

Uma rotina metodológica para reconstrução 3D e extração de parâmetros geométricos de edificações em baixo nível de detalhamento a partir de dado LiDAR aerotransportado

Rodolfo Georjute Lotte¹
Cláudia Maria de Almeida¹
Edison Aparecido Mitishita²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Departamento de Sensoriamento Remoto - DSR
Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos - SP, Brasil
{lotte, almeida}@dsr.inpe.br

² Universidade Federal do Paraná – UFPR
Departamento de Geomática
Av. Cel. Francisco H. Santos, 210 – 81.530-900 – Curitiba - PR, Brasil
mitishita@ufpr.br

Abstract.

To understand the principles of an organized urban environment requires the analysis of structural relationships between objects and shapes contained in it. Establish limits of implementation and inappropriate regions growth requires an understanding of its many variations and levels of detail, opening in this way, more accurate alternative to the administration of large cities. Over the years, much effort and progress has been made in the characterization of objects with the advent of remote sensing, by using multispectral, hyperspectral, microwave, among others types of information. More recently, in mid-2004, a new way of imaging, laser sensors enriches the target information by acquiring not only spectral information, but also geometric. In Brazil, due to the richness and abundance of vegetation, the use of structural information has been continuously employed in the forestry sector, such as biomass estimates, characterization of tree species, agriculture and its various aspects, among other. In the urban sector, however, few studies have been carried out, either by lack of data and complete surveys, or the interest of public sectors. three dimensional (3D) building models, generated both from laser sensors as photogrammetric, called structural data, when performed on a large scale, allow a better understanding of geometrical aspects such as form, volume, space occupation and possible environmental impacts. In urban areas, the study of shadows cast by buildings, identification of heat islands, thermal comfort, realistic navigation, tourism, entertainment, urban planning, traffic control, surveillance of irregular buildings, update territorial databases or information of urban trees are examples of areas supported by the use of semantic systems, generated by 3D data analysis. From a given LiDAR airborne data, this work presents a methodological routine for 3D reconstruction of urban space at a low level of detail and, therefore, estimate geometric parameters such as shape, area, volume, location, and height.

Keywords: 3D urban reconstruction, airborne laser scanner, .

1. Introdução

Ambientes urbanizados, atualmente, são constituídos por estruturas complexas e densas de feições naturais e artificiais, com uma imensa variedade de tamanhos, formas, composições e arranjos. A automatização do processo de mapeamento dessas estruturas tornou-se de grande interesse nas últimas décadas (HAALA; KADA, 2010), ora pela demanda em compreender mais facilmente seus diferentes efeitos, ora pela maior disponibilidade de instrumentos no mercado.

Hoje, esses recursos são encontrados facilmente e gratuitamente em escala global, com resoluções espaciais e espectrais elevadas, é o caso de serviços como © Google[®] Street View[™] e © Microsoft[®] Bing[™], que apesar de oferecerem apenas informações gráficas e geométricas, não permitem ainda buscas ou análise semântica dos objetos em cena, tarefa que

vai além da visualização e exploração de paisagens (KOLBE, 2009).

Como recurso aos setores de gestão de cidades e planejamento urbano, duas principais representações gráficas digitais são normalmente utilizadas, as bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Em sensoriamento remoto (SR), as representações 2D compreendem a forma mais comum de visualização do espaço urbano, em que os objetos são sistematicamente monitorados por imagens orbitais ou aerotransportadas e, mais recentemente, por imageamento de curto alcance, normalmente, realizado por sensores ópticos dinâmicos a bordo de automóveis, em que uma sequência de imagens em diferentes ângulos são adquiridas e perfeitamente alinhadas, de forma a proporcionar efeito de estar, de fato, presente na cena.

Na literatura, as abordagens mais comuns envolvendo o levantamento de informações estruturais como edificações, monumentos históricos e outras estruturas elevadas restringem-se no imageamento de curto alcance, a partir da utilização de sensores ópticos (pela técnica de estéreo-par, em inglês, *Multi-View Stereo - MVS*) e laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), que de forma similar, proporcionam diferentes conjuntos de dados, mas com propósitos diferentes. Ambos podem ser adquiridos a bordo de aeronaves não tripuladas (VANTs) ou por estações terrestres. Os dados a serem adquiridos por meio de sensores ópticos, apesar de fornecerem tanto informações espectrais como de estruturais, não são facilmente obtidas devido à necessidade de calibração e registro das imagens. Por outro lado, sensores laser não dispõem de informações espectrais elevadas, porém, tendem a apresentar maior acurácia em suas medidas (LEBERL et al., 2010).

Devido a elevada acurácia geométrica dos dados, os sensores laser para fins topográficos, comumente referenciado como LiDAR (*Ligh Detection And Ranging*), reconduziu a pesquisa da reconstrução 3D¹ urbana para níveis mais sofisticados de processamento, por conseguinte, à geração de modelos 3D com elevada qualidade geométrica (BLAIS, 2004; ROTTENSTEINER et al., 2005).

Modelos 3D de edificações gerados a partir de dados LiDAR, quando realizados em larga escala, permitem compreender melhor aspectos como forma, volume, ocupação do espaço e possíveis impactos ao meio ambiente. Em regiões urbanizadas, o estudo de sombras produzidas por edifícios, identificação de ilhas de calor, conforto térmico (MAIMAITIYIMING et al., 2014; TEWOLDE; CABRAL, 2011), navegação realista, turismo, entretenimento, planejamento urbano, controle de tráfego, fiscalização de construções irregulares, atualização de cadastros territoriais ou informações da arborização urbana (AHMAD; GADI, 2003; ISMAIL, 1996) são exemplos de setores amparados pelo uso de sistemas semânticos, gerados pela análise de dados 3D.

Duas representações 3D são comuns na literatura. A primeira, as de edificações por LiDAR aerotransportado, cuja forma do edifício não apresenta qualquer detalhe de fachada, mas sim, detalhes do topo, como número de águas de telhados, chaminés, aberturas ou jardins internos, varandas, entre outros. A segunda representação, e ainda uma questão científica pouco explorada, são as representações 3D detalhistas (HABIB; ZHAI; KIM, 2010), normalmente, adquiridas por sensores laser terrestres ou por aerotransportados de curto alcance (VANTs).

Portanto, os métodos de reconstrução 3D de cidades costumemente se dividem nesses dois grupos de representações: baixo detalhamento (por dados aéreos) e alto detalhamento (por dados de curto alcance). A disponibilidade de métodos para reconstrução 3D urbana, sobretudo, a de edificações por levantamentos aéreos aderem muitas vezes ao delineamento das formas

¹A reconstrução 3D consiste no processo de transformação de objetos ou cenas do mundo real em representações computacionais tridimensionais, tal que, dependendo da aplicação, o grau de realismo poderá compreender uma maior ou menor precisão geométrica (FORLANI et al., 2003), a qual também é função da capacidade do sensor em discriminar os alvos a serem reconstruídos.

dos telhados (*footprints*²) que, grosseiramente, exprimem a ocupação planimétrica daquele edifício (HAALA; KADA, 2010). No caso de dados terrestres, os métodos de reconstrução 3D de edificações envolvem o reconhecimento de feições em suas fachadas, tais como o delineamento de portas, janelas, sacadas, bordas, beirais e outros que complementam os não imageados adequadamente por sensores aéreos.

A partir de dados LiDAR aerotransportado, o objetivo geral deste trabalho é apresentar uma rotina metodológica para reconstrução 3D de edificações em baixo nível de detalhamento e, a partir disso, extrair parâmetros geométricos de forma, localização, volume, área e altura topográfica.

2. Material e Método

2.1. Área de estudo

A área de estudo deste trabalho é situada na cidade de Recife (Figura 1), capital do estado de Pernambuco, entre os pares de coordenadas 8° 3' S - 34° 54' O e 8° 2' S - 34° 53' O. O município possui cerca de 1.5 milhão de habitantes, totalizando uma área de 218.400km² (IBGE, 2010). A Figura 1 ilustra a posição geográfica do município no país e a delimitação da respectiva área de estudo. A forma de ocupação das regiões urbanas de Recife apresenta-se



Figura 1: Área de estudo. Município de Recife, estado de Pernambuco (PE), e delimitação da área de estudo.

diversificada, com áreas verdes, construções baixas, edifícios residenciais e comerciais.

2.2. Dados de entrada

Será utilizado dado LiDAR aerotransportado adquirido por um sensor modelo Optech ALTM Gemini, com densidade de pontos entre 4 a 8 p/m^2 , dependendo do ângulo de aquisição e plano de voo (quantidade de passagens), adquiridos entre os anos de 2012 e 2013, o que permitirá analisar as estruturas básicas das edificações.

3. Metodologia

Figura 2 ilustra os procedimentos referentes às etapas do desenvolvimento deste estudo, em que os objetos de interesse são adquiridos em nível de detalhamento inferior. Após a aquisição

²Ocupação planimétrica do edifício ou fundação.

do modelo, os parâmetros geométricos de forma, altura, volume, área são então estimados. Considerando, portanto, o fluxo apresentado na figura, as seções seguintes estão organizadas em subetapas, de forma a descrever brevemente o conteúdo de cada um dos procedimentos.

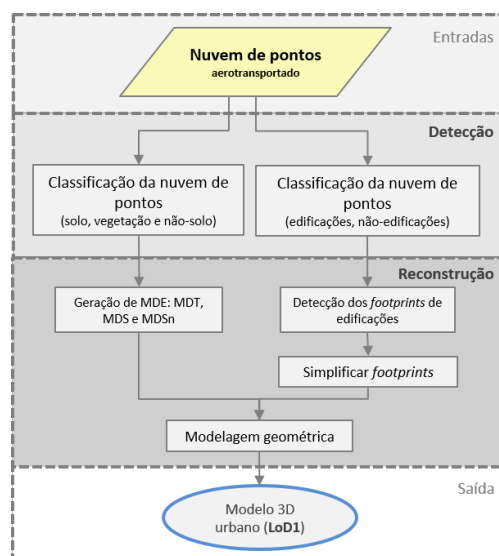


Figura 2: Fluxo metodológico para a reconstrução de edificações em baixo nível de detalhamento.

Todos os procedimentos descritos abaixo foram gerados a partir das ferramentas LAStools (ISENBURG, 2014)³ (pré-processamento e classificação da nuvem de pontos, geração dos MDEs) e QGIS + GRASS⁴ (detecção e simplificação dos *footprints*, modelagem geométrica e extração de parâmetros).

3.1. Classificação da nuvem de pontos

O formato dos dados LiDAR normalmente possuem a extensão LAS (LASer) e aderem às especificações do formato da ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) (SPECIFICATION, 2006). Desta forma, cada um dos pontos na nuvem podem possuir informações que vão além da localização e altura. Alguns arquivos, por exemplo, já trazem consigo uma classificação prévia, realizada semiautomaticamente por *softwares* embarcados, em que utilizam o número de retorno (primeiros, intermediários e últimos retornos) para rotular pontos entre as classes solo e não-solo.

Pontos sobre vegetação arbórea possuem não só um retorno, mas inúmeros (dossel, subosque e solo), por outro lado, edificações são estruturas planas e com formas geométricas bem estabelecidas, assim, pontos sobre essas estruturas consistem em um único retorno. Aplicando-se, desta forma, o conhecimento prévio de cada classe juntamente com o número de retornos inerente ao dado, todas as classes destacadas neste trabalho são classificadas. Na Figura 3 são destacados diferentes grupos de nuvem de pontos após serem classificados.

3.2. Geração de MDE: MDT, MDS e MDSn

Após a classificação dos dados, quatro novos grupos de nuvem de pontos são gerados: solo, vegetação, não-solo e edificações. Os modelos de elevações são gerados a partir dos pontos classificados. O MDT e MDS são gerados respectivamente com a nuvem de pontos de solo e a

³Disponível em: <https://rapidlasso.com/lastools/>. Acesso em: 18 de Novembro de 2016.

⁴Disponível em: http://qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html. Acesso em: 18 de Novembro de 2016.

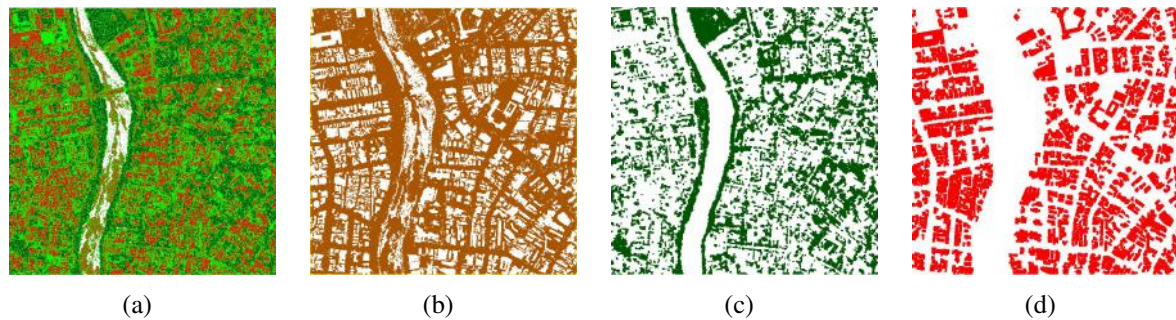


Figura 3: Classificação da nuvem de pontos. (a) Nuvem de pontos completa. (b) Pontos sobre o solo. (c) Pontos sobre vegetação arbórea. (d) Pontos sobre edificações.

nuvem original. O MDS normalizado, na qual é possível verificar a altura real dos objetos em relação ao solo, é gerado a partir da diferença entre os modelos MDT e MDS.

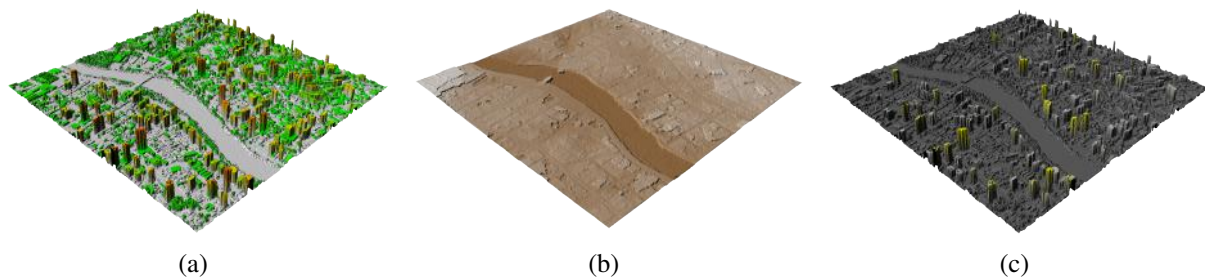


Figura 4: Modelos Digitais de Elevação de Recife-PE. (a) Modelo Digital de Superfície. (b) Modelo Digital de Terreno. (c) Modelo Digital de Superfície Normalizado.

As razões para a geração dos respectivos modelos para o propósito deste estudo são: (i) verificar a real altura dos objetos elevados e que compreende à classe edificações; (ii) a partir do MDT e da nuvem de pontos da classe edificações, gerar o volume simplificado destes.

3.3. Detecção e simplificação dos *footprints* de edificações

Devido a dispersão natural dos pontos nas bordas e beirais dos edifícios, os polígonos apresentam linhas irregulares, em formatos "dente de serra", quase sempre, devido a problemas durante o processo de aquisição (ZHANG; YAN; CHEN, 2006). Considerando que os edifícios em representação 3D são gerados a partir destes polígonos e que o objetivo seja um modelo simplificado, é desejável que suas linhas sejam simplificadas até que seu formato apresente formas aceitáveis para a geração do modelo.

O *footprint* da edificação evidentemente diz respeito somente à respectiva classe. Portanto, o procedimento de delimitação das bordas dos telhados é aplicado somente nesta classe. Todos agrupamentos de pontos são delimitados pelo método de envoltória convexa, ou comumente referenciado em inglês, *convex-hull*, na qual seleciona-se o menor número de pontos em um conjunto X , tal que uma linha conectando cada um dos pontos selecionados seja capaz de envolver completamente todo o conjunto X .

3.4. Modelagem geométrica

Apesar de neste trabalho a modelagem geométrica constituir-se de um procedimento simples, é considerada a etapa mais crítica no processo de geração do modelo 3D urbano. A ideia básica nesta etapa é combinar o MDT ao conjunto de telhados extraídos, de forma a

projetar uma linha vertical a partir das bordas dos telhadas até ao nível do solo. No caso de edificações, o produto da execução deste procedimento é a obtenção da forma primitiva de sua estrutura.

Demais objetos cuja geometria seja constante ou que não apresentem relevância à extração volumétrica dos edifícios, por exemplo, árvores, postes de iluminação, cabines telefônicas, calçamento, objetos móveis, piscinas, entre outros, não demandam a aplicação de operadores computacionais de reconstrução. Nestes casos, são adicionados modelos tridimensionais prévios desses objetos, tal como mostrado por Verdie, Lafarge e Alliez (2015). Considerando um ambiente urbanizado denso como o cidade de Recife, é evidente a possibilidade de encontrar todo e qualquer tipo de forma para um edifício. Neste estudo, entretanto, considerou-se apenas formatos lineares ou poliédricos (BRENNER, 2000).

3.5. Extração de parâmetros geométricos

As características de área, volume, localização e altura são informações essenciais para fins cadastrais, de fiscalização, entre outras habitualmente empregadas. Para a informação de área, simplesmente atribuiu-se a área de cada polígono após o processo de simplificação. Para o parâmetro de altura atribuiu-se o valor médio referente as elevações de cada ponto contidos no respectivo polígono que, uma vez tal informação adquirida, o volume da edificação é simplesmente dado pelo produto entre os parâmetros de área e altura. Para a localização de cada edifício agregou-se as coordenadas centrais de cada polígono. Caso outras geometrias de edificações tivessem sido consideradas, a extração de parâmetros como o de volume para objetos em formas livres ou curvilíneos, por exemplo, deveriam ser especificamente equacionados.

4. Resultados e discussão

Na Figura 5, o que se observa são detalhes quanto a importância da simplificação do polígono referente ao delineamento dos telhados das edificações. Na ilustração à esquerda, uma imagem retirada da aplicação © Google[®] Street ViewTM⁵, exibe os linhas retas dos beirais da edificação. Como mencionado nas seções anteriores, é comum que os pontos sobre beirais (ou a parte mais externa do telhado) não apresentem geometria linear a qual se nota na edificação real. Na ilustração ao centro, o efeito "dente de serra"(linha vermelho em destaque) após a geração do MDS e, logo ao lado, os polígonos antes e depois da simplificação.

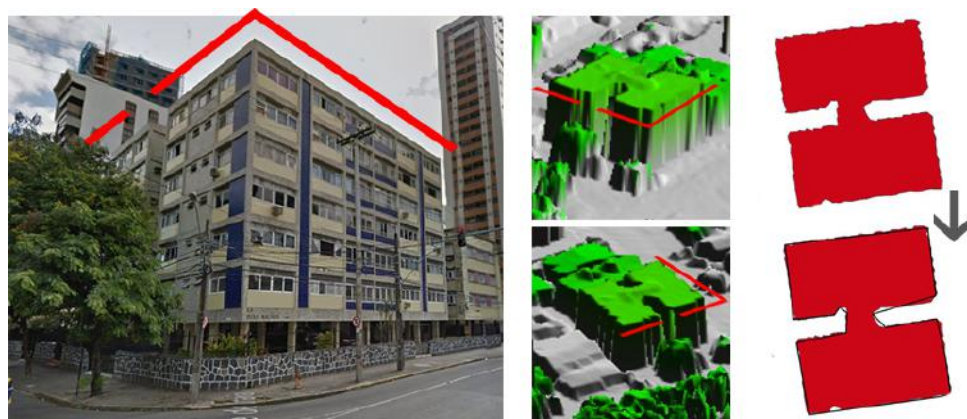


Figura 5: Imagem de edifício em Recife-PE à esquerda, retirada da aplicação © Google[®] Street ViewTM. No centro, modelo 3D gerado sem filtragem. À direita, polígonos gerados pela nuvem de pontos antes e após processo de simplificação (Seção 3.3).

⁵Disponível em <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 18 de Novembro de 2016.

Edifícios baixos, oclusos ou muito próximos à outras edificações são prejudicados no processo de reconstrução. Nestes casos, recomenda-se que a modelagem geométrica seja executada manualmente. Edificações altas ou com recuos maiores, tendem a apresentar uma melhor representação digital e qualidade dos valores geométricos extraídos. Na Figura 6 são destacados um conjunto de edificações na qual são destacados suas inúmeras propriedades, bem como forma e representação tridimensional final. Na Tabela 1, os parâmetros geométricos estimados são enumerados conforme a sequência. Nota-se que algumas das edificações, tais como 4, 5 e 6 na figura, não obtiveram formas fiéis à realidade. Porém, os parâmetros geométricos de altura média e volume apresentaram ainda valores razoáveis.

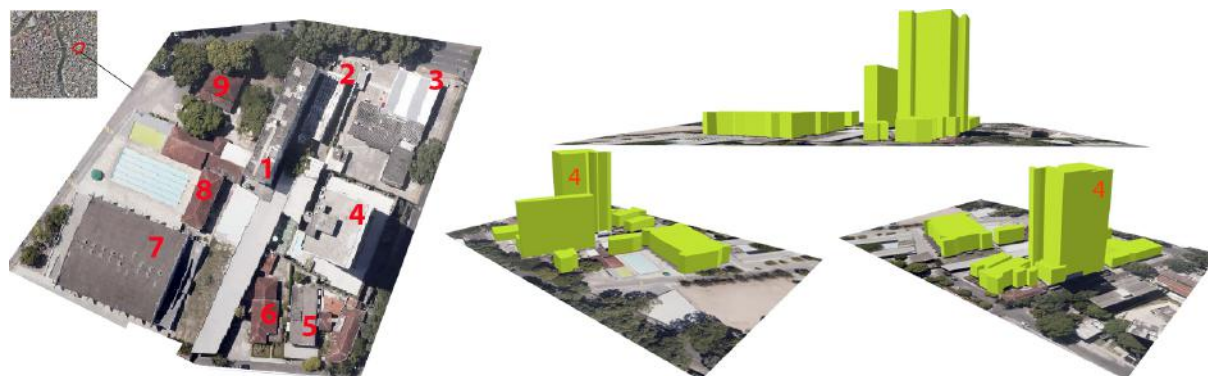


Figura 6: Resultado final. À esquerda, imagem óptica de alta resolução espacial e identificação dos edifícios reconstruídos. À direita, conjunto de edificações em diversas visadas, representadas tridimensionalmente após a execução da metodologia.

Tabela 1: Parâmetros geométricos básicos, extraídos a partir dos objetos 3D reconstruídos.

Edifício	Localização	Área (m ²)	Altura média (m)	Volume (m ³)
1	-8.0452, -34.8995	325, 52	22, 38	7285, 13
2	-8.0451, -34.8993	171, 95	6, 38	1097, 04
3	-8.0452, -34.8991	596, 30	4, 28	2552, 16
4	-8.0455, -34.8993	575, 24	35, 88	20639, 61
5	-8.0458, -34.8994	300, 14	6, 17	1851, 86
6	-8.0458, -34.8995	170, 59	5, 19	885, 36
7	-8.0456, -34.9000	1277, 18	7, 47	9540, 53
8	-8.0454, -34.8997	140, 33	6, 84	959, 85
9	-8.0451, -34.8997	116, 59	6, 86	799, 80

Assim como a estimativa de volume, outros parâmetros geométricos poderiam também ser estimados, por exemplo, valores de volume mais aproximados conforme sua altura e quantidade de andares, estimativa populacional baseando-se no cálculo deste volume, como realizado por Tomás et al. (2016), entre outros.

5. Considerações finais

Este trabalho apresentou uma metodologia para a reconstrução 3D e extração de parâmetros geométricos de edificações na cidade de Recife-PE pelo uso de dado LiDAR aerotransportado. Os parâmetros geométricos extraídos da nuvem de pontos não foram confrontados com dados de referência devido tempo hábil à este tipo de informação.

Ferramentas muito bem fundamentadas como Google Maps, Microsoft Bing e Apple iOS Maps, já oferecem bons produtos em termos de visualização e representação 3D do espaço urbano. Entretanto, o que se busca em estudos como este, é avançar no desenvolvimento de

rotinas autônomas para a reconstrução de ambientes urbanos a partir de dados de sensoriamento remoto, priorizando não só a visualização como também a precisão geométrica de cada objeto, além disso, permitir a difusão de sistemas semânticos com o uso de informações 3D destes ambientes, bem como cadastros territoriais e demais aplicações para auxílio à administração urbana.

Além da estrutura primitiva das edificações, espera-se como estudo futuro a reconstrução 3D em níveis mais elevados de detalhamento, como o número de águas de telhados, informações volumétricas e espectrais de fachadas, entre outros. Em levantamentos de longo alcance realizado por aeronaves tripuladas, dependendo da geometria de aquisição e do recuo em que cada edificação apresenta em relação umas as outras, a possibilidade do imageamento de suas fachadas é maior. Porém, os pontos sobre suas fachadas a partir deste tipo de levantamento e geometria são inúteis para análise detalhada de fachadas. Para tanto, é necessário recorrer ao imageamento de curto alcance, sensores a bordo de plataforma terrestres, fixas (por exemplo, estação total) ou dinâmicas (por exemplo, automóveis e aeronaves não tripuladas (drones ou VANTs)).

Por fim, modelos de edificações com formatos livres, tais como monumentos históricos, arquiteturas contemporâneas ou modernas, telhados com diferentes estruturas, a falta de exploração de temas como a interoperabilidade e armazenamento dos modelos 3D, entre outros fatores, consolidam este tema como incipiente e de alta relevância acadêmica.

Agradecimentos

Os autores agradecem, primeiramente, o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Pelo fornecimento dos dados, agradecemos gentilmente ao professor Dr. Leonardo Ercolin Filho, professor permanente no Departamento de Geodésia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba-PR, pelo fornecimento do dado LiDAR. À Secretaria de Planejamento Urbano de Recife-PE, pelo fornecimento da imagem óptica (ortofoto).

Referências

- AHMAD, A.; GADI, M. Simulation of solar radiation received by curved roof in hot-arid regions. In: *Proceedings Building Simulation 2003, Eighth International IBPSA Conference*. [S.l.: s.n.], 2003.
- BLAIS, F. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, v. 13, n. 1, p. 231–240, 2004.
- BRENNER, C. Towards fully automatic generation of city models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, International Society for Photogrammetry & Remote, v. 33, n. B3/1; PART 3, p. 84–92, 2000.
- FORLANI, G. et al. Building reconstruction and visualization from LiDAR data. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, NATURAL RESOURCES CANADA, v. 34, n. 5/W12, p. 151–156, 2003.
- HAALA, N.; KADA, M. An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, v. 65, n. 6, p. 570–580, 2010.
- HABIB, A. F.; ZHAI, R.; KIM, C. Generation of complex polyhedral building models by integrating stereo-aerial imagery and lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, v. 76, n. 5, p. 609–623, 2010.
- IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/>>.
- ISENBURG, M. *LAStools*. Germany, 2014. Disponível em: <<http://rapidlasso.com/lastools/>>.
- ISMAIL, A. M. *Wind Driven Natural Ventilation in High-Rise Office Building With Special Reference To The Hot-Humid Climate of Malaysia*. Tese (Doutorado) — PhD, Thesis, University of Wales College of Cardiff, 1996.
- KOLBE, T. H. Representing and exchanging 3d city models with citygml. In: *3D geo-information sciences*. Seoul, Korea: Springer, 2009. cap. 2, p. 15–31.
- LEBERL, F. et al. Point clouds. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, v. 76, n. 10, p. 1123–1134, 2010.
- MAIMAITIYIMING, M. et al. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, v. 89, p. 59–66, 2014.
- ROTTENSTEINER, F. et al. Using the Dempster-Shafer method for the fusion of LiDAR data and multi-spectral images for building detection. *Information Fusion*, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 283–300, 2005.
- SPECIFICATION, L. *ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard Version 1.1*. 2006.
- TEWOLDE, M. G.; CABRAL, P. Urban sprawl analysis and modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing*, Molecular Diversity Preservation International, v. 3, n. 10, p. 2148–2165, 2011.
- TOMÁS, L. et al. Urban population estimation based on residential buildings volume using ikonos-2 images and lidar data. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 37, n. sup1, p. 1–28, 2016.
- VERDIE, Y.; LAFARGE, F.; ALLIEZ, P. *LOD Generation for urban scenes*. [S.l.], 2015.
- ZHANG, K.; YAN, J.; CHEN, S.-C. Automatic construction of building footprints from airborne LiDAR data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 44, n. 9, p. 2523–2533, 2006.