contornos das edificações são extraídos com a ferramenta *lasboundary*, onde encontra-se implementado uma variante do algoritmo α -shape (EDELSBRUNNER et al., 1983).

Todas as ferramentas foram utilizadas com os parâmetros padrão, com exceção do *lasground* em que foi selecionada a opção “city”, por tratar-se de regiões urbanas, e do *lasboundary* com as opções “concavity 1” e “disjoint”. O parâmetro “concavity 1” está relacionado ao nível de detalhe do contorno obtido pelo algoritmo, sendo eles inversamente proporcionais entre si, isto é, quanto menor o valor, maior o nível de detalhe.

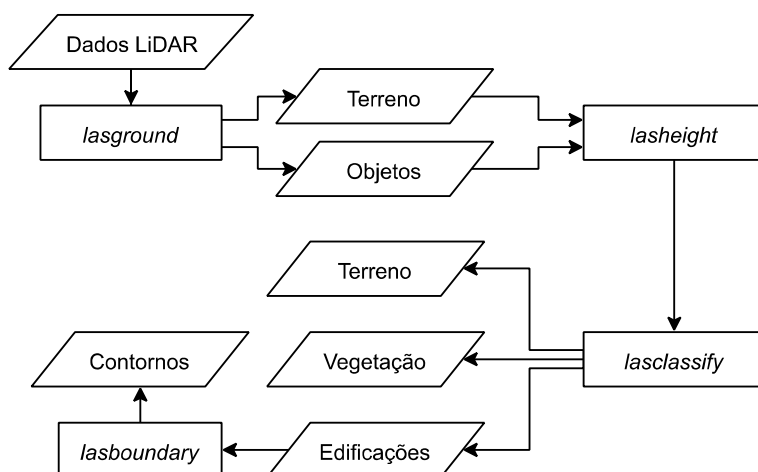


Figura 1 – Método proposto para a extração de contornos de telhados de edificações.

3. MATERIAIS

De acordo com Cramer (2010), os dados LiDAR obtidos por sistema aerotransportados da cidade de Vaihingen - Alemanha, foram fornecidos pela Sociedade Alemã de Fotogrametria,

Sensoriamento Remoto e Geoinformação (*Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation - DGPF*), e disponibilizados pela Comissão 3 - Grupo de Trabalho 4 da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS*). A aquisição dos dados foi realizada em 21 de agosto de 2008 pela *Leica Geosystems*, utilizando o sistema ALS50 com um campo de visão de 45°. O voo foi realizado a uma altura média de 500 m, resultando em uma densidade média de 6,7 pontos/m². Esta densidade média considera as regiões de sobreposição de 30% entre as cinco faixas fornecidas, entretanto, a densidade nas áreas recobertas por apenas uma faixa é da ordem de 4 pontos/m².

Com o objetivo de possibilitar a avaliação quantitativa dos métodos de extração de informação automática a partir destes dados, foram fornecidas também as referências para a classificação da nuvem de pontos, bem como os contornos dos objetos restituídos manualmente para três regiões testes (Figura 2). A região 1 consiste de uma porção da região central da cidade, e é caracterizada por edificações históricas e com geometria relativamente complexa. As regiões 2 e 3 contêm edificações residenciais e uma maior presença de árvores, sendo que as construções na região 2 são mais altas e aglomeradas.

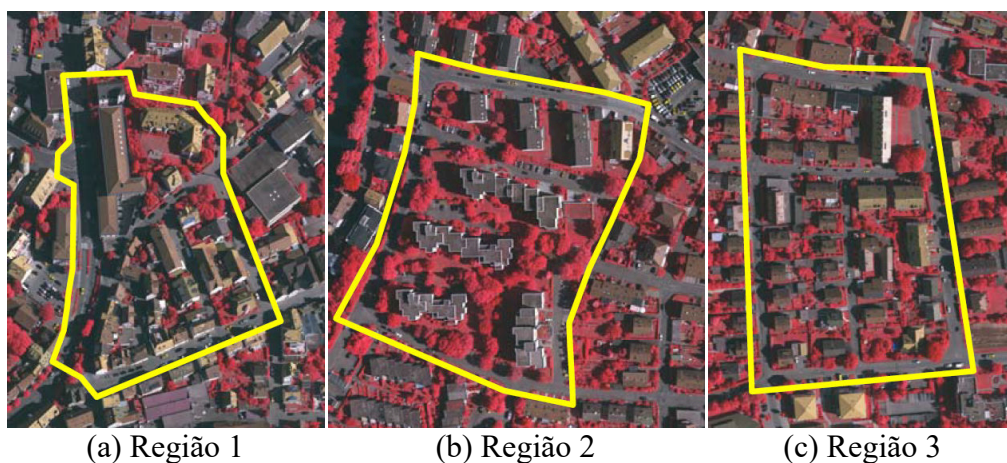


Figura 2 – Composição falsa-cor para as três regiões urbanas selecionadas.

Fonte: Adaptado de Rottensteiner et al. (2013).

Os processamentos das etapas do método proposto foram realizados com o *software LAStools* versão 160329, enquanto que algumas ferramentas para a análise quantitativa e qualitativa foram implementadas em linguagem de programação C++ no ambiente *Code::Blocks* versão 17.12. Foram utilizados também o *CloudCompare* versão 2.10-alpha e o *QGIS* versão 3.0.2 para algumas operações e visualização dos arquivos contendo os contornos de telhados extraídos.

3.1. Métricas para análise quantitativa

De acordo com Richards (2013) a validação de qualquer método automático de processamento de dados requer uma quantificação da conformidade dos resultados em relação aos dados de referência. Assim como observado em Carrilho et al. (2017), existem na literatura diferentes abordagens utilizadas para estimar a qualidade dos resultados, sendo que no geral os

autores adotam elementos derivados da matriz de erro, também denominada matriz de confusão, tais como verdadeiro/falso positivo/negativo, como mostrado na Figura 3.

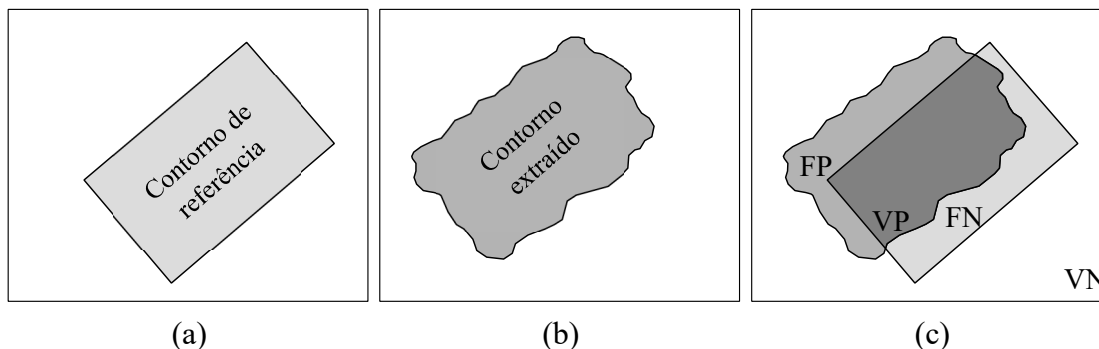


Figura 3 - Elementos do controle de qualidade derivados da matriz de erro. Em (a) é mostrado o contorno de referência, em (b) o contorno extraído e em (c): verdadeiro positivo (VP); verdadeiro negativo (VN); falso positivo (FP); e falso negativo (FN).

Fonte: Adaptado de Buján et al. (2012).

Na área de reconhecimento de padrões é comum a utilização das métricas precisão (p) e revocação ($recall$) (r) para avaliar tanto problemas de classificação quanto de regressão (BISHOP, 1995). Na literatura, também são muito utilizados os termos completeza (C) e nível de acerto (NA) como sinônimos para estes valores, respectivamente, os quais podem ser estimados a partir de VP, FP e FN, podendo ser obtidos por:

$$C = \frac{VP}{VP+FP} \quad (1)$$

$$NA = \frac{VP}{VP+FN} \quad (2)$$

Além disso, Sokolova et al. (2006) adotam um valor único, conhecido por F -score, calculado como a média harmônica da completeza e nível de acerto, o qual é particularmente útil uma vez que leva em conta as três quantidades (VP, FP, e FN), conforme segue.

$$F - score = \frac{2VP}{2VP+FP+FN} \quad (3)$$

No contexto de comparação de polígonos, além das métricas apresentadas, existem outras que podem ser consideradas, como a distância de Hausdorff e de Chamfer, por exemplo. Alternativamente, Avbelj et al. (2015) propuseram a métrica *Polygons and Line Segments* (PoLiS) a qual é simples e robusta, tendo sido idealizada para a realização de análises quantitativas de similaridade entre polígonos. Dados os pontos pertencentes ao contorno de dois polígonos (A e B), a métrica PoLiS pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$p(A, B) = \frac{1}{2q} \sum_{a_j \in A} \min_{b \in \partial B} \|a_j - b\| + \frac{1}{2r} \sum_{b_k \in B} \min_{a \in \partial A} \|b_k - a\| \quad (4)$$

sendo q e r o número de vértices dos polígonos A e B , respectivamente; ∂A e ∂B correspondem aos polígonos A e B , e $\|a - b\|$ é a distância Euclidiana entre dois pontos a e b .

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Inicialmente os cinco arquivos *LAS* referente às cinco faixas do voo foram agrupadas em um único arquivo utilizando a ferramenta *lasmerge*. Por ser um passo que pode ser necessário ou não, dependendo de como o conjunto de dados original foi disponibilizado, este procedimento não foi incluído no fluxograma do método proposto (Figura 1). A nuvem de pontos completa foi processada com o método proposto, e os resultados estão apresentados na Figura 4.

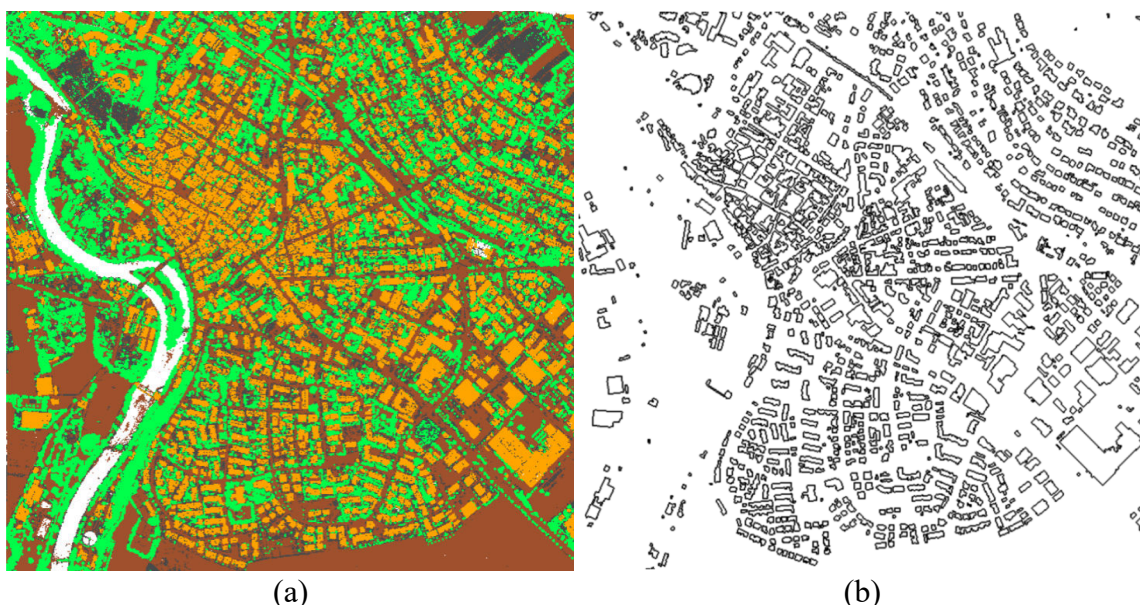


Figura 4 – Resultado da classificação (a) e os contornos dos telhados extraídos (b).
Legenda da classificação: Terreno (●), Vegetação (●), Edificações (●), e Não classificado (●).

Para a avaliação quantitativa dos resultados, foram selecionadas duas edificações (A e B) de cada uma das três regiões mostradas na Figura 2. Para essas edificações foram calculadas as métricas baseadas na matriz de erro, e a métrica PoLiS, como apresentado na Tabela 1. É importante salientar que as métricas são intrinsicamente diferentes, isto é, algumas são relacionadas à área (completeza, nível de acerto e *F-score*), enquanto que a métrica PoLiS baseia-se em distâncias planas.

Apesar das diferenças mencionadas, é possível notar na Figura 5 uma relação inversamente proporcional entre as métricas nível de acerto (consequentemente *F-score*) e PoLiS. Este é um resultado esperado, uma vez que quanto mais próximo o resultado estiver da referência a distância entre os polígonos tende a diminuir enquanto o *F-score* tende a aumentar.

A partir de uma análise visual da Figura 6, observa-se que os resultados obtidos pelo método são afetados na medida que tem-se aumento da complexidade da cena e também quando há vegetação próxima aos telhados, causando oclusões ou ambiguidades na classificação. Outros fatores, relacionados à complexidade geométrica dos telhados das edificações, também afetam os

resultados. Como exemplo pode-se destacar: telhados com janelas de trapeira, como na edificação A da região 1; a presença de garagem ou saguão em uma altitude mais baixa com relação ao restante da edificação, como nas edificações B (da região 1) e B (da região 2); e existência de jardim de inverno com cobertura transparente, como na edificação B (da região 3).

Tabela 1 – Avaliação quantitativa dos contornos extraídos para as edificações selecionadas.

Região	Edificação	Completeza (%)	Nív. Acerto (%)	F-score (%)	PoLiS (m)
1	A	99,4	82,8	90,4	0,978
	B	97,5	84,5	90,5	0,690
2	A	99,5	92,2	95,7	0,424
	B	99,1	82,3	89,9	0,868
3	A	99,6	89,8	94,5	0,360
	B	97,9	84,9	90,9	0,675
Média		98,8	86,1	92,0	0,667

Apesar de úteis, as métricas utilizadas podem ser de difícil interpretação (ou de interpretação um pouco abstrata). Por isso, optou-se por incrementar a análise ao quantificar o erro cometido em termos de área construída (Tabela 2), comparando o polígono extraído pelo método proposto e o de referência. O valor da diferença relativa foi calculado como a razão entre o valor absoluto da diferença entre a área do polígono extraído e o de referência, e a área do polígono de referência. Uma abordagem similar é encontrada em Galvanin e Dal Poz (2012), na qual os autores efetuaram a razão com a área do polígono extraído ao invés do de referência.

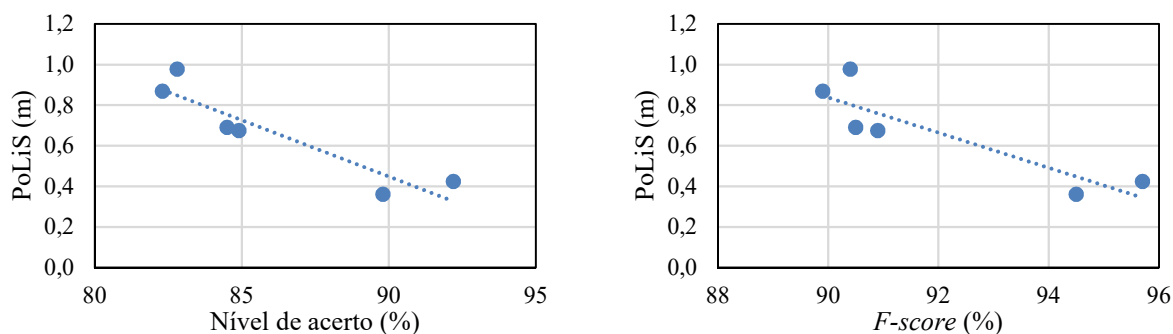


Figura 5 – Avaliação de correlação entre algumas métricas para as 6 edificações observadas.

A análise visual da Figura 6 permite observar que a área de falsos negativos foi maior que a de falsos positivos em todas as situações, isto é, o método deixou de extrair parte do contorno do telhado. O mesmo pode ser verificado nos valores de área apresentados na Tabela 2, uma vez que todos os polígonos extraídos têm área menor do que os de referência. Os maiores valores de diferença na área referem-se justamente às edificações que apresentam uma maior complexidade em seus telhados, bem como a presença de vegetação próxima ou sobre os telhados.

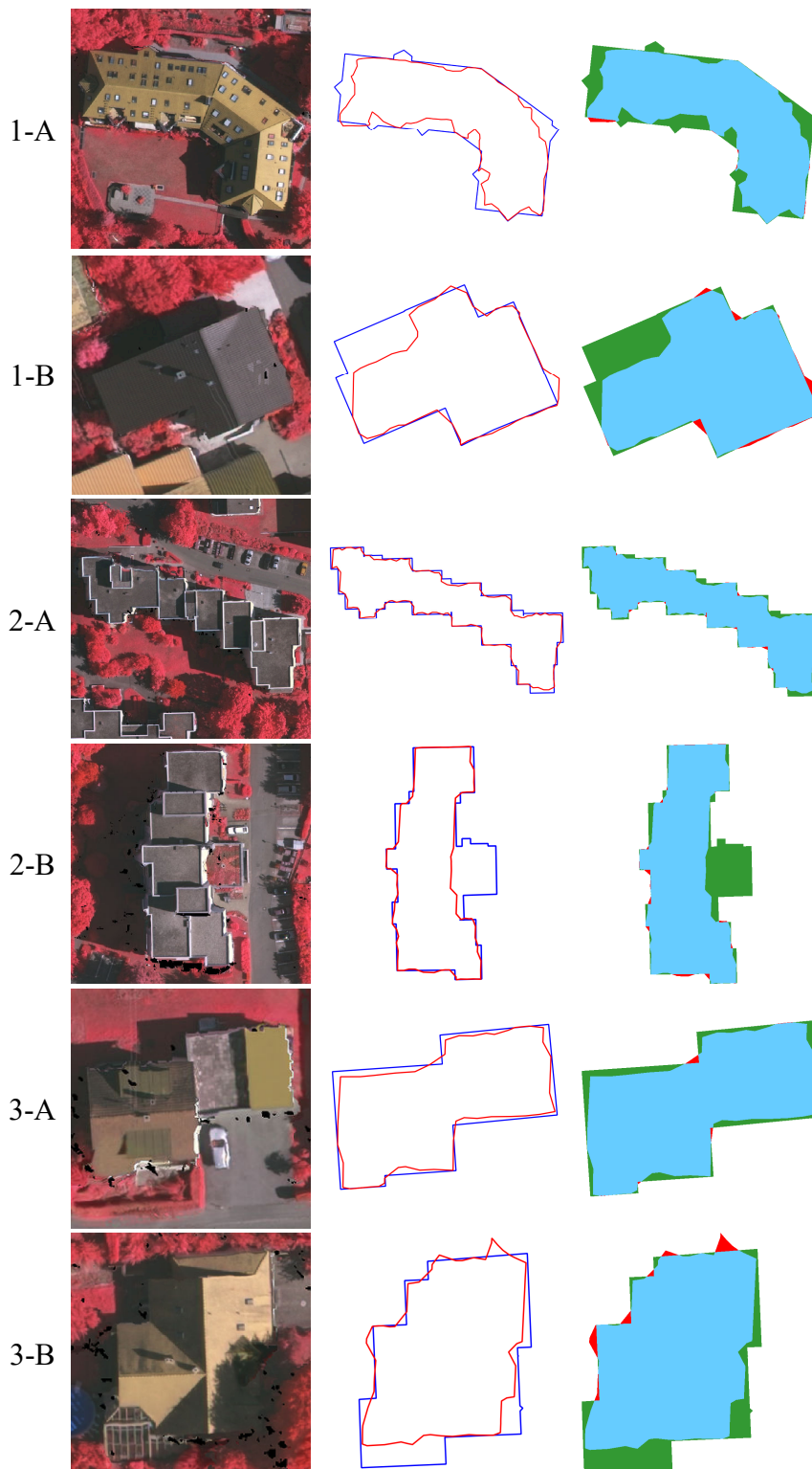


Figura 6 – Avaliação visual dos contornos de telhados extraídos.
Legenda: Polígono extraído (—), referência (—), VP (●), FP (●) e FN (●).

Tabela 2 – Comparação da área construída referente aos polígonos extraídos e de referência.

Região	Edificação	Área do polígono (m ²)			Diferença relativa (%)
		Extraído	Referência	Diferença	
1	A	535,41	643,17	107,76	16,76
	B	163,22	188,47	25,25	13,40
2	A	874,07	942,85	68,78	7,30
	B	621,15	748,01	126,86	16,96
3	A	193,81	214,92	21,11	9,82
	B	241,96	279,09	37,13	13,30
Média		438,27	502,75	64,48	12,92

De modo geral, é possível verificar que os resultados obtidos estão coerentes, com um valor médio de *F-score* de 92%, entretanto, ainda são necessárias melhorias para tornar o método mais robusto. Os valores obtidos a partir da análise quantitativa estão de acordo com os encontrados na literatura, assim como pode ser visto em Rottensteiner et al. (2014). Ressalta-se que poderia ser utilizado algum método de simplificação de polígonos, como o algoritmo proposto por Douglas e Peucker (1973), por exemplo, entretanto, as melhorias seriam apenas marginais, visto que os problemas identificados no método estão relacionados à falha de detecção de alguma feição do telhado, uma vez que a qualidade da extração das bordas a partir de pontos obtidos por sistema a LASER aerotransportado é dependente da densidade de pontos amostrado por este sistema.

Tratando de compra e venda de imóveis, o parágrafo primeiro do Artigo 500 da Lei nº 10.406 de 10 de janeiro de 2002 estabelece como negligenciável uma diferença de até um vigésimo (5%) entre a área enunciada e a área real do imóvel, isto quando o valor da negociação for estabelecido o preço por medida de extensão. Assim, como pode ser visto na Tabela 2, na média, o método apresentou uma diferença relativa de área de aproximadamente 13%, o que inviabilizaria a utilização destes resultados para essa atividade, a não ser que correções sejam realizadas. Entretanto, duas outras edificações com contornos mais simples (polígonos com menos vértices) foram avaliadas além das seis anteriores, como mostra a Figura 7. Para essas duas construções o erro relativo em área foi de 2,81% e 2,52%, respectivamente, o que indica que a aplicação do mesmo procedimento para estas edificações atenderiam ao critério estabelecido pela Lei nº 10.406.

A complexidade dos telhados não é um fator que afeta os resultados de forma isolada, isto é, deve-se considerar também os problemas envolvidos no método de classificação, além das características dos dados utilizados, como a densidade de pontos relativamente baixa, por exemplo. A partir da análise visual é possível verificar que a maior parte dos FN ocorreu devido à problemas na classificação, isto é, o algoritmo falhou ao identificar partes dos telhados (edificações 1-B, 2-B e 3-B, por exemplo). O aumento da densidade da nuvem de pontos deve contribuir diretamente na extração dos contornos de telhados, uma vez que a superfície será amostrada com maior detalhamento.

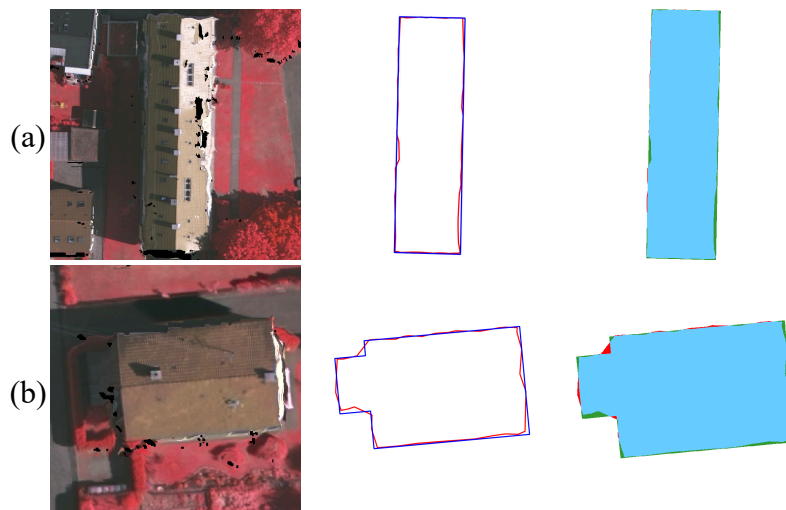


Figura 7 – Edificações com contornos de telhados mais simples.
Legenda: Polígono extraído (—), referência (—), VP (●), FP (●) e FN (●).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas análises qualitativas e quantitativas em polígonos extraídos automaticamente a partir de dados LiDAR aerotransportado utilizando o software *LAStools*. As métricas utilizadas permitiram quantificar os erros cometidos a partir da comparação com referências geradas manualmente (restituição fotogramétrica).

Foi constatado que embora coerentes, os resultados podem não atender aos critérios estabelecidos na legislação, o que permitiria utilizar o método para a finalidade de validação da área enunciada em transações imobiliárias (Artigo 500 da Lei nº 10.406), por exemplo. Por outro lado, foi possível observar que para edificações mais simples e sem vegetação próximo das bordas, os erros obtidos nas áreas atendem o que preconiza a legislação citada. Para os casos em que seja exigida maior acurácia, são necessárias edições manuais para corrigir eventuais incoerências. Além disso, recomenda-se a utilização de dados com maior densidade de pontos.

Para trabalhos futuros é sugerida a investigação da extração dos polígonos de contornos de telhados a partir da integração de dados LiDAR aerotransportado e imagens aéreas, considerando diferentes escalas, densidades e resoluções destes dados. Recomenda-se também estudos em outras regiões nas quais a complexidade da cena e das edificações pode variar.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte em alguns projetos (Proc. 304189/2016-2). O conjunto de dados de Vaihingen foi disponibilizado pela Sociedade Alemã de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Geoinformação (DGPF): <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html>.

Referências Bibliográficas

AVBELJ, J.; MÜLLER, R.; BAMLER, R. A metric for polygon comparison and building extraction evaluation. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 1, 2015. p. 170-174.

AXELSSON, P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 33, 2000, Amsterdam, **Anais...**, ISPRS, p. 110-117.

AWRANGJEB, M.; LU, G.; FRASER, C. S. Automatic building extraction from LiDAR data covering complex urban scenes. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences**, Vol. XL-3, 2014, Zurich, Switzerland. p. 25-32.

BISHOP, C. M. **Neural networks for pattern recognition**. Oxford: Clarendon Press, 1995. 482p.

BUJÁN, S.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; REYES-BUENO, F.; BARREIRO-FERNÁNDEZ, L.; CRECENTE, R.; MIRANDA, D. Land use classification from LiDAR data and ortho-images in a rural area. **The Photogrammetric Record**, v. 27, n. 140, 2012, p. 401–422.

BRASIL. **Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002**. Institui o Código Civil. Brasília, 2002. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110406.htm>. Acesso em: 12 jul. 2018.

CARRILHO, A. C.; IVANOVA, I.; GALO, M. Quality assessment for automatic LiDAR data classification methods. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2017, Santos, **Anais...** Santos: 2017, p. 6772-6779.

CARRILHO, A. C.; GALO, M. Extraction of building roof planes with stratified random sample consensus. **The Photogrammetric Record**, v. 33, n. 163, 2018, p. 363-380.

CRAMER, M. The DGPF Test on digital airborne camera evaluation – overview and test design. **Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation**, 2010, p. 73-82.

DOUGLAS, D. H.; PEUKER, T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. **Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization**, v. 10, n. 2, 1973, p. 112-122.

EDELSBRUNNER, H.; KIRKPATRICK, D. G.; SEIDEL, S. On the shape of set of points in the plane. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. IT-29, n. 4, p. 551-559, 1983.

GALVANIN, E. A. S.; DAL POZ, A. P. Extraction of building roof contours from LiDAR data using a Markov-Random-Field-based approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 3, 2012. p. 981-987.

GONÇALVES, G. A.; MITSHITA, E. A. Um exercício de identificação automática de desatualizações na representação de edificações em bases cartográficas de áreas urbanas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, 2016, p. 557-573.

GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; CRESPO-MATELLÁN, E.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P. Automated urban analysis based on LiDAR-derived building models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 3, 2013. p. 1844-1851.

HERMOSILLA, T.; RUIZ, L. A.; RECIO, J. A.; ESTORNELL, J. Evaluation of automatic building detection approaches combining high resolution images and LiDAR data. **Remote Sensing**, v. 3, n. 6, p. 1188-1210, 2011.

KWAK, E.; HABIB, A. Automatic representation and reconstruction of DBM from LiDAR data using recursive minimum bounding rectangle. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 93, 2014, p. 171-191.

MASS, H-G.; VOSSelman, G. Two algorithms for extracting building model from raw laser altimetry data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 54, 1999, p. 153-163.

OLIVEIRA, G. R. K. **Uso integrado de dados lidar e imagens aéreas aplicado na extração de contornos de telhados de edificações**. Dissertação de mestrado – Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Presidente Prudente, p. 105. 2016.

POTUCOVÁ, M.; HOFMAN, P. Comparison of quality measures for building outline extraction. **The Photogrammetric Record**, v. 31, n. 154, 2016. p. 193-209.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. Londres: Springer, 2013. 494 p.

ROTTENSTEINER, F.; SOHN, G.; GERKE, M.; WEGNER, J. D.; BREITKPF, U.; JUNG, J. Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 93, 2014, p. 256-271.

ROTTENSTEINER, F.; SOHN, G.; GERKE, M.; WEGNER, J. D. ISPRS test project on urban classification and 3D building reconstruction. Disponível em: http://www2.isprs.org/tl_files/isprs/wg34/docs/ComplexScenes_revision_v4.pdf. Acesso em: 12 abr 2018.

SOKOLOVA, M.; JAPKOWICZ, N.; SZPAKOWICZ, S. Beyond accuracy, f-score and roc: a family of discriminant measures for performance evaluation. In: **Proceedings of the AAAI'06 workshop on Evaluation Methods for Machine Learning**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 24–29.

YOUSEFHUSSEN, M.; KELBE, D. J.; IENTILUCCI, E. J.; SALVAGGIO, C. A multi-scale fully convolutional network for semantic labeling of 3D point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 143, 2018, p. 191-204.