

MODELAGEM GEOMÉTRICA DE CIDADES A PARTIR DE NUVENS DE PONTOS¹

*Natalie Johanna Groetelaars²
Adaildes Moreira do Nascimento³
Arivaldo Leão de Amorim⁴*

Resumo: São tratados, neste artigo, diferentes métodos de modelagem geométrica de cidade a partir do processamento de nuvens de pontos. Inicialmente, é apresentada uma revisão de literatura sobre aplicações de modelos digitais tridimensionais de cidade, níveis de detalhe, sistemas para aquisição de dados, e métodos para geração e processamento de nuvem de pontos. Na sequência, apresentam-se e discutem-se os experimentos realizados para a geração do modelo geométrico texturizado de um trecho do Centro Histórico de Salvador – BA, envolvendo desde a tomada fotográfica (terrestre e aérea), a geração de nuvem de pontos por processamento digital das fotografias, até as fases finais de modelagem geométrica e aplicação de texturas fotorrealísticas. Com relação à modelagem geométrica, são testados diferentes processos e ferramentas a partir de métodos interativos de trabalho sobre a nuvem de pontos, e realizados testes iniciais com programas específicos para automatização do processo de geração de modelos de superfície das edificações.

Palavras-chave: modelagem geométrica, fotogrametria digital, nuvem de pontos, Centro Histórico de Salvador.

Abstract: This article approaches different methods of generation of 3D city geometric models from point cloud processing. Initially, we present a literature review on 3D city models applications, levels of detail, data acquisition systems, and methods for generating and processing point clouds. Then, we present and discuss the experiments performed for the generation of the textured geometric model of a part of the Historic Center of Salvador – BA, involving since the photographic survey (terrestrial and aerial), the generation of point cloud by digital processing of photographs until the final stages of geometric modeling and application of photorealistic textures. Regarding to geometric modeling, different processes and tools are tested using interactive methods of work on the point cloud, and initial tests are carried out with specific programs for automating the process of generating building surface models.

Keywords: geometric modeling, digital photogrammetry, point cloud, Historic Center of Salvador.

¹ Versão expandida do artigo publicado nos Anais do Graphica 2019.

² Universidade Federal da Bahia (UFBA), Faculdade de Arquitetura, natgroet@ufba.br

³ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Faculdade de Arquitetura, adaildes.mn@gmail.com

⁴ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Faculdade de Arquitetura, alamorim@ufba.br

1 Introdução

A demanda por modelos digitais tridimensionais de cidades tem aumentado significativamente nos últimos anos, para os mais variados usos, como planejamento urbano, turismo, prevenção e gerenciamento de desastres, além de diversos tipos de simulações. A geração de modelos geométricos precisos de extensas áreas é uma atividade que demanda uma significativa quantidade de trabalho, constituindo um importante tema para investigação e que tem atraído a atenção de diversos pesquisadores, na busca de processos mais eficazes e precisos.

Os métodos tradicionais de aquisição de dados e de representação de edificações e de cidades (como o uso de plantas cadastrais urbanas obtidas por restituição aerofotogramétrica convencional ou o uso de métodos topográficos) apresentam uma série de limitações, principalmente quando se trata de objetos complexos e de grandes dimensões ou de extensas áreas urbanas, resultando em um processo lento, de custo elevado, e geralmente pouco preciso.

Atualmente, dentre as técnicas digitais para levantamento de formas existentes, destacam-se os sistemas de varredura, que permitem gerar nuvem de pontos, um tipo de modelo geométrico formado por pontos, cada um representado por suas coordenadas cartesianas (x, y, z) e um ou mais atributos associados ao mesmo.

Os principais sistemas de varredura utilizados para documentação arquitetônica e urbana são:

- *3D Laser Scanning* – que permite gerar, de modo automatizado, nuvens de pontos a partir do escaneamento a laser, realizado por equipamentos estáticos ou dinâmicos; e
- *Dense Stereo Matching (DSM)* – processamento digital de fotografias realizado por programas específicos para restituição fotogramétrica automatizada.

Essas tecnologias representam o estado da arte em relação à aquisição de dados geométricos de edificações e cidades, apresentando diversas vantagens em relação aos métodos convencionais, como rapidez e precisão no registro de grande quantidade de informações armazenadas no modelo de nuvem de pontos.

Entretanto, para que o modelo seja adequado à maioria das aplicações, é necessário realizar a etapa de pós-processamento da nuvem de pontos, visando gerar diversos produtos, como desenhos, modelos geométricos (sólidos ou de superfície) texturizados ou não, modelos físicos etc. Dentre esses produtos, no contexto da modelagem urbana tridimensional, destacam-se os modelos simplificados de superfície,

pelos reduzidos tamanhos de arquivos e pela grande quantidade de aplicações associadas a esse tipo de modelo.

O foco deste artigo é abordar e discutir diferentes métodos para a geração de modelos geométricos simplificados de edificações, a partir do pós-processamento de nuvens de pontos. São apresentados experimentos realizados para a geração do modelo geométrico texturizado de um trecho do Centro Histórico de Salvador – BA, envolvendo desde a tomada fotográfica, a geração de nuvem de pontos por processamento digital das fotografias, até o pós-processamento da nuvem de pontos, por métodos interativos e automatizados.

2 Revisão da literatura

Apresenta-se a seguir a revisão bibliográfica realizada sobre o tema, trazendo questões como: (1) modelos geométricos de cidade – aplicações e níveis de detalhe; (2) métodos para aquisição dos dados geométricos, e (3) métodos para geração de modelos simplificados de superfície para representação de edificações existentes.

2.1 Modelos geométricos de cidade – aplicações e níveis de detalhe

Com o avanço das tecnologias digitais, foram desenvolvidos novos modos de registro dos objetos existentes, como os modelos geométricos (3D) de edificações ou de cidades. A representação tridimensional dos objetos, além de permitir a compreensão visual das formas de maneira mais intuitiva e completa, possibilita adicionar uma série de dados semânticos (como ano de construção, tipo de uso, estado de conservação, dados históricos etc.), ampliando suas possibilidades de aplicações e facilitando a tomadas de decisões (KEMEC; ZLATANOVA; DUZGUN, 2010).

Os modelos geométricos de cidade vêm adquirindo cada vez mais importância em aplicações voltadas à melhoria da gestão urbana, não se limitando apenas à visualização espacial (geométrica e geográfica), mas também podendo ser usados para o armazenamento e análise de dados semânticos associados. Esses modelos podem ser utilizados para diversas finalidades (HRON; HALOUNOVÁ, 2014; ÁLVAREZ *et al.*, 2018; BUYUKDEMIRCIOLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018):

- Planejamento urbano;
- Monitoramento ambiental (poluição do ar, propagação do ruído de tráfego etc.);
- Realização de diversos tipos de simulação (incidência solar, inundações, incêndio etc.);
- Apoio à prevenção e ao gerenciamento de desastres;

- Planejamento de cidades energeticamente eficientes;
- Estudo da propagação de ondas eletromagnéticas para aplicações em telecomunicações;
- Gestão e manutenção de instalações, edifícios e cidades;
- Desenvolvimento de plataformas *smartcity* para a gestão urbana;
- Documentação arquitetônica e urbana;
- Sistemas para a gestão e conservação do patrimônio arquitetônico e de centros históricos;
- Aplicações voltadas ao turismo;
- Aplicações em ambientes de realidade virtual e aumentada; e
- Impressão 3D, visando a geração de maquetes (modelos físicos em escala reduzida).

O nível de detalhe utilizado na representação de modelos geométricos de cidade varia de acordo com sua finalidade. O CityGML (*City Geography Markup Language*), estabelecido pela *Open Geospatial Consortium* (OGC) em 2008, é um padrão internacional e neutro, que vem sendo utilizado em todo o mundo para a representação digital tridimensional de cidades em cinco níveis de detalhe (*Level of Detail – LOD*), variando do mais simples, LOD 0, ao mais detalhado, LOD 4:

- LOD 0 – consiste na representação da superfície do terreno, e as edificações são representadas pelos seus contornos (*building footprints*);
- LOD 1 – representa as edificações de modo simplificado, como prismas gerados a partir da extrusão dos perímetros das mesmas;
- LOD 2 – inclui a representação das coberturas das edificações, sendo comum a aplicação das foto-texturas para aumentar o realismo das fachadas;
- LOD 3 – representa um modelo detalhado do exterior das edificações, incluindo saliências e vazios, como varandas, portas, janelas etc.; e
- LOD 4 – consiste na representação completa da edificação, contemplando também seu interior.

2.2 Métodos para aquisição de dados geométricos

Diversos métodos podem ser utilizados para aquisição de dados visando à modelagem geométrica de objetos, variando em função de fatores como, tempo e precisão do levantamento, características do objeto ou da área de interesse (tamanho, extensão, complexidade da geometria, material), finalidade e grau de sofisticação do modelo.

Álvarez e colaboradores (2018) tratam do processo de geração de modelos geométricos de cidades, subdividindo-o em dois grandes grupos: (1) os métodos que utilizam dados existentes para a modelagem e (2) os que utilizam dados novos.

No primeiro grupo, pode-se citar o uso de plantas cadastrais ou de imagens de satélite como base para uma modelagem simplificada, ou o uso de programas com bibliotecas de tipos de edificações. No segundo grupo de processos, que partem de dados novos, podem-se citar os métodos que permitem gerar modelos geométricos pela restituição fotogramétrica (interativa ou automatizada) ou pela varredura a laser.

Dentre os principais produtos primários dessas técnicas, destacam-se os modelos de superfície texturizados, gerados pela Fotogrametria digital *stricto sensu* (métodos interativos), e os modelos de nuvens de pontos produzidos pelo processamento digital de fotografias (*Dense Stereo Matching* - DSM) ou pela varredura a laser.

A grande vantagem do DSM e da varredura a laser é a rapidez na aquisição de grande quantidade de dados, pois são usados processos automatizados para geração da nuvem de pontos. Comparando os dois métodos, o DSM destaca-se pelo baixo custo, pois requer, basicamente, o uso de câmera digital (posicionada próxima ao objeto, ou aerotransportada em drones) e um computador com software específico para o processamento das imagens fotográficas. Já a varredura a laser destaca-se pela maior rapidez na aquisição de dados, pois as nuvens de pontos são geradas em tempo real no campo.

Apesar das potencialidades e vantagens desses métodos, em ambos os casos, é necessário realizar a etapa de pós-processamento, dadas as limitações do modelo de nuvem de pontos: grandes tamanhos de arquivos, dificuldade de visualização, problemas para importação em diversos programas, limitação de aplicações diretas etc.

O pós-processamento das nuvens de pontos permitirá a geração de uma grande quantidade de produtos, adequada para várias aplicações, como: desenhos, ortofotos, modelos geométricos de superfície, malha triangular irregular e outros produtos derivados (GROETELAARS, 2015). Em se tratando de modelos numéricos tridimensionais de cidade, destacam-se os modelos simplificados de superfície, pelas características já tratadas anteriormente.

2.3 Métodos para geração de modelos simplificados de superfícies

A escolha do método para a modelagem geométrica varia de acordo com diversos fatores, como finalidade do modelo, precisão requerida, tempo, mão de obra e recursos tecnológicos e financeiros disponíveis, podendo ser empregados métodos mais interativos ou mais automatizados.

Dentre as técnicas mais interativas, podem-se citar a modelagem simplificada através do uso de fotos oblíquas de fachadas, como o recurso Match Photo do Sketchup, e a modelagem partir da utilização de ortofotos.

O recurso Match Photo do Sketchup consiste em importar uma fotografia oblíqua tomada de um objeto e associar os três eixos (x, y e z) às arestas visíveis do mesmo (que corresponderão à linhas paralelas e ortogonais do objeto fotografado). Dessa forma, o programa consegue recuperar a visualização em perspectiva igual a da foto, possibilitando ao usuário realizar a modelagem sobre a fotografia (como pano de fundo) e, posteriormente, aplicar a foto-textura sobre os planos criados. Vale ressaltar que esse processo não é adequado para geração de modelos precisos, não pode ser utilizado em formas mais complexas e irregulares, nem com angulações diferentes de 90 graus (pois não permitiria fazer a associação com os eixos cartesianos).

Com relação à modelagem de edificações através de ortofotos, podem-se citar os experimentos descritos por Koehl *et al.* (2008). Esses autores citam o processo de geração das ortofotos das fachadas no PhotoModeler (programa para Fotogrametria digital), que são usadas posteriormente para servirem de referência de modelagem geométrica de edificações no Sketchup (Figura 1): parte-se de um prisma envoltório - forma geral (a), aplicam-se as ortofotos nas faces do prisma, fazendo-se a correspondência entre elas (b), realiza-se o traçado das feições de interesse sobre as ortofotos, definindo-se as fachadas principais (c); até chegar à forma final, refinada (d).

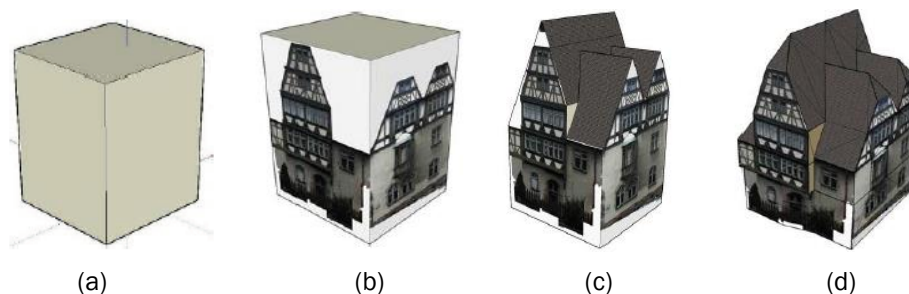


Figura 1 – Modelagem a partir de ortofotos

Fonte: Adaptado de Koehl *et al.* (2008).

Dentre as técnicas mais automatizadas de modelagem geométrica, podemos citar os exemplos apresentados pelos autores Hron e Halounová (2014) e Buyukdemircioglu, Kocaman e Isikdag (2018).

Hron e Halounová (2014) realizaram experimentos para verificar os resultados obtidos a partir de processos automatizados de segmentação e modelagem geométrica sobre a nuvem de pontos de uma área urbana da República Tcheca (Figura 2a), gerada por varredura a laser aerotransportada (*Airborne Laser Scanning* – ALS). O processo

de segmentação realizado no software ENVI LiDAR permitiu classificar os elementos contidos na nuvem de pontos, separando as edificações do terreno (Figura 2b). A etapa de modelagem consistiu na criação de primitivas geométricas (planos) que melhor se ajustassem aos pontos da nuvem de pontos classificados como “edificações” (Figura 2c). Ao final dos experimentos, os autores concluíram que houve uma diferença significativa na qualidade dos produtos gerados em função da densidade da nuvem de pontos, tanto no que se refere à classificação dos dados, quanto à modelagem. Os bons resultados puderam ser obtidos somente quando a densidade da nuvem de pontos era mais elevada, a partir de 20 pontos por metro quadrado (o que daria um afastamento de aproximadamente 20 a 23 cm entre pontos), o que não é comum em um levantamento ALS.

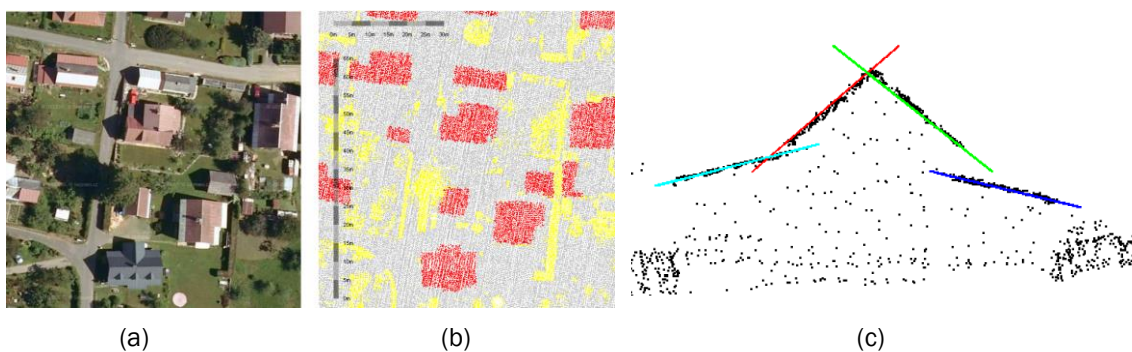


Figura 2 – (a) Foto de uma área urbana da República Tcheca; (b) Segmentação da nuvem de pontos (em cinza, o terreno; em vermelho, as edificações; em amarelo, outras áreas não classificadas); (c) Ajuste automático de primitivas geométricas (planos) sobre a nuvem de pontos

Fonte: Adaptado de Hron e Halounová (2014).

Buyukdemircioglu, Kocaman e Isikdag (2018) descrevem o método utilizado para geração do modelo geométrico de uma cidade na Turquia, com uso do software BuildingReconstruction. A modelagem em LOD 2 é realizada a partir de processos semi-automáticos, tomando como base os contornos das edificações (*building footprints* gerados anteriormente) e as nuvens de pontos produzidas por processamento digital de fotos aéreas. O BuildingReconstruction permite fazer a associação entre a geometria da edificação/telhado presente no modelo de nuvem de pontos e sua correspondente em uma biblioteca com 32 tipos de telhados (Figura 3) disponíveis no programa. Ao final dos experimentos, os autores identificaram como principais vantagens do método, a rapidez na criação de modelos em LOD1 e LOD2 de extensas áreas e a possibilidade de exportação direta para o formato CityGML. Dentre as limitações, destacaram que o processo de reconstrução da geometria é limitado à biblioteca existente do programa,

não sendo adequado para a criação de edificações com formas detalhadas e complexas.

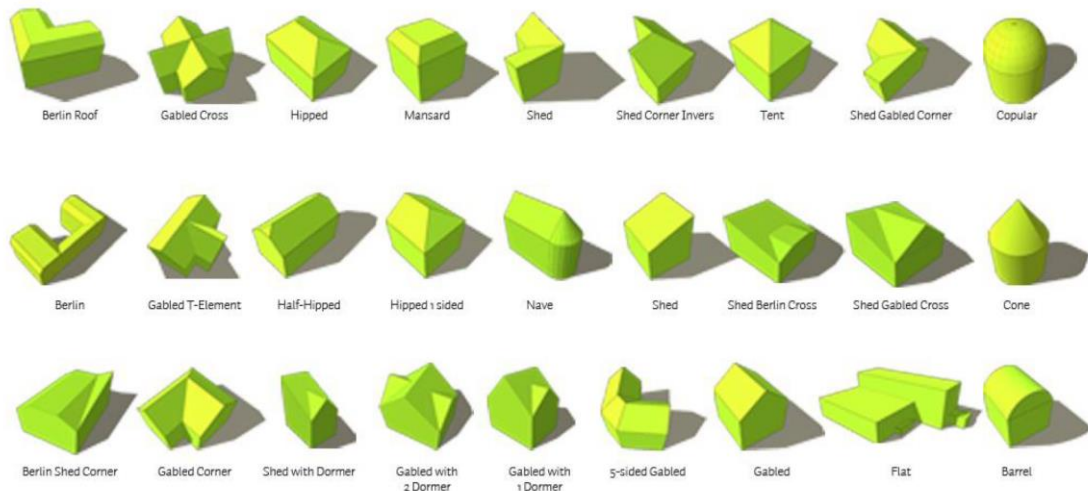


Figura 3 – Exemplo da biblioteca de tipos edificações/telhados presentes no software BuildingReconstruction

Fonte: Buyukdemircioglu, Kocaman e Isikdag (2018).

Diante do exposto, verifica-se que existem diversos métodos para a geração de modelos geométricos de cidade, com diferentes características. No entanto, ressalta-se a importância de se realizar novos experimentos, que permitam o desenvolvimento de métodos mais eficazes para a geração de modelos digitais tridimensionais de cidade, que utilizem menor tempo, custo e recursos, mas que garantam a elevada qualidade dos produtos gerados (precisão e qualidade fotorrealística) e uma maior flexibilidade de uso.

Serão descritos, a seguir, os experimentos realizados no Centro Histórico de Salvador – BA, que consistem na geração do modelo geométrico de um trecho do Pelourinho, a partir de métodos interativos e, na sequência, são apresentados novos estudos, na busca por processos mais automatizados de modelagem.

3 Experimentos realizados

Descrevem-se, a seguir, os processos de geração do modelo geométrico texturizado de um trecho do Pelourinho, localizado no Centro Histórico de Salvador – BA.

O trabalho iniciou-se com o levantamento fotográfico de três quadras do Pelourinho. As fotos foram usadas para geração de nuvens de pontos e ortofotos, produtos que foram novamente processados para geração do modelo geométrico fotorrealístico da área. As principais etapas de trabalho estão ilustradas na Figura 4.



Figura 4 – Principais etapas realizadas nos experimentos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Foram experimentados três diferentes métodos para geração dos modelos de superfícies das edificações: dois processos mais interativos e um processo utilizando ferramentas para automatização da modelagem a partir das nuvens de pontos. As diferenças mais significativas entre os fluxos de trabalho testados referem-se à etapa “4. Modelagem geométrica”. As próximas seções detalham essas etapas.

3.1 Tomada fotográfica

O trabalho em campo consistiu no registro fotográfico terrestre, com fotos tomadas próximas às edificações; e no levantamento fotográfico aéreo, através de câmera digital acoplada a um drone.

A tomada fotográfica terrestre foi realizada através da câmera Nikon D300, lente 12 mm, e da câmera Nikon D610, lente 18 mm, obtendo fotos com resolução de 4288 x 2848 *pixels* e 3.936 x 2.624 *pixels*, respectivamente. O levantamento aéreo foi efetuado por meio do drone modelo Phantom 4 Pro (fabricante DJI), com câmera digital acoplada, lente de 4 mm e gerando fotos com resolução de 4.000 x 3.000 *pixels*.

3.2 Geração das nuvens de pontos e ortofotos

Depois do levantamento fotográfico, iniciou-se, em escritório, a restituição fotogramétrica das imagens no Agisoft Photoscan (a versão atual é denominada Agisoft Metashape). Foram processadas inicialmente as fotos aéreas, depois as fotos terrestres, em processos separados.

O Agisoft Photoscan trabalha com a técnica *Dense Stereo Matching* (DSM), realizando o processamento automatizado das fotografias visando a geração de modelos do tipo nuvem de pontos ou malha triangular irregular (*Triangular Irregular Network – TIN*).

As etapas principais de processamento realizadas no Photoscan foram: geração da nuvem esparsa (a partir da detecção e correlação automática de feições homólogas nas fotos), geração da nuvem de pontos densa (refinamento da etapa anterior), criação da malha triangular irregular (malha TIN) na cor sólida, geração da malha TIN texturizada e, por fim, a geração das ortofotos.

O processamento das fotos terrestres teve por finalidade a obtenção das ortofotos das fachadas das edificações, e o processamento das fotos aéreas visou a geração do modelo de nuvem de pontos geral da área (contemplando edificações, passeios e ruas) e as ortofotos dos telhados.

3.3 Edição das ortofotos

Algumas ortofotos geradas pelo Photoscan apresentaram resultados insatisfatórios, em boa parte devidos a problemas ocorridos durante a tomada fotográfica. A presença de edificações de altura elevada em ruas estreitas dificultava o registro adequado das mesmas. Além disso, a existência de diversos elementos na frente das fachadas, como cartazes, faixas, objetos expostos à venda e esquadrias abertas, exigiram uma etapa cuidadosa de edição das imagens.



Figura 5 – (a) Ortofoto gerada no Photoscan (b) Ortofoto editada no Photoshop e com a substituição de grades e janelas geradas no PhotoModeler

Fonte: Elaborado por Adaildes Moreira, Kyane Bomfim, Luana Micaela e Nicole Guerra em 2018.

Foi necessário fazer algumas correções nas ortofotos em programas de edição de imagem, para complementação de áreas sem informação (vazios nas imagens) ou com texturas incompletas/distorcidas. Na maior parte dos casos, foram usados somente editores de imagem, como o Adobe Photoshop e o GIMP. Em algumas situações, foi necessário utilizar outro programa para fotogrametria, o PhotoModeler, visando a geração de fotos retificadas através da monorrestituição, processo interativo em que se realiza o processamento de uma única fotografia (GROETELAARS, 2015). A monorrestituição foi usada para criação das texturas de portas, janelas e grades que apresentavam problemas. Um exemplo disso pode ser visto na Figura 5, em que houve a substituição das texturas das esquadrias superiores da ortofoto produzida pelo Photoscan, pelas fotos retificadas das esquadrias geradas pelo Photomodeler.

A partir da geração do modelo de nuvem pontos e das ortofotos (originais e editadas), foi realizada a modelagem geométrica de um trecho do Pelourinho através de três métodos distintos. Foram testados diferentes processos e ferramentas a partir de métodos interativos de trabalho sobre a nuvem de pontos, e realizados testes iniciais com programas específicos para automatização da modelagem geométrica.

3.4 Modelagem geométrica e texturização

Nos dois primeiros métodos, mais interativos, a modelagem iniciou-se no programa AutoCAD, sendo necessário realizar a conversão da nuvem de pontos gerada pelo Photoscan em formato de arquivo LAS, para o formato .RCS ou .RCP, através do programa Autodesk ReCap Pro, em razão do formato .LAS não ser aceito pelo AutoCAD.

O primeiro método adotado (MÉTODO 1) consistiu na criação de contornos (horizontais e verticais) a partir da visualização sobre a nuvem de pontos no AutoCAD. Essa seria uma forma de permitir a modelagem geométrica no Sketchup, uma vez que os contornos poderiam ser importados diretamente no programa, ao contrário da nuvem de pontos, que só poderia ser importada com uso de *plugin* (licença comercial).

O segundo método (MÉTODO 2) consistiu em realizar a modelagem geométrica completa diretamente no AutoCAD, permitindo visualizar e comparar os dois modelos sobrepostos (nuvem de pontos original e o modelo geométrico resultante).

O fluxo completo de trabalho dos dois primeiros métodos empregados (mais interativos) está ilustrado na Figura 6. Ressalta-se que foram adotados dois métodos de modelagem geométrica (cores verde e azul, referentes aos métodos 1 e 2, respectivamente), que serão descritos a seguir, junto às outras etapas realizadas. A cor amarela representa as etapas que foram comuns aos diversos métodos, que compreende a aquisição de dados (geração das nuvens de pontos e ortofotos no software Agisoft Photoscan) e a finalização do modelo, de aplicação de texturas no Sketchup.

No terceiro método, foram usadas as ferramentas Mapple e Polyfit, visando verificar os processos e resultados que podem ser obtidos por métodos automatizados de geração de modelos simplificados de superfícies. Foram feitos testes em algumas edificações, utilizando-se a nuvem de pontos gerada pela processamento das fotos aéreas.

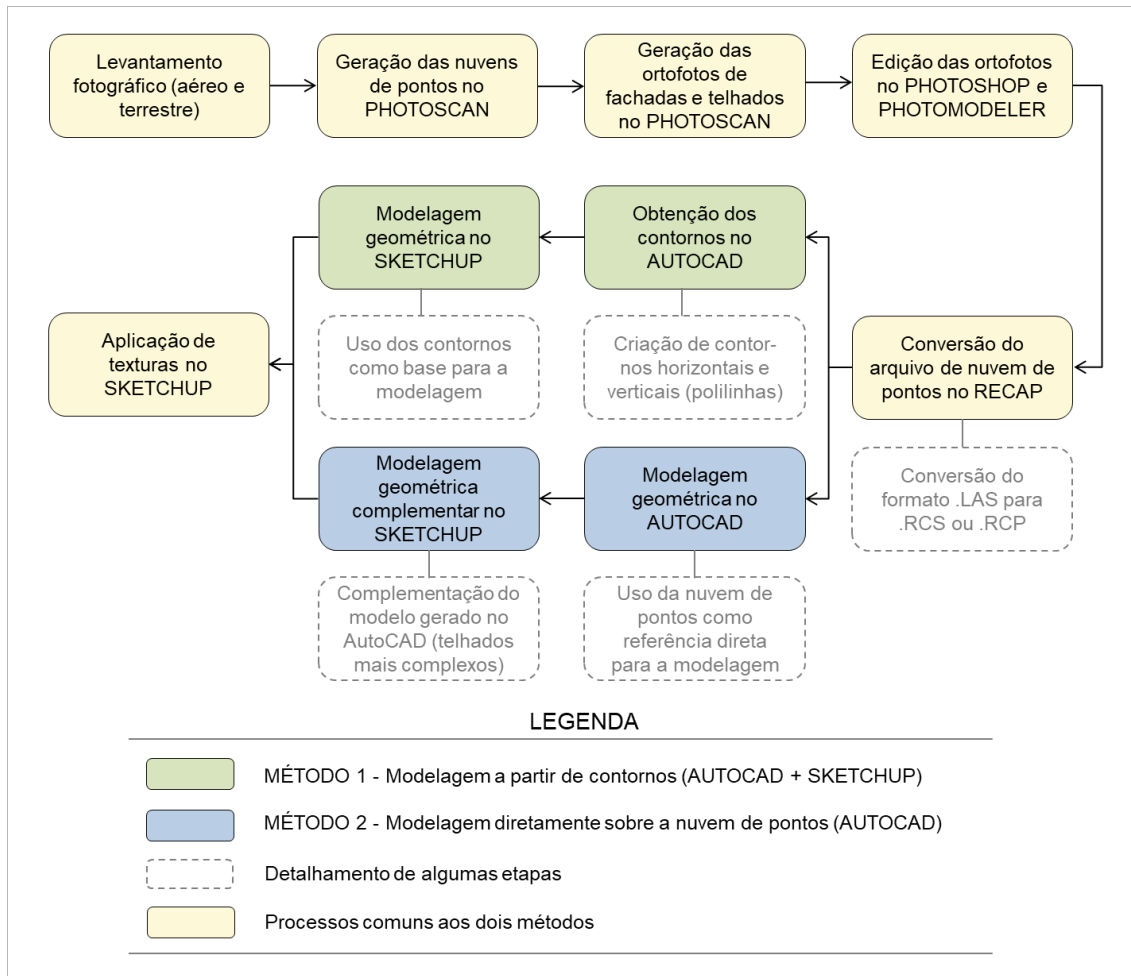


Figura 6 – Fluxo de trabalho dos métodos mais interativos (métodos 1 e 2)

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.4.1 Método 1: modelagem geométrica no SketchUp a partir de contornos criados no AutoCAD

A obtenção dos contornos das edificações, seções horizontais (*footprint*) e verticais, foi realizada a partir da visualização de estreitas faixas de nuvens de pontos no AutoCAD.

Para realizar esse procedimento, foi necessário criar um sistema de coordenadas do usuário (*User Coordinate System - UCS*), permitindo definir o plano XY paralelo a cada fachada (ver na Figura 7a o símbolo do UCS paralelo a uma fachada). Desse modo foi possível realizar o alinhamento entre o plano vertical de corte e a representação do perfil vertical da edificação.

Após obter esse alinhamento entre planos, é realizado o fatiamento da nuvem de pontos e estabelecida uma pequena profundidade de corte (de forma a suprimir informações posteriores), permitindo visualizar somente o contorno do objeto, para

posterior realização da vetorização interativa sobre a nuvem de pontos (Figura 7b). Outro procedimento adotado foi a criação de um *layer* para cada contorno, com o objetivo de facilitar a modelagem a ser realizada posteriormente no SketchUp.

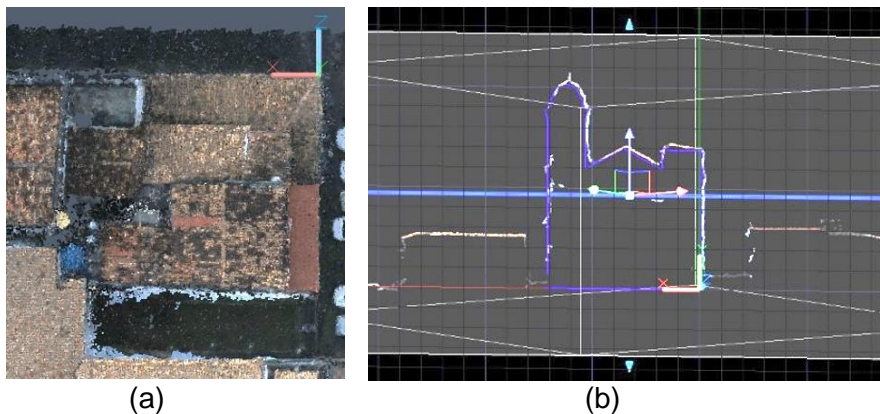


Figura 7 – (a) UCS criado paralelo à fachada de interesse; (b) elaboração do contorno vertical (polilinha em azul escuro) a partir de fatiamento da nuvem de pontos

Fonte: Groetelaars e Nascimento (2019).

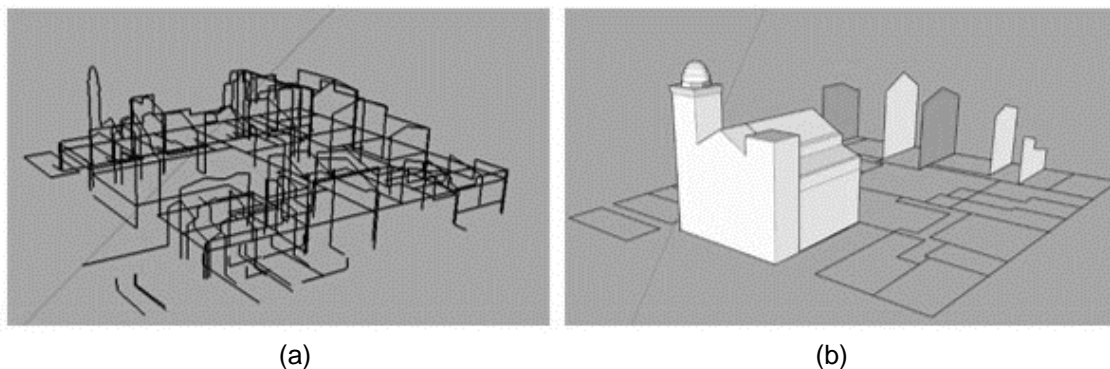


Figura 8 – (a) Contornos importados para o Sketchup (b) Criação de faces e modelagem geométrica dos volumes principais no Sketchup

Fonte: Groetelaars e Nascimento (2019).

A partir dos contornos gerados no AutoCAD, foi possível realizar a importação dos mesmos para o SketchUp (Figura 8a), para iniciar a etapa de definição das faces e a modelagem geométrica dos volumes principais (Figura 8b).

A modelagem das edificações no SketchUp iniciou-se com a extrusão dos contornos verticais das edificações. Como as edificações do Pelourinho apresentam paredes com diferentes inclinações, foi necessário criar planos auxiliares e diferentes sistemas de coordenadas, para permitir a realização dos ajustes no modelo, de modo a eliminar as partes excedentes geradas após a extrusão dos perfis verticais, que nem sempre coincidiam com o contorno horizontal (devido à falta de esquadro e prumo das paredes).

Durante a modelagem geométrica ocorreram problemas em casas que possuíam paredes e/ou coberturas mais complexas e irregulares, o que acabou gerando formas

com triângulos internos (devido à presença de superfícies não planas). Na sequência, para não haver problemas na geração do modelo no formato CityGML, foi necessária a realização de ajustes para eliminação das triangulações, levando a uma pequena simplificação na geometria da parede, porém de modo a interferir minimamente na precisão do modelo gerado.

Após a finalização da modelagem geométrica, foi realizada aplicação das texturas dos telhados e das fachadas nas superfícies de cada uma das edificações (Figura 9).



Figura 9 – Modelo geométrico texturizado de um trecho do Pelourinho representado no SketchUp

Fonte: Elaborado por Adaildes Moreira, Kyane Bomfim, Luana Micaela e Nicole Guerra em 2018.

Esse método inicialmente escolhido se deu em razão da familiaridade com o SketchUp, o que facilitou a construção dos modelos das edificações. Entretanto, ocorreram dificuldades na realização da modelagem de forma fidedigna à nuvem de pontos, em razão principalmente da falta de paralelismo das paredes das edificações e das diferentes alturas e formas dos telhados, o que dificultou a modelagem tomando-se como base alguns perfis das edificações. A partir dessa constatação, verificou-se a necessidade de se testar outro método para modelagem, descrito a seguir.

3.4.2 Método 2: modelagem geométrica diretamente no AutoCAD

Dadas as limitações do primeiro método (modelagem no SketchUp a partir dos contornos gerados no AutoCAD), verificou-se a necessidade da utilização de um método mais preciso e rápido. Sendo assim, foram realizados testes para a modelagem

geométrica das edificações diretamente sobre a nuvem de pontos visualizada no AutoCAD, eliminando a necessidade de realizar ajustes posteriores nos modelos.

A primeira etapa consistiu na importação da nuvem de pontos para o AutoCAD e a criação dos contornos horizontais (*footprints*) das edificações, que seriam usados para a realização das extrusões posteriores. Após a criação dos modelos sólidos por extrusão, foram criadas linhas de contorno dos telhados, a partir da visualização direta sobre a nuvem de pontos.

Para realizar a modelagem dos telhados, foi necessária a criação de um UCS para cada edificação, de modo a permitir o refinamento posterior do modelo, eliminando-se partes excedentes (com o comando “slice”) e acrescentando partes faltantes.

Em telhados com águas mais complexas, foram extraídos dados relativos ao seu contorno para posterior modelagem no SketchUp (Figura 10a e 10b).

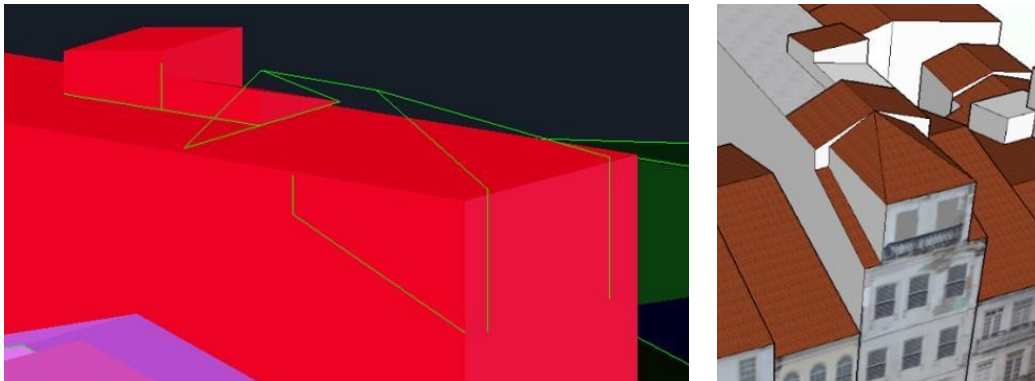


Figura 10 – (a) Obtenção dos contornos do telhado; (b) Modelagem no Sketchup a partir dos contornos criados

Fonte: Groetelaars e Nascimento (2019).

Devido à dificuldade de visualização na nuvem de pontos das partes mais baixas da fachada, próximas ao passeio (em razão de obstáculos presentes durante a tomada fotográfica, como carros estacionados, pessoas, vegetação etc.), optou-se pela utilização das ortofotos para obtenção do limite entre passeio e fachada da edificação.

No SketchUp foi realizada a modelagem final e aplicação das ortofotos das fachadas (Figura 11). Levando em conta o tamanho do arquivo gerado a partir da aplicação de ortofotos de telhados e fachadas, optou-se por reduzir o tamanho dos arquivos das ortofotos das fachadas e aplicar uma textura genérica nos telhados, ocorrendo uma redução significativa no tamanho do arquivo (de 672 Mb para 28,3 Mb).



Figura 11 – Duas perspectivas ilustrando o modelo do Pelourinho no SketchUp com aplicação das ortofotos das fachadas e texturas genéricas no telhados

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.4.3 Método 3: modelagem geométrica por processos automatizados

Depois de gerado o modelo geométrico texturizado do Pelourinho pelos métodos descritos anteriormente, constatou-se que, apesar da qualidade dos produtos gerados, era importante experimentar novos processos e ferramentas, visando automatizar a etapa de modelagem através das nuvens de pontos, de modo a reduzir o tempo para geração de modelos de superfície simplificados.

Foram utilizadas as ferramentas Mapple e Polyfit (NAN; WONKA, 2017), programas livres disponíveis gratuitamente no *website*: <https://3d.bk.tudelft.nl/liangliang/software.html>.

Mapple é uma ferramenta que permite realizar algumas funções, como estimar as normais dos planos e realizar a edição e a decimação da nuvem de pontos. É usada para extrair planos da nuvem de pontos, sendo baseada no algoritmo RANSAC (ÖZDEMİR; REMONDINO, 2018). A partir desse primeiro processamento, e aceitando os planos gerados preliminarmente no Mapple, o Polyfit realiza um refinamento do

processamento anterior e gera um conjunto otimizado de planos, que define o modelo de superfície simplificado.

No primeiro teste realizado, foi possível entender melhor o funcionamento dos dois programas e verificar os produtos gerados em cada etapa. Foi recortado um trecho da nuvem de pontos produzida pelas fotos aéreas e inserido o modelo na Mapple, para a realização da etapa inicial, de estimativa de normais (Figura 12a). Em seguida, esse arquivo foi importado no Polyfit para geração de diversos planos (Figura 12b) e o posterior refinamento para geração do modelo final (Figura 12c). Verifica-se, na Figura 12c (áreas destacadas), que há elementos modelados erroneamente.

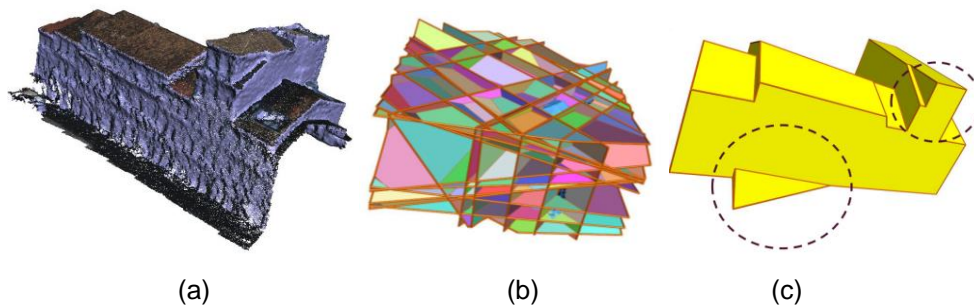


Figura 12 – (a) Estimativa das normais no Mapple; (b) Geração de diversos planos no Polyfit; (c) Definição do modelo final no Polyfit

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na sequência, foram realizados outros testes e verificou-se que os melhores resultados eram alcançados quando se trabalhava com trechos menores (com edificações isoladas) e quando a nuvem de pontos estava mais densa, completa e com menos ruído. Isto pode ser visto na Figura 13, na modelagem automatizada de uma única edificação. Foram realizados, também, testes em edificações de maior complexidade geométrica (incluindo formas curvas), porém, nesses casos, os resultados não foram satisfatórios.

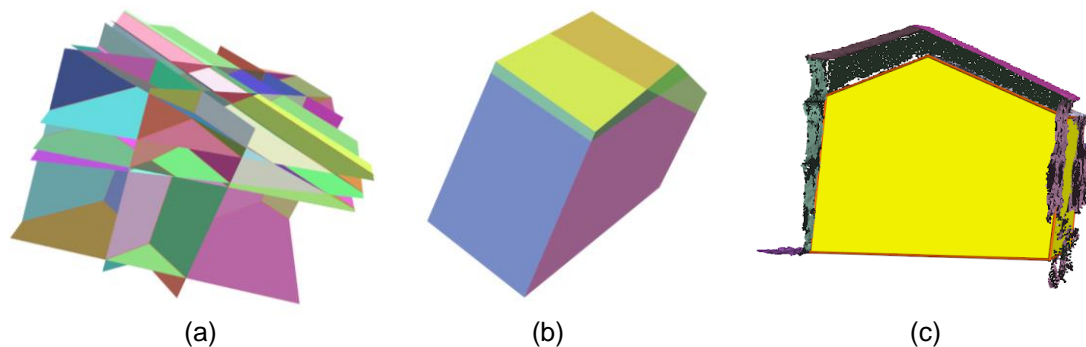


Figura 13 – (a) Geração de diversos planos possíveis no Polyfit; (b) Criação do modelo final no Polyfit, a partir de refinamentos e interseções dos planos; (c) sobreposição do modelo de superfície resultante com a nuvem de pontos

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar o bom desempenho do programa na criação de modelos geométricos simplificados, mas verificou-se a necessidade de uma nuvem de pontos completa (sem áreas de sombra), permitindo registrar bem as extremidades da edificação (cobertura, paredes, passeio), e evitando distorções no modelo resultante. Outro ponto positivo no uso desses programas foi permitir a exportação do modelo em diversos formatos, o que facilita modelagens complementares ou adição de informações em outros softwares.

4 Considerações finais

Foram apresentados, neste artigo, diferentes métodos de modelagem geométrica de edificações do Centro Histórico de Salvador a partir do processamento de nuvens de pontos. Foram descritas desde as etapas iniciais de tomada fotográfica, geração de nuvens de pontos e ortofotos em programas para processamento digital de fotografias (técnica *Dense Stereo Matching* - DSM), até os diferentes testes realizados para geração dos modelos texturizados das edificações.

Foi possível comprovar os potencialidades da técnica DSM, a partir de processos rápidos de aquisição de dados, aliados ao uso de equipamentos de baixo custo. Vale ressaltar a importância do uso integrado de fotos aéreas e terrestres. As fotos aéreas foram usadas principalmente para a geração da nuvem de pontos geral da área, que representou a grande base para a visualização e criação dos modelos de superfície simplificados. Por outro lado, as fotos terrestres permitiram gerar as ortofotos das fachadas em alta resolução, essenciais para a produção do modelo texturizado e complementação de partes da modelagem.

Os experimentos apresentados nesse artigo procuraram usar ferramentas digitais bastante difundidas e conhecidas (seja para aquisição de dados, seja para modelagem geométrica e edição de imagens), além de demandar pequena quantidade de programas nas diferentes etapas de processamento.

Apesar da elevada qualidade e precisão do produto gerado, foi necessário um elevado tempo de produção dos modelos, principalmente no que se refere à etapa de pós-processamento da nuvem de pontos, para geração do modelo geométrico texturizado. O processo de geração dos modelos de superfícies simplificados das edificações exigiu muito tempo e atenção, de modo a gerar representações precisas e adequadas a diversas aplicações.

O experimento realizado utilizando métodos automáticos demonstrou-se promissor, porém, no que tange a sua utilização em sítios históricos, é necessário um aprimoramento da técnica para que seja possível sua utilização em locais com formas mais complexas. Ainda assim, é importante ressaltar a rapidez no processo de geração do modelo e a possibilidade de exportação do mesmo para modelagem complementar ou adição de informações em outros softwares.

Observa-se a necessidade de realização de novos experimentos, de modo a serem testados e desenvolvidos métodos e abordagens que permitam, ao mesmo tempo, automatizar o processo da modelagem geométrica, mas, que por outro lado, garanta a elevada precisão e qualidade dos produtos gerados, permitindo, também, contemplar a complexidade geométrica e a irregularidade das edificações nos sítios históricos.

Por fim, como desdobramento desta pesquisa e refinamento dos modelos produzidos, é necessário fazer o georreferenciamento do modelo e o seu respectivo escalamento para escala de 1:1, de modo a posicioná-lo adequadamente sobre o modelo digital de terreno (MDT) da área. Entretanto, isto demanda um novo ciclo de trabalho de campo para aquisição dos dados necessários, quando deverão ser usados GNSS geodésicos e estações totais. Outro aspecto ainda a ser discutido é a questão da precisão dos modelos gerados, o que será feito após a conclusão desta segunda fase de trabalho dessa pesquisa, que se encontra em desenvolvimento no Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais (LCAD) da Faculdade de Arquitetura da UFBA, em parceria com o Karlsruhe Institute of Technology, da Alemanha.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal da Bahia (UFBA) pela bolsa de iniciação científica concedida através do programa PIBIC-UFBA, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do projeto "Estabelecendo requisitos para a Modelagem da Informação da Cidade" em desenvolvimento no Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais (LCAD) da Faculdade de Arquitetura da UFBA em parceria com o Karlsruhe Institute of Technology, da Alemanha, ao professor Mauro José Alixandrini Júnior da Escola Politécnica da UFBA, pela captura das imagens aéreas, e ao doutorando Iran Carlos Caria Sacramento, pelo processamento das fotos aéreas no PhotoScan.

Referências

ÁLVAREZ, M.; RAPOSO, J. F.; MIRANDA, M.; BELLO, A. B. Metodología de Generación de Modelos Virtuales Urbanos 3D para ciudades inteligentes. **Informes de la Construcción**, v. 70, jan/mar 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/id.56528>. Acesso em: 2 mar. 2019.

BUYUKDEMIRCIOGLU, M.; KOCAMAN, S.; ISIKDAG, U. Semi-Automatic 3D City Model Generation from Large-Format Aerial Images. **International Journal of Geo-Information**, v. 7, set. 2018, DOI:10.3390/ijgi7090339. Acesso em: 11 nov. 2018.

GROETELAARS, N. J. **Criação de modelos BIM a partir de "nuvens de pontos"**: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. 2015. 372 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

GROETELAARS, N. J.; NASCIMENTO, A. M. Geração de modelos geométricos de cidade a partir do processamento de nuvens de pontos: estudo de caso no Centro Histórico de Salvador. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS AND DESIGN, 13., 2019, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Colégio Pedro II, 2019.

HRON, V.; HALOUNOVÁ, L. Automatic Generation of 3D Building Models from Point Clouds. *In*: IVAN, I. **Geoinformatics for Intelligent Transportation**. New York: Springer, 2014.

KEMEC, S.; ZLATANOVA, S.; DUZGUN, S. A framework for defining a 3D model in support of risk management. *In*: KONECNY, M.; ZLATANOVA, S. BANDROVA, T. **Geographic information and cartography for risk and crisis management**. New York: Springer, 2010.

KOEHL, M.; MEYER, E.; KOUSSA, C.; LOTT, C. SIG 3D ET 3D dans les SIG: Application aux modèles patrimoniaux. **GéoÉvénement**, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/32228172>. Acesso em: 2 mar. 2019.

NAN, L.; WONKA, P. PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 1., 2017, Itália. **Anais eletrônicos [...]**. Itália: ICCV, 2017. Disponível em: <https://3d.bk.tudelft.nl/liangliang/publications/2017/polyfit/polyfit.html>. Acesso em: 18 jun. 2019.

ÖZDEMİR, E.; REMONDINO, F. Segmentation of 3D photogrammetric point cloud for 3D building modeling. *In*: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 4., 2018, Delft, The Netherlands. **Proceedings [...]**. Delft: ISPRS, 2018. v. XLII. p. 135-142.