

USO DO ALGORITMO ALPHA SHAPE NA EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE EDIFICAÇÕES A PARTIR DE DADOS LiDAR

The use of Alpha Shape Algorithm in the Building Boundaries Extraction from LiDAR data

Renato César dos Santos¹

renato_cstos@hotmail.com

Maurício Galo^{1,2}

mauricio.galo@unesp.br

André Caceres Carrilho¹

carrilho.acc@gmail.com

Guilherme Gomes Pessoa¹

guilhermegpessoa@hotmail.com

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

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

²Departamento de Cartografia

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

Resumo:

A extração automática ou semiautomática de contornos de edificações sobre dados LiDAR tem sido um tema recorrente. São diversas as alternativas que podem ser consideradas e o algoritmo α -shape é uma delas. Considerando um conjunto de pontos no espaço 2D, a ideia deste algoritmo consiste em extrair o contorno do objeto por meio de um critério pré-estabelecido, o qual depende de um parâmetro α definido *a priori*. A limitação refere-se à determinação do parâmetro α , o qual está diretamente relacionado com a densidade dos pontos e o nível de detalhamento do contorno da edificação. Para alguns autores o espaçamento médio dos pontos (s_{avg}) juntamente com um fator multiplicativo (k), onde $\alpha = k s_{avg}$ é uma boa estimativa para o parâmetro α . No entanto, não existe um consenso sobre os melhores valores de k a serem considerados. Diante disso, esse trabalho realizou um estudo comparativo usando três diferentes fatores multiplicativos para k (1,25; 1,5; e 2,0). Para realizar os experimentos, uma nuvem de pontos LiDAR obtida sobre a cidade de Vaihingen/Alemanha e com densidade média de 6,7 pts/m² foi selecionada. As análises qualitativa e quantitativa indicaram que o uso de $\alpha = 2 s_{avg}$ produziu os melhores resultados, apresentado completude e nível de acerto em torno de 92% e 98,5%, respectivamente, e acurácia posicional de 0,39 m.

Palavras-chave: Extração de contornos de edificações; dados LiDAR; algoritmo α -shape.

Abstract

The automatic or semi-automatic building boundaries extraction from LiDAR data has been a recurring theme in the literature related to feature extraction from point cloud. There are several alternatives and the α -shape algorithm is one that is widely explored. Considering a set of points in 2D space, the idea is to extract the object boundary through a pre-established criterion, which depends on a parameter α . The limitation refers to the determination of α , which is directly related to the point density and the level of detail of the building boundary. For some authors, the average point spacing (s_{avg}) together with a multiplicative factor (k), where $\alpha = k s_{avg}$ is a good estimate for α . Nevertheless, there is no consensus on the best values to be consider. Therefore, this work performed a comparative study using three different multiplicative factor k (1,25; 1,5; and 2). To perform the experiments, a point cloud obtained by airborne LiDAR system was selected from the Vaihingen/Germany data set, with average point density of 6,7 pts/m².

The qualitative and quantitative analyzes indicated that the use of $\alpha = 2 s_{avg}$ generated the best results, yielding completeness and accuracy level around 92% and 98,5%, respectively, and positional accuracy of 0,39 m.

Keywords: Building boundaries extraction; LiDAR data; α -shape algorithm.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de informações geográficas (SIGs) podem ser utilizados em diversas aplicações: planejamento urbano, avaliação dos danos causados por desastres naturais, planejamento de redes de telecomunicações, vigilância e transportes. Com isso, as tarefas executadas com o intuito de obter um produto cartográfico atualizado e acurado tornam-se relevantes. Em algumas aplicações, como o planejamento urbano, as edificações possuem papel primordial na tomada de decisões, uma vez que uma alta porcentagem da superfície urbana é coberta por edificações. Por tal importância, o tema relacionado à extração de edificações de forma automática, ou mesmo semiautomática, vem sendo pesquisada por diversos autores (KIM e HABIB, 2009; DAL POZ et al., 2009; AWRANGJEB, 2016; CENTENO et al., 2016).

Considerando os dados obtidos por plataformas aéreas e orbitais, a extração deste tipo de informação pode ser feita a partir das seguintes fontes de dados: nuvem de pontos LiDAR (GALVANIN e DAL POZ, 2012), imagens aéreas (MANNO-KOVACS e SZIRANYI, 2015) e imagens de satélites (WANG, J. et al., 2015). Além disso, existem trabalhos que combinam imagens aéreas ou de satélites com dados LiDAR (KIM e HABIB, 2009; MENDES e DAL POZ, 2013), com o intuito de explorar a complementaridade dos dados. Nesse trabalho é explorado o uso da nuvem de pontos gerada por um sistema LiDAR aerotransportado, a qual possui algumas vantagens e desvantagens quando comparado com a fotogrametria convencional. Como vantagem pode-se destacar o conhecimento das coordenadas 3D dos pontos sem a necessidade de um processo de correspondência. No entanto, a variação na densidade de pontos e o processo de amostragem fazem com que não seja possível ter a representação contínua das bordas das edificações. A integração dos dados LiDAR com imagens aérea é uma alternativa para contornar algumas limitações. No entanto, esse procedimento têm o desafio de relacionar conjuntos de dados com diferentes características.

Na literatura são encontrados vários trabalhos que tratam da extração de contornos de edificações sobre dados LiDAR (SAMPATH e SHAN, 2007; KWAK e HABIB, 2014; e JUNG et al., 2017). Um conceito que tem sido amplamente explorado é o algoritmo alpha-shape (α -shape) (SHEN, 2008; JOCHEM et al., 2009; LEE et al., 2011; SATARI et al., 2012; ALBERS et al. 2016). A ideia desse algoritmo é identificar os segmentos de retas que compõem o contorno dos objetos por meio de um critério, o qual baseia-se no valor do parâmetro α pré-estabelecido (EDELSBRUNNER et al., 1983). Segundo Shen (2008) o algoritmo α -shape foi inicialmente desenvolvido pela comunidade de Computação Gráfica e posteriormente verificou-se algumas vantagens no processamento de nuvens de pontos obtidas por sistemas LiDAR, tais como: velocidade de processamento, alta acurácia e capacidade de detectar polígonos côncavos e convexos, bem como contornos internos e externos. O desafio desse algoritmo está relacionado à seleção de um valor ótimo para o parâmetro α , uma vez que esse depende da densidade de pontos e do nível de detalhamento desejado.

De acordo com Jochem et al. (2009) o espaçamento médio dos pontos (s_{avg}) é uma boa estimativa para o parâmetro α . Shen (2008), Shen et al. (2011) e He et al. (2014) consideram uma ideia similar, no entanto, o valor de α é obtido multiplicando o espaçamento médio por uma constante k ($\alpha = k s_{avg}$), sendo que $k \in R$ e $k \geq 1$. Como o valor da constante k pode assumir infinitos valores e usualmente esse valor é definido empiricamente, a ideia central deste trabalho é avaliar o efeito do uso de diferentes fatores multiplicadores no algoritmo α -shape e sua influência na extração de edificações em dados LiDAR. Para isso serão considerados diferentes valores para a constante k (1,25; 1,5; e 2), e a partir da análise qualitativa e quantitativa será verificado qual valor de k corresponde aos melhores resultados.

2. MÉTODO

Na Figura 1 é apresentado um fluxograma do método proposto. Os dados de entrada correspondem ao conjunto de pontos LiDAR original. O método é composto por duas etapas principais: extração dos contornos considerando diferentes valores de α , e a avaliação dos resultados por meio de parâmetros de qualidade. O processo de extração é dividido em três etapas. A primeira está relacionada ao pré-processamento, o qual corresponde à seleção dos pontos amostrados sobre os telhados das edificações. O segundo passo refere-se à segmentação dos pontos amostrados sobre diferentes edificações por meio do conceito de crescimento de regiões. Na terceira etapa o algoritmo α -shape é executado com o intuito de obter o contorno no espaço 2D para cada edificação. Finalizado o processo de extração, os parâmetros de qualidade são estimados comparando os contornos extraídos com os contornos de referência.

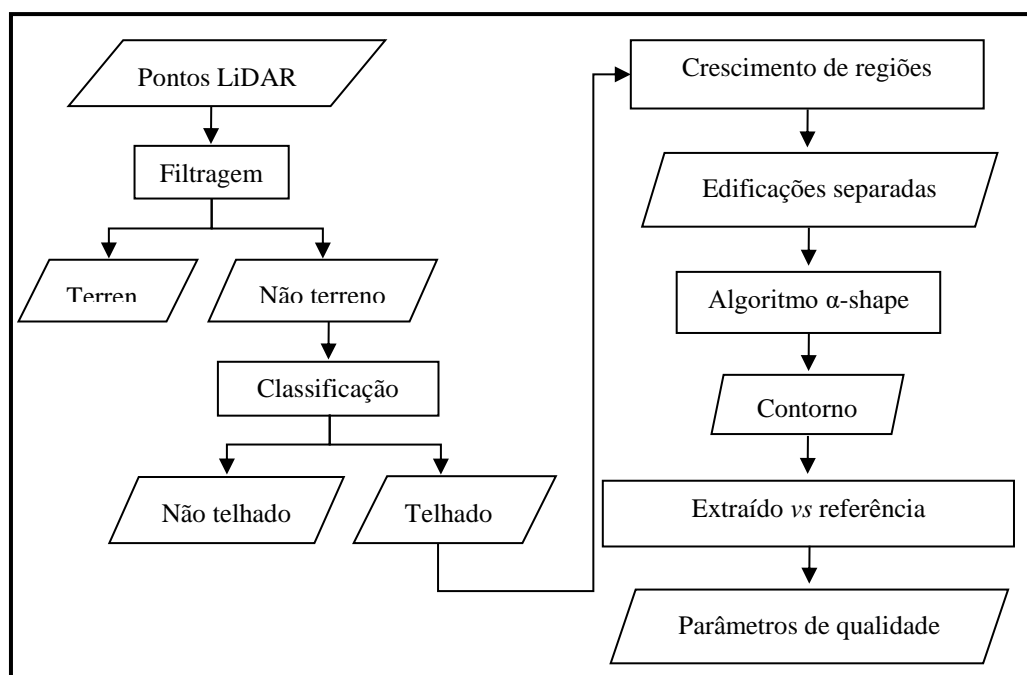


Figura 1 – Fluxograma do método proposto.

2.1. Pré-processamento

A etapa de pré-processamento é realizada com o intuito de selecionar os pontos LiDAR amostrados sobre os telhados das edificações. Essa seleção foi executada por meio de ferramentas disponibilizadas no *software LAStools* (ISENBURG, 2018). O procedimento de pré-processamento é dividido em três etapas: identificação dos pontos de terreno e não terreno (objetos) por meio da filtragem progressiva, cálculo do Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn), e classificação dos pontos de não terreno em três classes: não classificado, vegetação e telhado.

No processo de filtragem, os pontos LiDAR são rotulados em duas classes: pontos de terreno e não terreno (edificações, árvores, carros, etc). A etapa de filtragem foi executada por meio da ferramenta *lasground*, na qual está implementado o método de filtragem progressiva (ZHANG e LIN, 2013). Na segunda etapa, o MDSn foi calculado a partir da subtração do Modelo Digital do Terreno (MDT) do Modelo Digital de Superfície (MDS) usando a ferramenta *lasheight*. O MDT está relacionado ao conjunto de pontos rotulados como pontos de terreno, enquanto que o MDS refere-se ao conjunto de dados LiDAR originais. A Figura 2 ilustra os três modelos de representação mencionados.

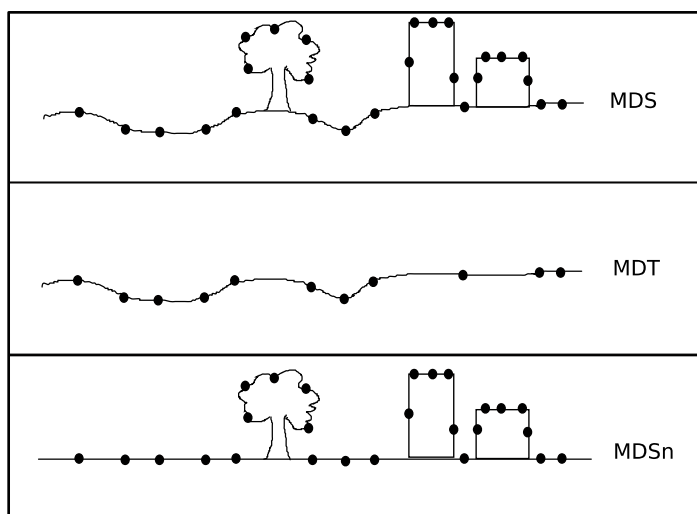


Figura 2 – Representação dos modelos digitais: MDS, MDT e MDSn.

Na última etapa, os pontos de não terreno foram classificados em três classes: não classificado, vegetação e telhado, por meio da ferramenta *lasclassify*. Nesse processo, para cada ponto não pertencente ao terreno são calculadas as seguintes variáveis: desvio padrão da componente altimétrica, densidade de pontos por unidade de área (metro quadrado), e altura. O desvio padrão e a densidade são obtidos considerando uma vizinhança no entorno do ponto de interesse, enquanto que a altura é obtida a partir do MDSn. O ponto é rotulado na classe “não classificado” caso a altura do ponto seja inferior ao limiar de altura ($L_{\Delta h}$) ou caso a densidade relacionada ao ponto seja inferior ao limiar de densidade de pontos por metro quadrado (L_d). Os pontos que não pertencem à classe “não classificado” podem ser rotulados na classe vegetação ou

telhado. Para tanto, o valor do desvio padrão relacionado a cada ponto é comparado com os limiares de planaridade (L_{planar}) e rugosidade (L_{rugo}) definidos *a priori*.

Nesse trabalho, o processo de filtragem foi executado considerando a opção “city”, enquanto que os resultados obtidos por meio das ferramentas *lasheight* e *lasclassify* foram gerados considerando os parâmetros e limiares padrão definidos para cada ferramenta. As ferramentas podem ser obtidas a partir de Isenburg (2018), onde também são disponibilizadas informações sobre os limiares e a descrição de cada ferramenta.

2.2. Segmentação por crescimento de regiões

O processo de crescimento de regiões foi realizado no espaço 3D, considerando os pontos de telhados irregularmente espaçados como dados de entrada. Para separar os conjuntos de pontos relacionados às diferentes edificações, dois limiares foram adotados: limiar de distância planimétrica (L_{Dxy}) e altimétrica (L_{Dh}). Na sequência são apresentados os passos envolvidos no processo de segmentação:

Passo 1: Os pontos de telhado são armazenados no vetor V , sendo $V^T = [P_1 P_2 \dots P_i]$;

Passo 2: Seleciona-se um ponto do vetor V como semente e armazena-o no vetor B . Normalmente, seleciona-se o ponto armazenado na primeira posição do vetor;

Passo 3: Considerando os pontos de V , verifica-se quais pontos satisfazem os seguintes critérios:

$$L_{Dxy} > \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

$$L_{Dh} > abs(z_i - z_j) \quad (2)$$

onde x_i, y_i e z_i correspondem às coordenadas do i -ésimo ponto armazenado no vetor V , enquanto x_j, y_j e z_j refere-se as coordenadas do ponto armazenado em B ;

Passo 4: Os pontos armazenados em V e que atendem os dois critérios são armazenados em B e retirados de V ;

Passo 5: Se nenhum ponto for adicionado no vetor B , segue para o passo 6. Caso contrário, retorna-se ao passo 3 e repete-se as verificações;

Passo 6: Os pontos armazenados em B correspondem a uma edificação e são armazenados em um arquivo de saída;

Passo 7: Os pontos armazenados no vetor B são excluídos. Caso exista algum ponto no vetor V , retorna-se ao passo 2. Caso contrário, o processo é finalizado.

2.3. Extração de contornos usando o algoritmo α -shape

O algoritmo α -shape consiste na seleção dos segmentos de retas que compõem o contorno de um dado polígono. Como dados de entrada têm-se: o conjunto de dados no espaço 2D e o parâmetro α (EDELSBRUNNER et al., 1983). Nesse trabalho, o conjunto de pontos corresponde

aos pontos LiDAR amostrados sobre os telhados das edificações, e o valor do parâmetro α é estimado considerando o espaçamento médio dos pontos da nuvem LiDAR.

Considerando os pontos p_i e p_j , e o parâmetro α como sendo o raio do círculo passando pelos pontos p_i e p_j , é possível calcular dois círculos, como ilustrado na Figura 3a e 3b. Se não existir nenhum ponto no interior de pelo menos um círculo, os pontos p_i e p_j são marcados como pontos de bordas e podem ser conectados para obter um segmento do contorno (Figura 3a). Caso contrário, os pontos p_i e p_j não formam um segmento do contorno (Figura 3b). Na Figura 3c é apresentado um exemplo do uso do algoritmo para extrair o contorno de um conjunto de dados.

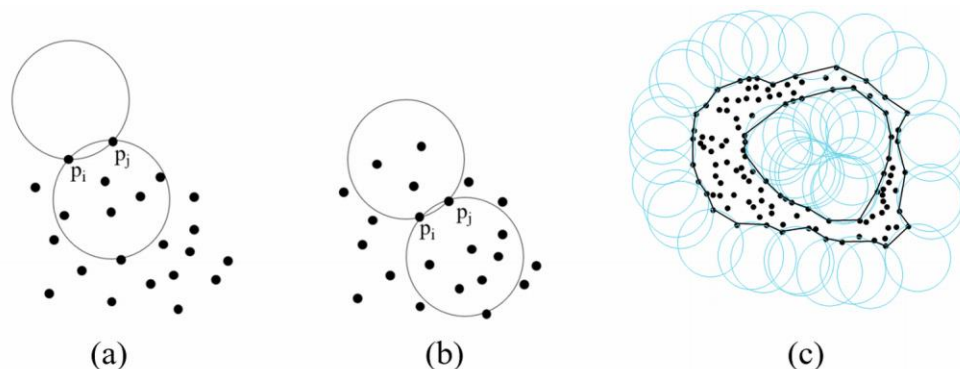


Figura 3 – Princípio do algoritmo α -shape. Em (a) os pontos p_i e p_j formam um segmento do contorno, enquanto que em (b) os p_i e p_j não formam um segmento.

Fonte: Baseado em Shen et al. (2011).

2.4. Parâmetros de qualidade

Nesse trabalho, a avaliação da qualidade dos contornos extraídos foi realizada qualitativamente e quantitativamente. A análise qualitativa foi executada por meio de uma inspeção visual, enquanto que a análise quantitativa foi realizada considerando alguns parâmetros: erro relativo em área (E_R), completeza (C), nível de acerto (NA), F_{score} , e a métrica *Polygons and Line Segments* (PoLiS). Como referências para os princípios e conceitos relacionados a estes parâmetros, as seguintes referências são sugeridas: Wiedemann et al. (1998), Sokolova et al. (2006) e AVBLJ et al. (2015).

Considerando o polígono extraído A e o de referência B , na sequência são apresentadas as equações utilizadas no cálculo dos parâmetros de completeza, nível de acerto e F_{score} :

$$E_R = |ar(A) - ar(B)|/ar(A) \quad (3)$$

$$C = ar(TP)/(ar(TP) + ar(FN)) \quad (4)$$

$$NA = ar(TP)/(ar(TP) + ar(FP)) \quad (5)$$

$$F_{score} = (2 C NA)/(C + NA) \quad (6)$$

onde $ar(.)$ representa a medida de área, $ar(TP) = A \cap B$, $ar(FN) = ar(B) - A \cap B$, e $ar(FP) = ar(A) - A \cap B$. Nestas equações TP representam os positivos verdadeiros, FN os falsos negativos e FP os falsos positivos.

A métrica PoLiS $p(A, B)$ relacionada a dois polígonos A e B é definida por (AVBLJ et al., 2015):

$$p(A, B) = \frac{1}{2q} \sum_{a_j \in A} \min_{b \in \partial B} \|a_j - b\| + \frac{1}{2r} \sum_{b_k \in B} \min_{a \in \partial A} \|b_k - a\| \quad (7)$$

onde q e r correspondem ao número de vértices do polígono A e B , respectivamente. ∂A e ∂B representam o contorno dos polígonos A e B , e $\|a - b\|$ é a distância Euclidiana entre os pontos a e b .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Experimentos e resultados

Os experimentos foram realizados considerando um conjunto de dados LiDAR adquirido sobre a cidade de Vaihingen/Alemanha. Os dados, juntamente com alguns contornos de referência são disponibilizados na página da ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) (<http://www.isprs.org/education/benchmarks.aspx>). O sistema de varredura a LASER empregado na coleta dos dados foi um Leica ALS50 (CRAMER, 2010). A altura média de voo foi de 500 m, sendo gerado um conjunto de dados com densidade média de 6,7 pontos/m².

As etapas de crescimento de regiões, extração dos contornos e determinação dos parâmetros de qualidade foram implementadas na linguagem C, utilizando o compilador *Code::Blocks*. Para facilitar a manipulação dos dados LiDAR foi utilizada a estrutura de armazenamento *kd-tree* e alguns funções de busca disponibilizadas na biblioteca FLANN (MUJA e LOWE, 2013).

Na Figura 4 são apresentados a ortofoto e o conjunto de pontos LiDAR (coloridos de acordo com a altura) relacionados a área de interesse. Os dados correspondem a uma área residencial, a qual é composta por edificações de diferentes dimensões bem como por vegetações isoladas. A maioria das edificações presentes na cena não possuem alta complexidade, uma vez que a maior parte possui forma retangular.

Os resultados provenientes da etapa de classificação e do crescimento de regiões são apresentados na Figuras 5a e 5b, respectivamente. A Figura 6 mostra os resultados relacionados ao uso de diferentes valores de α , os quais foram obtidos multiplicando o espaçamento médio dos pontos pelos diferentes valores de k , como mencionado. É importante salientar que para todos os casos o algoritmo α -shape foi executado sobre o conjunto de pontos de telhados obtido após o processo de crescimento de região (Figura 5b).

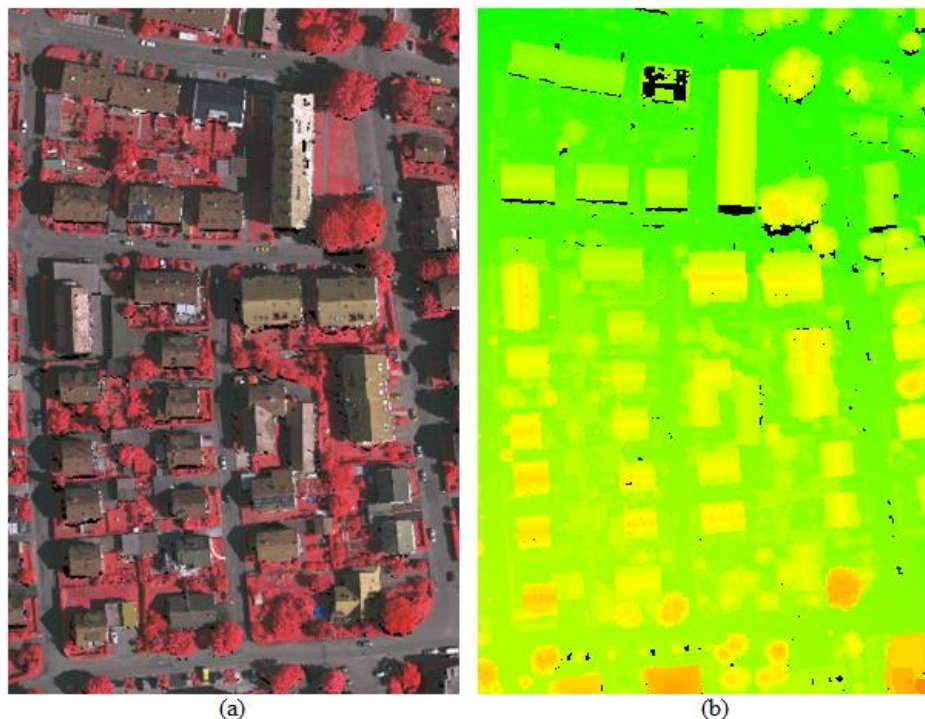


Figura 4 – Conjunto de dados de Vaihingen/Alemanha, área de interesse. Ortofoto (a) e pontos LiDAR (b).

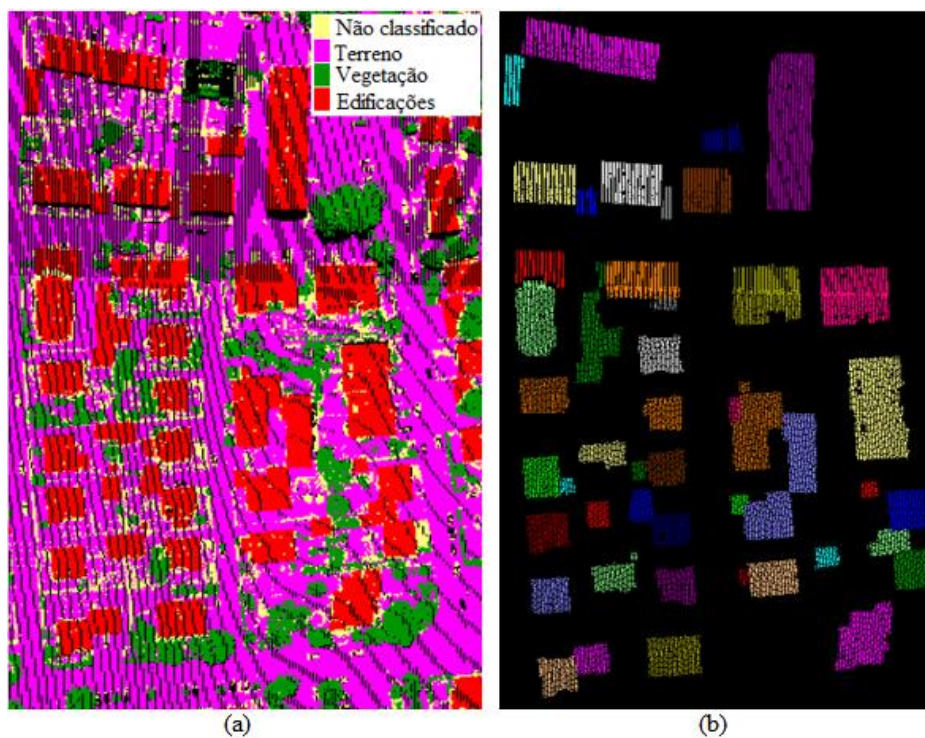


Figura 5 – Resultados relacionados à classificação (a) e ao crescimento de regiões (b).



Figura 6 – Contornos de edificações obtidos usando $\alpha = k s_{avg}$, para diferentes valores de k. (a) $k = 1,25$; (b) $k = 1,5$; e (c) $k = 2$.

A Tabela 1 apresenta os valores em área relacionados aos polígonos de referência (A_R), e aos polígonos extraídos (A_E), bem como a diferença de área ($A_D = A_R - A_E$) entre eles, além dos respectivos parâmetros de qualidade. Para cada edificação, o algoritmo α -shape foi executado considerando três diferentes valores de α , obtidos a partir dos três valores de k. Os parâmetros de qualidade foram estimados comparando os contornos extraídos e os contornos de referência. Os contornos de referência foram extraídos manualmente por meio do processo de restituição fotogramétrica sobre um conjunto de imagens com GSD (*ground sample distance*) de 8 cm, como descrito em Rottensteiner et al. (2014). Na Tabela 1 são destacados em cinza os melhores valores para cada edificação.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade para os diferentes valores de α .

Edif.	Valores de α	Área (m ²)			Parâmetros de qualidade				
		A _R	A _E	A _D	E _R (%)	C (%)	NA (%)	F _{score} (%)	PoLiS (m)
1	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	625,3	588,4	36,9	6,1	94,0	99,9	96,8	0,50
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		588,8	36,5	6,1	94,0	99,9	96,9	0,50
	$\alpha = 2 s_{avg}$		589,6	35,7	5,9	94,2	99,9	96,9	0,50
2	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	231,1	210,5	20,6	9,5	91,1	99,9	95,3	0,41
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		210,9	20,2	9,5	91,3	99,9	95,4	0,41
	$\alpha = 2 s_{avg}$		211,0	20,1	9,5	91,3	99,9	95,4	0,42
3	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	79,1	74,1	5,0	6,7	90,7	96,8	93,6	0,32
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		75,0	4,2	5,3	91,1	96,2	93,6	0,32
	$\alpha = 2 s_{avg}$		76,4	2,7	2,6	92,3	95,6	94,0	0,29
4	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	62,0	54,0	8,0	14,8	85,7	98,4	91,6	0,32
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		54,2	7,8	13,0	85,8	98,2	91,6	0,34
	$\alpha = 2 s_{avg}$		55,5	6,5	10,8	86,8	97,1	91,7	0,38
5	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	131,6	119,7	11,9	9,2	90,7	99,7	94,7	0,53
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		120,1	11,5	9,2	91,0	99,7	95,1	0,53
	$\alpha = 2 s_{avg}$		122,0	9,6	7,4	92,0	99,2	95,4	0,50
6	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	129,7	119,7	10,0	7,5	92,1	99,8	95,8	0,53
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		120,0	9,7	7,5	92,3	99,8	95,9	0,53
	$\alpha = 2 s_{avg}$		120,8	9,0	6,6	92,9	99,8	96,2	0,43
7	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	72,2	68,2	4,0	4,4	91,4	96,7	94,0	0,34
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		68,9	3,3	4,4	92,1	96,6	94,3	0,32
	$\alpha = 2 s_{avg}$		70,4	1,8	1,4	93,2	95,6	94,4	0,30
8	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	120,8	111,4	9,4	8,0	91,7	99,5	95,5	0,45
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		112,1	8,7	7,1	92,2	99,4	95,7	0,39
	$\alpha = 2 s_{avg}$		112,3	8,5	7,1	92,4	99,4	95,8	0,27
9	$\alpha = 1,25 s_{avg}$	182,2	167,5	14,7	8,0	91,9	99,9	95,8	0,53
	$\alpha = 1,5 s_{avg}$		168,2	14,0	7,7	92,3	99,9	96,0	0,51
	$\alpha = 2 s_{avg}$		169,0	13,3	7,7	92,7	99,9	96,2	0,43

3.2. Discussão dos resultados

A partir da Figura 6 é possível notar algumas pequenas diferenças decorrente do uso de diferentes valores de α . Na Figura 6a é possível observar a extração de segmentos no meio de algumas edificações, como pode ser visto nas edificações 1 e 2. A extração desses segmentos está diretamente relacionada com espaçamento entre os pontos nestas edificações e o valor do α adotado. Nesses casos, o α considerado é menor que o espaçamento entre os pontos. Outra característica que pode ser notada é que o uso de um maior α produz um contorno mais regular (menos serrilhado). Apesar disso, nota-se uma certa dificuldade na extração de alguns segmentos

côncavos, problema esse que pode ser contornado com a adoção de um menor valor de α . Diante disso, é possível concluir que ao adotar um único valor de α podem ocorrer situações em que os resultados são positivos e situações onde os resultados são equivocados, sendo necessário selecionar um parâmetro que melhor se adeque a maioria das edificações presentes na cena.

Na Tabela 1, é possível observar que para todos os casos o valor da área extraída é menor que o valor da área de referência. Considerando os valores da área extraída, da diferença entre as áreas e do erro relativo em área, nota-se que o uso de $\alpha = 2 s_{avg}$ está relacionado aos melhores índices. Para $\alpha = 2 s_{avg}$ o valor médio para o erro relativo em área foi de 6,5%, contra 8% para o valor $\alpha = 1,25 s_{avg}$ e 7,8% para $\alpha = 1,5 s_{avg}$. O maior valor do erro relativo em área para $\alpha = 2 s_{avg}$ foi próximo de 10%, enquanto que o menor foi inferior 1,5%. Diante disso, pode-se constatar que o uso de $\alpha = 2 s_{avg}$ proporcionou valores de área mais próximos aos valores de referência.

Em termos do erro tolerável em área na compra e venda de imóveis, o Artigo 500 da Lei nº 10.406 (Código Civil) 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. Considerando os valores do erro relativo em área para $\alpha = 2 s_{avg}$ (Tabela 1), nota-se que duas edificações (edificações 3 e 7) atenderam a tolerância prevista por lei, além disso, o valor médio 6,5% ficou próximo do valor aceitável.

Analisando os parâmetros de qualidade completeza, nível de acerto e F_{score} (Tabela 1), é possível notar que os resultados obtidos estão condizentes com os encontrados na literatura, assim como pode ser visto em Rottensteiner et al. (2014). Realizando uma análise comparativa dos resultados mostrados na Tabela 1 percebe-se que $\alpha = 2 s_{avg}$ produziu melhores resultados em termos de completeza e F_{score} para todas as edificações, resultando nos valores médios de 92% e 95,1%, respectivamente. Com relação ao nível de acerto, observa-se que ocorreu uma alternância entre as estratégias que produziram melhores resultados, sendo que $\alpha = 1,5 s_{avg}$, de forma geral, apresentou o melhor valor médio, nesse caso 99%, contra 98,8% do $\alpha = 1,5 s_{avg}$, e 98,5% do $\alpha = 1,25 s_{avg}$. Apesar disso, a diferença entre os parâmetros de qualidade não se mostrou tão significativa, uma vez que a maior diferença foi de 1,8% (para edificação 7). Desta forma, pode-se concluir que $\alpha = 2 s_{avg}$, em geral, produziu os melhores resultados para edificações analisadas.

Considerando a métrica PoLiS, nota-se que os melhores resultados estão relacionados a $\alpha = 2 s_{avg}$, exceto para a edificação 4. Os valores médios da métrica PoLiS correspondente a $\alpha = 1,25 s_{avg}$, $\alpha = 1,5 s_{avg}$ e $\alpha = 2 s_{avg}$, são respectivamente 0,44 m, 0,43 m e 0,39 m. Com isso, é possível apontar que o uso de $\alpha = 2 s_{avg}$ também produziu melhores resultados em termos posicional.

Em resumo, as análises qualitativa e quantitativa indicaram a potencialidade do uso do algoritmo α -shape na extração de contornos de edificações e a influência do parâmetro α no resultado final.

4. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresenta um estudo comparativo do uso de diferentes fatores multiplicativos para a obtenção do parâmetro α visando a extração do contorno dos edifícios a partir de uma nuvem de pontos geradas por um sistema LiDAR. Os experimentos foram realizados sobre uma área

residencial, composta por edificações com formato predominantemente retangular. A análise quantitativa apontou que os melhores resultados foram obtidos para $k = 2$ ($\alpha = 2 s_{avg}$). É importante destacar que esse resultado pode ser diferente caso seja selecionada uma outra área, por exemplo, composta por edificações com contornos mais complexos, ou caso seja considerado um conjunto de dados com uma densidade diferente.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se aplicar a metodologia proposta considerando regiões com edificações mais complexas: composta por segmentos côncavos e convexos, e com contornos internos. Além disso, recomenda-se considerar conjuntos de pontos com diferentes densidades e, se possível, obtidos por diferentes padrões de varredura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processo: 2016/12167-5) pelo suporte na forma de bolsa ao primeiro autor, bem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processo 304189/2016-2). O conjunto de dados de Vaihingen/Alemanha foram providos pela Sociedade Alemã de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Geoinformação (DGPF) (CRAMER, 2010): <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html>.

Referências Bibliográficas

ALBERS, B.; KADA, M.; WICHMANN, A. Automatic extraction and regularization of building outlines from airborne LiDAR point clouds. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Prague, Czech Republic, v. XLI-B3, p. 555-560, 2016.

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

AWRANGJEB, M. Using point cloud data to identify, trace, and regularize the outlines of buildings. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 3, p. 551-579, 2016.

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.

CENTENO, J. A. S.; DAROS, R.; GARGON, J. P. Extração de DTM e detecção de construções em áreas urbanas usando LiDAR. In: **Anais do COBRAC 2016**, Florianópolis – SC, UFSC.

CRAMER, M. The DGPF test on digital aerial camera evaluation – overview and test design. **Photogramm. – Fernerkund. – Geoinform**, p. 73-82, 2010.

DAL POZ, A.; HABIB, A. F.; MARCATO, V. J.; CORREIA, L. S. Uso de dados fotogramétricos no refinamento geométrico de contornos de telhados de edifícios extraídos de dados LASER. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 594-614, 2009.

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, p. 981-987, 2012.

HE, Y.; ZHANG, G.; FRASER, C. S. Na Energy minimization approach to automated extraction of regular building footprints from airborne LIDAR data. In: **ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 3, p. 65-72, Zurich, 2014.

ISENBURG, M. **LASTOOLS: Software for rapid converting, filtering, viewing, gridding, and compressing of LIDAR**. Disponível em: <<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>>. Acesso em 19 junho 2018.

JOCHEM, A.; HOFLE, B.; RUTZINGER, M.; PFEIFER, N. Automatic roof plane detection and analysis in airborne LiDAR point clouds for solar potential assessment. **Sensors**, v. 9, p.5241-5262, 2009.

JUNG, J.; JWA, Y.; SOHN, G. Implicit regularization for reconstructing 3D building rooftop models using airborne LiDAR data. **Sensors**, p. 1-27, 2017.

KIM, C.; HABIB, A. Object-based integration of photogrammetric and LiDAR data for automated generation of complex polyhedral building models. **Sensors**, v. 9, p. 5679-5701, 2009.

KWAK, E.; HABIB, A. Automatic representation and reconstruction of DBM from LiDAR data using Recursive Minimum Bounding Rectangle. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 171-191, 2014.

LEE, J.; HAN, S.; BYUN, Y.; KIM, Y. Extraction and regularization of various building boundaries with complex shapes utilizing distribution characteristics of airborne LiDAR points. **ETRI Journal**, v. 33, n. 4, 2011.

MANNO-KOVACS, A.; SZIRANYI, T. Orientation-selective building detection in aerial images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 94-112, 2015.

MENDES, T. S. G.; DAL POZ, A. P. Integração de imagem aérea de alta resolução e dados de varredura a laser na classificação de cenas urbanas para detectar regiões de via. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 2, p. 287-312, 2013.

MUJA, M.; LOWE, D. **FLANN – Fast Library for Approximate Nearest Neighbors**. 2013. Disponível em: <<https://www.cs.ubc.ca/research/flann/>>. Acesso em 19 junho de 2018.

ROTTENSTEINER, F.; SOHN, G.; GERKE, M.; WEGNER, J. D.; BREITKOPF, U.; JUNG, J. Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction. **ISPRS J. Photogram. Remote Sensing**. 2014.

SATARI, M. A Multi-resolution hybrid approach for building model reconstruction from LIDAR data. **The Photogrammetric Record**. v. 27, n. 139, p. 330-359, 2012.

SHEN, W. Building boundary extraction based on LiDAR point clouds data. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Beijing, China, v. 37, p. 157-162, 2008.

SHEN, W.; ZHANG, J.; YUAN, F. A new algorithm of building boundary extraction based on LIDAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, pp.1-4, 2011.

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.

WANG, J.; YANG, X.; QIN, X.; YE, X.; QIN, Q. An efficient approach for automatic rectangular building extraction from very high resolution optical satellite imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.12, n. 3, p. 487-491, 2015.

WIEDEMANN, C.; HEIPKE, C.; MAYER, H.; JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. **Empirical Evaluation Methods in Computer Vision**. IEEE Computer Society Press, pp. 172-187, 1998.

ZHANG, J.; LIN, X. Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 44-59, 2013.