



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias
Digitais (LCAD)

LAÍS SIMONELLI

**UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CIDADE:
CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMÉTRICO E SEMÂNTICO EM LOD1 E
LOD2 PARA O PELOURINHO, SALVADOR - BA**

SALVADOR - BAHIA
2022

LAÍS SIMONELLI

**UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CIDADE:
CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMÉTRICO E SEMÂNTICO EM LOD1 E LOD
2 PARA O PELOURINHO, SALVADOR - BA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim

SALVADOR - BAHIA
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI)
Biblioteca da Faculdade de Arquitetura (BIB/FAU)

S598

Simonelli, Laís.

Uma contribuição à modelagem da informação da cidade
[manuscrito] : construção de um modelo geométrico e semântico em
LOD1 E LOD2 para o Pelourinho, Salvador – BA / Laís Simonelli. –
Salvador, 2022.

194 f. : il.

Cópia de computador (*printout(s)*).

Dissertação – Universidade Federal da Bahia, Faculdade de
Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. 2022.

Orientador: Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim.

1. Modelagem de informação da construção. 2. Arquitetura -
Projetos e plantas. 3. Projeto arquitetônico - Processamento de dados.
I. Amorim, Arivaldo Leão de. II. Universidade Federal da Bahia.
Faculdade de Arquitetura. III. Título.

CDU: 72.02:658.5

LAÍS SIMONELLI

**UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CIDADE:
CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMÉTRICO E SEMÂNTICO EM LOD1 E LOD
2 PARA O PELOURINHO, SALVADOR - BA**

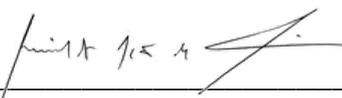
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Salvador, 29 de abril de 2022.

Banca examinadora:

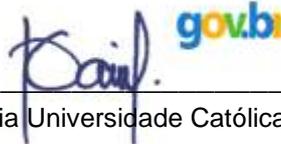
Arivaldo Leão de Amorim – Orientador

Doutor em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo
Universidade Federal da Bahia - UFBA



Daniel Ribeiro Cardoso

Doutor em Comunicação e Semiótica pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Universidade Federal do Ceará - UFC



Documento assinado digitalmente
DANIEL RIBEIRO CARDOSO
Data: 02/08/2022 16:00:53-0300
Verifique em <https://verificador.itf.br>

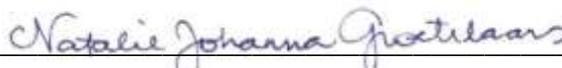
Érica de Sousa Checcucci

Doutora em Difusão do Conhecimento pela Universidade Federal da Bahia
Universidade Federal da Bahia - UFBA



Natalie Johanna Groetelaars

Doutora em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal da Bahia
Universidade Federal da Bahia - UFBA



Para
a minha família e o meu noivo

AGRADECIMENTOS

Ao meu prezado orientador, professor Dr. Arivaldo Leão de Amorim, pela oportunidade, confiança, incentivo e disponibilidade em todas as etapas da pesquisa. Gostaria de agradecer pela orientação no desenvolvimento desta pesquisa, ensinamentos, boa vontade em ajudar sempre e, por me inspirar como profissional e, também, a trabalhar nesta temática. Sem suas contribuições e colaboração este trabalho não seria o mesmo. Sou pura gratidão por tudo!

Aos membros do projeto de pesquisa “Estabelecendo requisitos para a Modelagem da Informação da Cidade (CIM)”, professores Arivaldo Leão de Amorim (coordenador), Gilberto Corso Pereira, Natalie Johanna Groetelaars, Érica de Sousa Checcucci, Fabiano Mikalauskas de Souza Nogueira, Lorena Cláudia de Souza Moreira e Felipe Tavares da Silva, por fornecerem o modelo geométrico do Pelourinho utilizado neste trabalho.

Aos membros das bancas examinadoras dos Exames de Qualificação I e II, professores Érica de Sousa Checcucci, Natalie Johanna Groetelaars e Daniel Ribeiro Cardoso, pelas importantes contribuições.

Ao Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais (LCAD), da Universidade Federal da Bahia, pela estrutura e cursos de extensão oferecidos ao longo da realização desta pesquisa.

A minha família e ao meu noivo pelo amor, incentivo nos momentos que pensei em desistir, paciência e encorajamento para enfrentar os desafios da vida.

O Mestrado em Arquitetura e Urbanismo foi uma experiência única, intensa, repleta de aprendizagens que levarei por toda a vida. Ao longo do caminho conheci pessoas maravilhosas que tornaram a trajetória mais leve. Guardo com muito carinho cada palavra de apoio e incentivo dos amigos que fiz.

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, minha eterna gratidão.

“Não fiz o melhor, mas fiz tudo para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas não sou o que era antes”.

Martin Luther King

SIMONELLI, L. **Uma contribuição à modelagem da informação da cidade:** construção de um modelo geométrico e semântico em LOD1 e LOD2 para o Pelourinho, Salvador - BA. 2022. 194 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

RESUMO

O compartilhamento, a troca e o uso de modelos numéricos 3D de cidades em uma grande quantidade de aplicações é favorecida pelo uso do padrão CityGML. No entanto, o processo de desenvolvimento de conjunto de dados neste formato geralmente requer ferramentas que não são gratuitas e/ou que demandam conhecimentos em programação. Assim sendo, nesta pesquisa, que utilizou o *Design Science Research* como metodologia, buscou-se gerar um artefato (*framework*) com ferramentas gratuitas ou de baixo custo para a construção de um modelo geométrico e semântico para o Pelourinho, em Salvador na Bahia. O modelo contém edificações em LOD1 e LOD2, no formato CityGML, e foi gerado com o uso do *plugin* GEORES, uma ferramenta disponibilizada gratuitamente para o SketchUp. Além das edificações, foram consideradas algumas árvores, postes e vias da área de estudo, os quais pertencem aos módulos *Building*, *Vegetation*, *CityFurniture* e *Transportation* do padrão usado. Os dados foram adicionados a um banco de dados (PostgreSQL/PostGIS) por meio do pacote de *software* 3DCityDB, que possibilitou importar, exportar e visualizar a geometria e a semântica. O artefato mostrou-se adequado para construir o modelo em formato CityGML mas, apesar de ter atendido às necessidades, requereu elevada carga de trabalho manual, apresentando-se inadequado na criação de modelos de grandes áreas. O levantamento bibliográfico realizado nesta pesquisa permitiu identificar que há conceituações distintas para o CIM na literatura. Assim sendo, foi proposta uma conceituação para o CIM de acordo com a concepção de modelagem da informação da cidade que norteou este trabalho. O conceito elaborado levou em consideração que o CIM surge de uma analogia com o BIM; que os atributos do paradigma CIM devem ser explicitados na conceituação (trabalho colaborativo, confiabilidade, interoperabilidade e fácil compartilhamento) e que o estabelecimento de um formato padrão, tal como o CityGML, é necessário na modelagem da informação da cidade.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Cidade. Padrão CityGML. Banco de dados. 3DCityDB. Modelo geométrico e semântico.

SIMONELLI, L. **A contribution to city information modeling:** construction of a geometric and semantic model in LOD1 and LOD2 for Pelourinho, Salvador - BA. 2022. 194 f. Master's Thesis (Master's in Architecture and Urbanism) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

ABSTRACT

Sharing, exchanging, and using 3D numerical models of cities in a wide range of applications is favored by the use of the CityGML standard. However, developing a dataset in this format usually requires tools that are not free and/or require programming skills. Therefore, in this research, which used Design Science Research as a methodology, we sought to generate an artifact (framework) with free or low-cost tools for constructing a geometric and semantic model for Pelourinho in Salvador, Bahia. The model contained buildings in LOD1 and LOD2 in CityGML format and was generated using the GEORES plugin, a tool freely available for SketchUp. In addition to the buildings, some trees, poles, and roads in the study area were considered, which belong to the Building, Vegetation, CityFurniture, and Transportation modules of the standard used. The data were added to a database (PostgreSQL/PostGIS) using the 3DCityDB software package, which made it possible to import, export, and visualize the geometry and semantics. The artifact proved to be adequate to build the model in CityGML format but, despite having met the needs, it required a high manual workload, presenting itself as inadequate in creating models of large areas. The bibliographic survey carried out in this research allowed us to identify different concepts for the CIM in the literature. Therefore, a conceptualization for the CIM was proposed according to the city information modeling concept that guided this work. The concept elaborated took into account that CIM arises from an analogy with BIM; that the attributes of the CIM paradigm must be explained in the conceptualization (collaborative work, reliability, interoperability and easy sharing) and that the establishment of a standard format, such as CityGML, is necessary in the modeling of city information.

Keywords: City Information Modeling (CIM). CityGML standard. Database. 3DCityDB. Geometric and semantic model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Telhados incorretos obtidos automaticamente utilizando o <i>software</i> BuildingReconstruction 2018, para cidade de Cesme em Izmir, na Turquia.....	55
Figura 2 - Arquitetura geral do formato IFC.....	90
Figura 3 - Módulos do CityGML definidos no CityGML Core.....	95
Figura 4 - Os diferentes níveis de detalhes para edificações do CityGML 2.0.....	97
Figura 5 - Proposta de Biljecki, Ledoux e Stoter (2016) para aprimorar a especificação dos LOD.....	99
Figura 6 - Alguns problemas que podem ser encontrados em edificações representadas digitalmente: (a) orifícios, (b) aberturas, (c) vértices que excedem os limites geométricos, (d) coberturas íngremes, (e) paredes finais irreais e (f) superfícies não totalmente fechadas.....	101
Figura 7 - Funcionalidades do 3DCityDB	106
Figura 8 - Seis pacotes para armazenamento de dados no 3DCityDB	106
Figura 9 - Interface gráfica do 3DCityDB Importer/Exporter.....	108
Figura 10 - Representação esquemática dos processos de importação e exportação de conjuntos de dados CityGML no 3DcityDB.....	109
Figura 11 - Representação do fluxo de trabalho do Web Feature Service	111
Figura 12 - Representação esquemática do processo de exportação do modelo utilizando o Exportador KML/COLLADA/gITF.....	112
Figura 13 - Representação esquemática do processo de exportação de planilhas	113
Figura 14 - Representação esquemática do 3D-Web-Client	115
Figura 15 - Interface gráfica do 3D-Web-Client	116
Figura 16 - Trecho do modelo de Amsterdã disponível na <i>web</i>	118
Figura 17 - Trecho do modelo de Berlim disponível na <i>web</i>	119
Figura 18 - Trecho do modelo de Hong Kong disponível na <i>web</i>	120
Figura 19 - Trecho do modelo de Singapura disponível na <i>web</i>	121
Figura 20 - Trecho do modelo de Wuhan	122
Figura 21 - Trecho do modelo de Nova York disponível na <i>web</i>	123
Figura 22 - Estudo de estimativa de radiação solar	123

Figura 23 - Uso do modelo numérico 3D de uma praça do Japão na análise de sombras no (a) verão, (b) primavera e (c) inverno.....	126
Figura 24 - Imagem em falsa cor mostrando a variação dos níveis de ruídos em construções	127
Figura 25 - Construção do modelo geométrico em LOD1 e conversão para o padrão CityGML.....	134
Figura 26 - Armazenamento em banco de dados e visualização dos dados geométricos e semânticos	135
Figura 27 - Área de estudo no OpenStreetMap.....	137
Figura 28 – Planta da área de estudo sem informação (à esquerda) e mapeada (à direita).....	138
Figura 29 - Seleção da área de interesse no CadMapper (à esquerda) e modelo geométrico obtido (à direita)	139
Figura 30 - Modelo SketchUp compatível com o LOD1 do CityGML.....	139
Figura 31 - Modelo SketchUp com edificações em LOD1 e LOD2 do CityGML.....	140
Figura 32 - Etapas de construção das edificações em LOD2.....	141
Figura 33 - Modelo SketchUp com edificações em LOD1 e LOD2, vias, vegetação e postes	141
Figura 34 - Interface do Val3dity	142
Figura 35 - Validação do modelo das edificações em LOD1 e LOD2	143
Figura 36 - Validação do Modelo Digital do Terreno	144
Figura 37 - Verificação da validade do módulo <i>Vegetation</i>	145
Figura 38 - Verificação da validade do módulo <i>Transportation</i>	145
Figura 39 - Verificação da validade do módulo Cityfurniture	146
Figura 40 - Conjunto de tabelas criadas no banco de dados relacional através do 3DCityDB.....	147
Figura 41 - Tabela resultante da adição manual dos endereços no banco de dados.....	149
Figura 42 - Tabela resultante da inserção do uso das edificações no PostgreSQL/PostGIS.....	149
Figura 43 - Tabela "database_srs"	150
Figura 44 - Consulta realizada no banco de dados PostgreSQL para a Rua João de Deus.....	150

Figura 45 – Resultado da consulta realizada no banco de dados para a Rua João de Deus.....	150
Figura 46 - Consulta realizada no banco de dados PostgreSQL para a Rua Açouguinho.....	152
Figura 47 – Resultado da consulta realizada no banco de dados para a Rua Açouguinho.....	152
Figura 48 - Conexão do 3DCityDB com o banco de dados.....	153
Figura 49 - Código utilizado para criação de uma extensão PostGIS	154
Figura 50 - Execução do <i>script</i> CREATE_DB para preparação do banco de dados	154
Figura 51 - Janela de comando do sistema operacional para acompanhamento dos processos.....	155
Figura 52 - Conexão realizada com o banco de dados	155
Figura 53 - Tela do 3DCityDB resultante da validação do arquivo XML do modelo do Pelourinho importado para o PostgreSQL/PostGIS.....	156
Figura 54 - Parte das informações exportadas pela ferramenta 3DCityDB Importer/Exporter.....	157
Figura 55 - Formas distintas de exportação do 3DCityDB e visualização no Google Earth.....	158
Figura 56 - Visualização da semântica de uma edificação em LOD1 no Google Earth.....	160
Figura 57 - Visualização da semântica de uma edificação em LOD2 no Google Earth.....	160
Figura 58 - Visualização no Google Earth da semântica de uma construção com imagem armazenada no banco de dados	161
Figura 59 - Configuração do servidor <i>web</i> local	161
Figura 60 - Interface do 3DCityDB-Web-Map-Client	162
Figura 61 – Adição de camadas no 3DCityDB-Web-Map-Client	163
Figura 62 - Camada <i>Footprint</i> na imagem de satélite do ESRI World Imagery	164
Figura 63 - Camada <i>Extruded</i> na imagem de satélite do ESRI World Imagery	165
Figura 64 - Camada <i>Geometry</i> na imagem de satélite do ESRI World Imagery	165
Figura 65 - Camada <i>Collada</i> na imagem de satélite do ESRI World Imagery	166
Figura 66 - Visualização da vegetação contida na área de estudo	166

Figura 67 - Visualização dos postes de iluminação e das vias contidos na área de estudo.....	167
Figura 68 - Visualização de edificações localizadas no largo do Pelourinho.....	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Avaliação do suporte oferecido por diferentes formatos para armazenar modelos numéricos 3D de cidades.....	84
Quadro 2 - Módulos do CityGML 2.0.....	94
Quadro 3 - Requisitos dos diferentes níveis de detalhe do CityGML 2.0	98
Quadro 4 - Funções dos pacotes disponíveis no 3DCityDB para armazenamento de dados.....	107
Quadro 5 - Listagem das vantagens e limitações do <i>framework</i>	173

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3DCityDB - 3D City Database

ADE - *Application Domain Extension*

AEC - Arquitetura, Engenharia e Construção

AECO - Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação

AGC - Arquitetura Gerada por Computador

API - *Application Programming Interface*

BeIM - *Built Environment Information Modelling*

BIM - *Building Information Modeling*

CAD - *Computer Aided Design*

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

CHS - Centro Histórico de Salvador

CIM - *City Information Modeling*

CityGML - *City Geography Markup Language*

COLLADA - *Collaborative Design Activity*

CRS - *Coordinate Reference System*

DEM - *Digital Elevation Model*

DPS - *Distributed Problem Solving*

DS - *Design Science*

DSM - *Digital Surface Model*

DSR - *Design Science Research*

ESRI - Environmental Systems Research Institute

FME - Feature Manipulation Engine

GB - *gigabytes*

GDI-NRW - Geospatial Data Infrastructure Northrhine-Westphalia

GIS - *Geographic Information System*

GML - *Geography Markup Language*

HTML - *Hypertext Markup Language*

HTTP - *HyperText Transfer Protocol*

IAI - *Industry Alliance for Interoperability*

IFC - *Industry Foundation Classes*

In SAR - *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ISO - International Organization for Standardization

JSON - *JavaScript Object Notation*

KML - *Keyhole Markup Language*

LIDAR - *Light Detection And Ranging*

LOD - *Level of Detail*

NBIMS - National Building Information Modeling Standard Committee

OGC - Open Geospatial Consortium

ONU - Organização das Nações Unidas

OSM - OpenStreetMap

PCA - *Principal Components Analyses*

PCL - *Point Cloud Library*

SIFT - *Scale Invariant Feature Transform*

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIG3D - Special Interest Group 3D

SKP - SketchUp

SQL - *Structured Query Language*

SRID - *Spatial Reference Identifier*

UAV - *Unmanned Air Vehicle*

UFBA - Universidade Federal da Bahia

URL - *Uniform Resource Locator*

VRML - *Virtual Reality Modeling Language*

WebGL - *Web Graphics Library*

X3D - *Extensible 3D*

XML - *Extensible Markup Language*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	IDENTIFICANDO O OBJETO E OS OBJETIVOS	28
1.2.1	Problema científico	28
1.2.2	Objeto	29
1.2.3	Objetivos	29
1.3	METODOLOGIA	30
1.3.1	Etapas da pesquisa	31
1.3.1.1	Identificação do problema	31
1.3.1.2	Definição do objetivo	32
1.3.1.3	Construção do artefato	33
1.3.1.4	Demonstração do uso	33
1.3.1.5	Avaliação	34
1.3.1.6	Comunicação	34
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	34
2	MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CIDADE	35
2.1	MODELOS E MODELAGEM	35
2.2	DISCUTINDO BIM E CIM	38
2.3	CONCEITUAÇÃO DO CIM	42
2.4	DESAFIOS DO CIM	49
2.4.1	Desafio 1: Consistência	49
2.4.2	Desafio 2: Padronização	50
2.4.3	Desafio 3: Qualidade dos dados	51
2.4.4	Desafio 4: interoperabilidade	52
2.4.5	Desafio 5: Manutenção e gestão dos dados	53
2.4.6	Desafio 6: Implementação de novas tecnologias	53
2.4.7	Desafio 7: Modelagem de formas urbanas irregulares	56
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CIM	56
3	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOMÉTRICOS	58
3.1	AQUISIÇÃO DE DADOS	58
3.1.1	Medição direta	59
3.1.2	Métodos topográficos	60

3.1.3	GNSS	61
3.1.4	Imageamento por satélite	62
3.1.5	Fotogrametria	64
3.1.5.1	Fotogrametria terrestre.....	67
3.1.5.2	Fotogrametria aérea	67
3.1.6	Varredura a laser	70
3.1.6.1	Varredura a laser aerotransportada	71
3.1.6.2	Varredura a laser terrestre	71
3.2	PROCESSAMENTO DE DADOS	73
3.3	PLATAFORMAS DE MODELAGEM	76
3.3.1	City Engine	77
3.3.2	SketchUp	78
3.3.3	Agisoft Metashape	78
3.3.4	Pix 4D	78
3.3.5	Blender	79
3.3.6	Infraworks	79
3.3.7	AutoCAD	79
3.3.8	COLMAP	80
3.3.9	OpenDroneMap	80
3.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOMÉTRICOS	80
4	MODELOS NUMÉRICOS 3D DE CIDADES	82
4.1	NOÇÕES INTRODUTÓRIAS	82
4.2	INTEROPERABILIDADE	83
4.2.1	IFC	85
4.2.1.1	Um pouco da história.....	87
4.2.1.2	Arquitetura do IFC	88
4.2.1.2.1	Camada de recursos	90
4.2.1.2.2	Camada central	91
4.2.1.2.3	Camadas de interoperabilidade.....	91
4.2.1.2.4	Camada de domínio	92
4.2.1.3	Os desafios do IFC.....	92
4.2.2	CityGML	92
4.2.2.1	Níveis de detalhe.....	96

4.2.2.2	Validação dos conjuntos de dados	101
4.3	3DCityDB	103
4.3.1	Armazenamento no 3DCityDB	105
4.3.2	3DCityDB Importer/Exporter	107
4.3.3	Recursos para web.....	110
4.3.4	Plugin de exportação KML/COLLADA/gITF	111
4.3.5	Plugin para geração de planilhas.....	113
4.3.6	3DCityDB Web-Map-Client	114
4.4	MODELOS URBANOS NA <i>WEB</i>	116
4.4.1	Amsterdã	117
4.4.2	Berlim	118
4.4.3	Hong Kong	119
4.4.4	Singapura	120
4.4.5	Wuhan.....	121
4.4.6	Nova York.....	122
4.5	APLICAÇÕES DOS MODELOS NÚMERICOS 3D DE CIDADES.....	124
4.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS NUMÉRICOS 3D DE CIDADES	
	132	
5	MODELO GEOMÉTRICO E SEMÂNTICO DO PELOURINHO.....	133
5.1	FRAMEWORK.....	134
5.2	DETALHAMENTO DAS ETAPAS	136
5.2.1	Construção do modelo em CityGML	136
5.2.1.1	Apresentação da área de estudo	136
5.2.1.2	Inserção de dados no OpenStreetMap.....	137
5.2.1.3	Obtenção do volume das edificações.....	138
5.2.1.4	Preparação do modelo e conversão para CityGML.....	139
5.2.1.5	Validação do modelo CityGML no Val3dity	142
5.2.2	Armazenamento do modelo do Pelourinho no banco de dados ...	146
5.2.2.1	PostgreSQL/PostGIS.....	147
5.2.2.2	Importação e Exportação no 3DCityDB.....	152
5.2.2.3	Visualização	158
5.3	DISCUSSÃO	168
5.3.1	Operacionalidade.....	168
5.3.2	Generalidade	168

5.3.3	Facilidade de uso.....	170
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	174
6.1	CONCLUSÕES	175
6.2	TRABALHOS FUTUROS	178
	REFERÊNCIAS.....	179

1 INTRODUÇÃO

As cidades são espaços que podem favorecer a promoção da produtividade, o desenvolvimento econômico e, também, o bem-estar da sociedade. Apesar disso, é possível observar que elas possuem inúmeros problemas que comprometem o crescimento econômico, o desenvolvimento sustentável, a igualdade social, entre outros.

Os problemas urbanos podem estar relacionados com transporte, segurança pública, uso e ocupação do solo, saneamento e disponibilidade de água etc. (ALMEIDA; ANDRADE; XAVIER, 2018; AMORIM, 2016). Esses problemas são principalmente observados em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Assim sendo, os governantes e, também, os projetistas urbanos possuem grandes desafios a serem enfrentados no planejamento, no projeto, na gestão e no monitoramento das cidades. Além disso, as perspectivas de aumento populacional e a degradação ambiental tornam ainda mais complexos os problemas que as cidades terão de enfrentar nas próximas décadas (BUYUKDEMIRCIOLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018).

Problemas tais como o congestionamento do tráfego urbano e as más condições de moradia, sendo que esse último acarreta maior demanda pelos serviços de saúde, requer elevados gastos públicos e provoca sérias consequências na vida dos cidadãos. Além disso, as cidades do século XXI são ambientes complexos que apresentam muitos desafios aos gestores urbanos em razão de, entre outros fatores, concentrarem a maior parte da população mundial e das atividades econômicas (DANTAS; SOUSA; MELO, 2019). De acordo com a Organização das Nações Unidas (2017), 55% da população mundial reside em cidades e, até 2050, 70% da população do planeta residirá em áreas urbanas. Com a alta perspectiva de crescimento populacional, o planejamento urbano passa a ser neste século tão importante quanto foi no século passado.

Para a elaboração de planos urbanos que privilegiem o desenvolvimento de cidades mais justas, as etapas de planejamento e projeção requerem dados confiáveis que possam ser aplicados no processo de tomada de decisão. Quando o planejamento urbano é resultado de estudos e propostas pouco embasadas em dados reais dos problemas enfrentados pelas cidades, tende a haver o estabelecimento de

dinâmicas que beneficiam grupos específicos, e não o coletivo (LIMA, 2016; ALMEIDA; ANDRADE; XAVIER, 2018).

Segundo Lima (2016, p. 4) “[...] o planejamento que não se relaciona de maneira intrínseca com os problemas da cidade não passa de mera regra e torna-se ficção.” Nesse sentido, o planejamento urbano deve ser empregado como dispositivo de análise e conciliação dos problemas enfrentados pelas cidades do século XXI. Assim sendo, devem ser dadas respostas específicas para cada problema levando-se em conta suas incertezas e particularidades.

A complexidade crescente do ambiente urbano implica em uma demanda cada vez maior por ferramentas adequadas para diferentes finalidades, tais como o projeto, o planejamento, a construção e o gerenciamento das cidades e dos seus sistemas. Com o advento do paradigma *Building Information Modeling* (BIM), a maneira como são pensadas individualmente as edificações mudou severamente e, o mesmo deverá ocorrer na escala urbana (CONSTRUCTIBLE, 2018).

Com o objetivo de lidar com as demandas atuais e futuras das populações urbanas, faz-se necessário o desenvolvimento de novos paradigmas capazes de enfrentar os desafios que estão colocados. Nesse contexto, as tecnologias podem ser utilizadas para tornar a gestão das cidades mais eficiente, eficaz e efetiva, melhorando a qualidade de vida da população (CANTZLER, 2003; TANG *et al.*, 2010).

É nesse contexto que surgiu e se desenvolve o *City Information Modeling* (CIM) ou, em português, Modelagem da Informação da Cidade. O CIM é um paradigma em desenvolvimento para auxiliar no planejamento urbano e na gestão das cidades, visando a melhoria da qualidade de vida da população (LIMA, 2016). Por meio dele, serviços urbanos baseados em localização poderão ser aperfeiçoados (ALMEIDA; ANDRADE; XAVIER, 2018). Além disso, soluções inteligentes poderão ser propostas para o enfrentamento dos problemas urbanos ocasionados pelo crescimento populacional acelerado.

Segundo Amorim (2015), o CIM requer um banco de dados unificado e compartilhado que possibilite uma atuação coordenada dos agentes interessados no planejamento, no projeto, na execução, na operação, na manutenção e no monitoramento urbano. Assim sendo, o trabalho colaborativo é uma de suas principais características.

É importante mencionar que o CIM deve englobar de maneira multidisciplinar os dados que interessem aos usuários. É cada vez maior a quantidade de dados urbanos que podem ser coletados e processados. As tecnologias de informação e comunicação e a grande quantidade de dispositivos conectados geram muitos dados, que aliados ao desenvolvimento tecnológico dos computadores têm impactado profundamente o modo como se vive nas cidades nos últimos 20 anos. Isso traz um forte apelo para mudar a forma como as cidades são planejadas, que ao redor do mundo ainda está majoritariamente relacionada com as metodologias do século XX (CONSTRUCTIBLE, 2018).

Em razão de ser um tema relativamente recente, o CIM tem sido estudado sob diferentes aspectos. Há na literatura trabalhos dedicados ao estudo de sua conceituação, requisitos, ferramentas tecnológicas, entre outros. Por se tratar de uma base de dados sofisticada, entre outras funções, o modelo de informações da cidade proporcionará que arquitetos, engenheiros e outros profissionais armazenem, acessem e transacionem dados, o que por sua vez também requer o amadurecimento de questões relacionadas aos dados e sua privacidade (AMORIM, 2015). Cabe aqui evidenciar que os dados vão muito além da geometria urbana (dados geométricos), uma vez que o CIM pode proporcionar a consulta e utilização de dados de infraestrutura, serviços públicos, entre outros; tarefa essa indispensável para enfrentar os desafios ligados ao transporte, energia, saúde e bem-estar social (CONSTRUCTIBLE, 2018).

Podem ser encontrados diferentes trabalhos na literatura dedicados a modelagem da informação da cidade. É importante ressaltar que muitos deles não utilizam especificamente o termo CIM (AGUGIARO *et al.*, 2018; TAH, OTI; ABANDA, 2017; YAO *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2016).

De acordo com Khemlani (2016, p. 1, tradução nossa), “[...] ainda não existe uma terminologia acordada para se referir ao conceito de modelagem de cidades.” Mais recentemente, Tah, Oti e Abanda (2017) sugerem o uso da terminologia *Built Environment Information Modelling* (BeIM) ou, em português, Modelagem da Informação do Ambiente Construído. Alguns outros termos que podem ser encontrados na literatura são *3D City Model* (Modelo 3D de Cidade) (OHORI *et al.*, 2015), *3D-City Modeling* (Modelagem 3D da Cidade) (LAFARGE *et al.*, 2008), *Urban Model* (Modelo Urbano) (YINGER, 1976), *Urban Modeling* (Modelagem Urbana)

(BATTY, 2008), *Urban Information Model* (Modelo de Informação Urbana) (HAMILTON *et al.*, 2005) e *Urban Information Modeling* (Modelagem da Informação Urbana) (MIGNARD; NICOLLE, 2015).

Nesta pesquisa, são usados frequentemente os termos “Modelagem da Informação da Cidade”, terminologia escolhida para se referir ao conceito de modelagem urbana, e “Modelo Numérico 3D de Cidade”, para se referir à base que armazena os dados de interesse. O trabalho está focado na proposição e avaliação de um caminho metodológico para o desenvolvimento de um modelo geométrico e semântico¹ para o bairro do Pelourinho, localizado no Centro Histórico de Salvador, na Bahia.

1.1 JUSTIFICATIVA

Modelos de várias cidades ao redor do mundo, especialmente na Europa, estão sendo construídos para o armazenamento e a integração de dados no padrão internacional CityGML (AGUGIARO; HAUER; NADLER, 2015). Esse padrão possibilita armazenar geometria, semântica, topologia² e aparência dos objetos que compõem o espaço urbano (KOLBE; BURGER; CANTZLER, 2015).

Apesar do padrão CityGML possibilitar a representação, o armazenamento e a troca de informações, este formato não é adequado para a visualização em navegadores da *web* (OHORI *et al.*, 2018). De acordo com Ohori *et al.* (2018), a visualização de modelos urbanos na *web* ainda é desafiadora, tendo em vista que requer a separação de dados geométricos de semânticos. Como consequência disso, é necessário que a geometria seja colocada em formatos gráficos que favoreçam a visualização na *web*, como por exemplo, os formatos KML, COLLADA, X3D, entre outros (OHORI *et al.*, 2018).

Uma das grandes vantagens da utilização de navegadores *web* é a possibilidade de visualização dos modelos sem a obrigatoriedade de instalação de ferramentas específicas de visualização (BUYUKDEMIRCIOGLU; KOCAMAN;

¹ A palavra “semântica” tem origem grega, σημαντικός (*sēmantikós*). Sua tradução do grego para o português é “significativo”. Quando está associada à palavra informação (informação semântica), diz respeito ao significado das coisas. Por exemplo, em uma edificação, cada parte pode ser especificada com significados tais como sala, porta, parede, chão, interior etc. (HORNA *et al.*, 2015).

² No contexto deste trabalho, a topologia consiste nas “[...] relações de incidência e vizinhança de uma edificação ou cidade [...]” (HORNA *et al.*, 2015, p. 13, tradução nossa).

ISIKDAG, 2018). Para obter objetos urbanos que possam ser visualizados na *web*, uma alternativa refinada é a armazenagem do modelo no *3D City Database* (3DCityDB) (CHATURVEDI; YAO; KOLBE, 2019). O 3DCityDB é um Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGBD) de código aberto, desenvolvido para armazenar modelos urbanos compatíveis com o padrão CityGML. Tal como ocorre em outros Sistemas Gerenciadores de Bases de Dados, além do armazenamento, com o 3DCityDB é possível analisar e gerenciar grandes volumes de dados. No entanto, nesse caso, os dados devem estar em formato CityGML (PREKA; DOULAMIS, 2016; 3DCityDB, 2020).

Os modelos geométricos e semânticos de cidades em CityGML proporcionam a obtenção de um ambiente virtual que favorece a tomada de decisão e a realização de simulações³ (BUYUKDEMIRCIOGLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018). É crescente o uso de modelos semânticos em aplicações tais como, planejamento urbano, gerenciamento de desastres, visualização, simulação, promoção turística, estimativa de consumo de energia, navegação, realização de consultas e análises espaciais, entre outras (BUYUKDEMIRCIOGLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018; VITALIS *et al.*, 2019; PREKA; DOUMALIS, 2016).

Apesar dos benefícios resultantes da construção de modelos geométricos e semânticos em formato CityGML, é importante esclarecer que o processo de construção desses modelos possui elevado grau de complexidade. A complexidade está relacionada aos processos de aquisição, processamento⁴, modelagem geométrica⁵, conversão e verificação da qualidade dos dados, entre outros.

Sobre esses processos, Stoter e colaboradores (2020) consideram que alguns dos principais desafios são consistência, padronização, qualidade, interoperabilidade, manutenção e gestão dos dados. Os problemas de consistência surgem quando modelos de uma mesma área apresentam diferenças na aparência, geometria e

³ Ato ou efeito de simular. Simular consiste em fazer parecer real uma coisa que não é (DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS, 2020). Por exemplo: a avaliação da sombra de uma edificação por meio de alguma ferramenta computacional.

⁴ No contexto deste trabalho, processamento é um termo utilizado para se referir à extração e manuseio de dados em ferramentas computacionais. No processamento computacional, um microprocessador, também conhecido como unidade central de processamento, recebe informações e executa uma ação ou uma série de ações.

⁵ A representação numérica da geometria de um objeto é conhecida como modelagem geométrica. Esse tipo de modelagem emprega o uso de curvas na criação de modelos que podem ser visualizados em 2D ou 3D.

semântica. Por sua vez, os problemas de padronização implicam na não adoção de um formato comum para troca e armazenamento dos modelos (AMORIM, 2016). Apesar do padrão CityGML ser uma resposta a esse problema, sua linguagem de codificação é considerada complexa e prolixa (STOTER *et al.*, 2020). Além disso, neste padrão, a qualidade dos dados pode ser prejudicada pela presença de erros geométricos nos modelos (NOUVEL *et al.*, 2017). Para enfrentar esses erros, a ISO 19107 estabelece padrões geométricos que devem ser seguidos. Os modelos podem ser verificados em relação a problemas geométricos em ferramentas criadas especificamente para essa finalidade, como é o caso do CityDoctor e Val3dity.

Ainda sobre os desafios, a interoperabilidade ocupa posição de destaque (GIL *et al.*, 2010; AMORIM, 2016). Uma das grandes dificuldades diz respeito ao desenvolvimento de estratégias para conversão entre *Industry Foundation Classes*⁶ (IFC) e CityGML (formato padrão para escala urbana) (SHAN; LI; ZHANG, 2019). É importante esclarecer também que há questões ligadas à manutenção e gestão dos dados, os quais estão relacionados com a necessidade de manter os dados atualizados e armazenados adequadamente (STOTER *et al.*, 2020).

Nesta pesquisa, em relação aos desafios supracitados, testes foram realizados para verificar se um modelo para o Pelourinho, oriundo de duas diferentes fontes de aquisição de dados, satisfaz às exigências de qualidade geométrica impostas pela norma ISO 19107 para o padrão CityGML. Os dados para construção do modelo são oriundos de mapeamento em imagem de satélite e fotogrametria⁷ (terrestre e aérea). A verificação da qualidade dos dados foi realizada por meio da ferramenta gratuita Val3dity, que propicia a verificação automática da geometria. Após obter um modelo CityGML (geométrico e semântico) válido, o mesmo foi armazenado em um banco de dados.

A construção de modelos geométricos de cidades com semântica se desenvolveu principalmente na Europa (KOLBE; BURGER; CANTZLER, 2015). No Brasil, essa temática não tem sido amplamente explorada. Normalmente, quando a

⁶ O *Industry Foundation Classes* (IFC) é um padrão aberto e neutro, útil para o compartilhamento de informações no formato XML (*Extensible Markup Language*).

⁷ É importante esclarecer que os dados geométricos oriundos de fotogrametria foram cedidos pelos coordenadores do projeto "Estabelecendo requisitos para a Modelagem da Informação da Cidade". Trata-se de um projeto financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e desenvolvido na Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, em colaboração com o Karlsruhe Institute of Technology (KIT), na Alemanha.

modelagem semântica é discutida, o foco geralmente está no BIM (*Building Information Modeling*). No entanto, há diferentes grupos de pesquisa no país interessados na Modelagem da Informação da Cidade.

Para Amorim (2015, p. 89), “[...] independente das questões de ordem tecnológicas, existem algumas questões conceituais que precisam ser discutidas e aprofundadas pela comunidade envolvida na busca de uma definição consensual.” Logo, é necessário estimular uma discussão que englobe o CIM e outros conceitos relacionados com o mesmo. Lima (2016), tal como Amorim (2015), também afirmou que a discussão acerca do CIM precisa ser aprofundada. Com isso, será possível amadurecer a terminologia, a conceituação, e até mesmo, as possibilidades e limitações do CIM.

Com base nas informações apresentadas, as seguintes justificativas podem ser elencadas para a realização deste trabalho:

- várias cidades ao redor do mundo, principalmente na Europa, têm construído modelos geométricos e semânticos de áreas de interesse no padrão CityGML para visualização na *web*. No entanto, no Brasil, foram identificados apenas os modelos desenvolvidos por Silva *et al.* (2020) e Maieron (2021), que foram construídos em CityGML e armazenados em um banco de dados;
- a maioria dos modelos urbanos encontrados no Brasil são puramente geométricos. No entanto, modelos de cidades com a semântica são mais ricos e podem apresentar uma maior gama de aplicações;
- um dos grandes desafios da construção de modelos numéricos 3D de cidades, válidos em relação a geometria e a semântica, diz respeito à qualidade dos dados. Assim sendo, no CIM, a verificação da qualidade dos dados é fundamental. Tendo isso em vista, a ferramenta Val3dity é empregada nesta pesquisa para verificação da qualidade do modelo CityGML construído a partir da combinação de dados oriundos de mapeamento de imagem de satélite e de fotogrametria.

A escolha do tema deste estudo pode ser justificada em razão da carência de pesquisas que tratem de modelos geométricos e semânticos de áreas urbanas brasileiras construídos no padrão CityGML e armazenados em um banco de dados

com potencial para visualização na *web*. Além disso, esse tipo de trabalho é útil para melhorar a compreensão do potencial de novas ferramentas, tais como o 3DCityDB, na construção de modelos de cidades mais adequados às aplicações demandadas pelas cidades do século XXI.

1.2 IDENTIFICANDO O OBJETO E OS OBJETIVOS

A definição do objeto e dos objetivos da pesquisa é dependente do problema científico abordado. O problema científico é normalmente expresso na forma de uma ou mais perguntas que deverão estar respondidas quando a pesquisa for encerrada.

1.2.1 Problema científico

Para Amorim (2015) e Lima (2016), o CIM está distante de uma conceituação que seja consenso unânime na literatura. Apesar disso, o CIM já é compreendido como um paradigma que trará inúmeras vantagens para a tomada de decisão no planejamento, na gestão e no monitoramento das cidades.

As pesquisas sobre o CIM possuem muitas questões a serem respondidas para propiciar o pleno desenvolvimento dessa temática. No entanto, neste trabalho, trata-se das seguintes questões:

- Qual o estado da arte atual da conceituação do CIM?
- Como construir e armazenar modelos de cidades, com geometria e semântica, para o compartilhamento de informações?

As respostas para estas questões podem favorecer o desenvolvimento do CIM tanto no campo teórico, quanto prático (AMORIM, 2015; TAH; OTI; ABANDA, 2017). Podem ser encontrados na literatura diferentes conceitos para o CIM. No entanto, Amorim (2015) afirma que os conceitos existentes não evidenciam toda amplitude e complexidade do CIM e, portanto, são incipientes.

Além disso, não é possível identificar na literatura um *software* que por si só proporcione a criação, inserção de dados, conversão de formatos de arquivos e, ao mesmo tempo, favoreça o armazenamento e a troca dos modelos em um formato padrão (GIL *et al.*, 2010; KOLBE; BURGER; CANTZLER, 2015; AMORIM, 2016).

Assim sendo, diferentes *frameworks*⁸ têm sido propostos com o intuito de agrupar ferramentas que viabilizem a realização dessas tarefas (AGUGIARO, 2016; ADITYA; DONKERS *et al.*, 2016; LAKSONO, 2017; BUYUKDEMIRCIUGLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018; MAO; BAN, 2011; PRIETO; IZKARA; DEL HOYO, 2015). Apesar de possibilitarem a construção de modelos com geometria e semântica, os *frameworks* existentes apresentam alternativas tecnológicas complexas que não são gratuitas ou de baixo custo para converter os dados para CityGML. Um exemplo de tecnologia complexa que pode ser utilizada na conversão de diferentes formatos de arquivos é o Feature Manipulation Engine⁹ (FME). Por outro lado, uma alternativa mais simples, mas que não é gratuita, é o CityEditor¹⁰.

Nesse contexto, além de considerar os aspectos teóricos da Modelagem da Informação da Cidade, este trabalho trata de questões práticas como, por exemplo, as alternativas de *frameworks* que podem ser empregadas nas construções desses modelos urbanos.

1.2.2 Objeto

O objeto de estudo deste trabalho é a construção de um modelo geométrico e semântico para um conjunto de edificações localizadas no Pelourinho, em Salvador na Bahia. Assim sendo, serão investigados aspectos teóricos e práticos relacionados com o CIM.

1.2.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi o estabelecimento de um procedimento para construção de um modelo geométrico e semântico de edificações localizadas no Pelourinho, no Centro Histórico de Salvador (CHS), na Bahia, para a visualização na

⁸ Um *framework*, em geral, é uma estrutura conceitual ou que exista materialmente, cuja finalidade é apoiar ou guiar a construção de algo que torne a estrutura útil, podendo essa ser empregada para a solução de problemas ou a realização de tarefas.

⁹ Ferramenta que pode ser empregada na conversão, integração e validação de dados de diferentes formatos.

¹⁰ *Plugin* comercial para o SketchUp, que pode ser utilizado para converter modelos geométricos para o formato CityGML (CITYEDITOR, 2021).

web, com o uso de ferramentas gratuitas ou de baixo custo. Esse objetivo foi atingido a partir dos seguintes objetivos específicos:

- Contribuir para a discussão da modelagem da informação da cidade visando o amadurecimento do conceito;
- Identificar exemplos, ferramentas e processos para a criação de modelos numéricos 3D de cidades;
- Analisar os padrões internacionais mais utilizados para o armazenamento e o compartilhamento de modelos com geometria e semântica: CityGML e *Industry Foundation Classes (IFC)*;
- Identificar e discutir as principais funcionalidades do 3DCityDB; e
- Propor e testar um *framework* para a visualização na *web* de um conjunto de edificações do Pelourinho.

1.3 METODOLOGIA

Neste trabalho, o método utilizado foi o *Design Science Research (DSR)*, que possui a abordagem *Design Science*. As ciências sociais e naturais dão conta de explorar, descrever e explicar os fenômenos do mundo real, porém, a resolução de problemas práticos geralmente demanda a concepção e o teste de formas possíveis de solucioná-los, que não poderiam ser alcançadas apenas com a apreensão dos problemas (PEREIRA, 2017).

Deste modo, nos estudos dedicados à resolução de problemas é aconselhável o uso de uma ciência estruturada com o propósito de realizar o desenvolvimento de artefatos¹¹, solucionar problemas e aprimorar sistemas reais. Essa ciência existe e é denominada *Design Science*. Sua utilização na concepção de soluções também resulta na produção de conhecimento científico (BROCKE; HEVNER; MAEDCHE, 2020).

O DSR abrange o processo de projeção de artefatos, bem como orienta a solução, avaliação e a comunicação de respostas obtidas para problemas. Os

¹¹ São denominados como artefatos os objetos concebidos pelo homem para funcionalidades e finalidades específicas.

artefatos podem ser classificados como métodos¹², modelos¹³, constructos¹⁴ e instanciações¹⁵ (BROCKE; HEVNER; MAEDCHE, 2020; PEREIRA, 2017).

Nesta pesquisa, foi desenvolvido um artefato do tipo método (*framework*) para a construção de modelos numéricos 3D de cidades. Além de ser construído, o artefato foi avaliado utilizando-se critérios de desempenho, que foram a operacionalidade, a generalização e a facilidade de aplicação (MARCH; SMITH, 1995).

1.3.1 Etapas da pesquisa

Este trabalho foi elaborado através das etapas apresentadas por Brocke, Hevner e Maedche (2020) para o *Design Science Research*. As etapas compreenderam: a identificação do problema; a definição dos objetivos para a solução; a construção do artefato; a demonstração do uso; a sua avaliação; e a comunicação dos resultados da pesquisa.

1.3.1.1 Identificação do problema

A pesquisa iniciou com a definição do problema científico, que já foi apresentado na seção 1.2.1, e com a sua compreensão através da revisão da literatura, que abarcou o CIM e o processo de construção de modelos numéricos 3D de cidades em CityGML. A revisão da literatura é importante em todas as pesquisas, uma vez que possui caráter exploratório e permite maior familiarização com os problemas científicos (GIL, 2002).

Uma etapa que influenciou a escolha do problema científico foi a participação, em outubro de 2018, do curso “*Data acquisition for city modeling*”, promovido pelo Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais (LCAD) da UFBA. O curso foi ministrado pelo professor Thomas Vögtle do Instituto de

¹² O método diz respeito a um conjunto de etapas empregadas para que seja possível alcançar um objetivo. Assim sendo, também pode ser compreendido como um caminho proposto para solucionar um problema (MARCH; SMITH, 1995).

¹³ Os modelos são empregados para representar situações de modo que esteja incluída a estrutura da realidade (MARCH; SMITH, 1995).

¹⁴ Os constructos são conceitos concebidos para a descrição de problemas e o detalhamento das soluções possíveis (MARCH; SMITH, 1995).

¹⁵ As instanciações são a operacionalização dos artefatos em ambientes reais, com a finalidade de comprovar a eficiência e viabilidade deles (MARCH; SMITH, 1995).

Tecnologia de Karlsruhe, e pela professora Natalie Johanna Groetelaars, da Universidade Federal da Bahia. Esta atividade permitiu aprender a construção de modelos geométricos de superfície a partir de nuvem de pontos. Além disso, fez com que fosse despertado o interesse pela conversão dos modelos para CityGML, e pelo seu armazenamento em um banco de dados.

Em seguida, iniciou-se à revisão de literatura dando ênfase à leitura de pesquisas internacionais, uma vez que outros países, principalmente europeus, estão em estágio mais avançado de construção de modelos numéricos 3D de cidades em CityGML.

Em geral, a revisão bibliográfica contemplou:

- Estudo sobre o estado da arte da Modelagem da Informação da Cidade
 - revisão sobre os conceitos existentes para o CIM na literatura;
 - identificação dos desafios do CIM; e
 - síntese de uma conceituação para o CIM.

- Estudo sobre os modelos numéricos 3D de cidades
 - estudo sobre os métodos de construção de modelos geométricos e semânticos de cidades;
 - estudo do padrão IFC;
 - estudo do padrão CityGML;
 - identificação de limites e potencialidades do 3DCityDB; e
 - estudo de aplicações de modelos semânticos de cidades.

1.3.1.2 Definição do objetivo

Todo artefato é concebido para dar uma solução viável e possível a um problema. Nesta pesquisa, com o artefato desenvolvido pretendeu-se estabelecer um procedimento para a construção de um modelo geométrico e semântico de edificações localizadas no Pelourinho, em Salvador na Bahia, para a visualização na *web*, com o uso de ferramentas gratuitas ou de baixo custo.

1.3.1.3 Construção do artefato

Um artefato do tipo método foi proposto para a construção de um modelo numérico 3D de cidade. O método concebido é um *framework* que reúne diferentes ferramentas em uma sequência que satisfaz ao objetivo do estudo.

1.3.1.4 Demonstração do uso

Na etapa de demonstração do uso o artefato precisa ser testado. Assim sendo, foram desenvolvidas atividades experimentais. As atividades começaram com a aquisição de dados da área de interesse. Foram empregados dados oriundos de fotografias (aéreas e terrestres) e de imagens de satélite para geração de um modelo geométrico de superfície simplificado. Depois dessa etapa, o modelo foi convertido para o Padrão CityGML. Tendo sido verificada posteriormente a sua validade geométrica e semântica.

Com o modelo da área de interesse em CityGML, o pacote de *software* 3DCityDB foi utilizado para importação, exportação e visualização do modelo armazenado em um sistema gerenciador de base de dados (PostgreSQL/PostGIS).

Em geral, a construção do modelo geométrico e semântico do Pelourinho demandou:

- aquisição de dados de um conjunto de edificações;
- construção de um modelo geométrico de superfície simplificado;
- conversão desse modelo geométrico para o formato CityGML;
- armazenamento do modelo CityGML no PostgreSQL/PostGIS através do 3DCityDB;
- inserção de atributos semânticos no modelo;
- visualização do modelo em um navegador da *web*; e
- análise e validação do *framework* proposto.

1.3.1.5 Avaliação

Neste passo, o *framework* foi avaliado em relação à sua facilidade de utilização, operacionalidade e generalidade (MARCH; SMITH, 1995). A facilidade de uso diz respeito à praticidade de utilização do artefato. A generalidade foi estudada pela delimitação da aplicabilidade do *framework* e, a operacionalidade foi analisada levando-se em consideração a funcionalidade da solução proposta.

1.3.1.6 Comunicação

A comunicação dos resultados alcançados nesta pesquisa ocorrerá por meio desta dissertação.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este texto está estruturado em seis capítulos, cujo conteúdo de cada um deles é brevemente descrito a seguir.

No Capítulo 1 há uma abordagem geral sobre a temática investigada. Para isso, são apresentados o contexto da pesquisa, a justificativa, os objetivos e a metodologia empregada no trabalho.

Nos Capítulos 2, 3 e 4 são apresentadas as revisões bibliográficas sobre o tema. O Capítulo 2 trata os aspectos conceituais da Modelagem da Informação da Cidade. O Capítulo 3 apresenta e discute os métodos de aquisição e processamento de dados para a construção de modelos numéricos 3D de cidades. Já o Capítulo 4, contém a apresentação e a discussão sobre os padrões CityGML e IFC, as funcionalidades do 3DCityDB e as aplicações dos modelos geométricos e semânticos de cidades.

No Capítulo 5 é apresentado o artefato (*framework*) proposto para construção e visualização de um modelo urbano na *web*. Suas características e limitações são discutidas neste capítulo.

Por fim, no Capítulo 6, as principais conclusões do estudo são apresentadas. Além disso, as questões que permanecem em aberto e que configuram oportunidades para trabalhos futuros são elencadas.

2 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CIDADE

Este capítulo aborda os aspectos fundamentais em relação a Modelagem da Informação da Cidade. Inicialmente, foram discutidas as ideias de modelo, modelagem, *Building Information Modeling* (BIM) e sua relação com o CIM. Além disso, diferentes conceituações e desafios do CIM foram apresentados.

2.1 MODELOS E MODELAGEM

Os modelos são utilizados para representar objetos, fatos e fenômenos. Geralmente, eles são formulações simplificadas para finalidades específicas, e conseqüentemente são menos que a realidade, constituindo um sistema homomórfico¹⁶ do mundo real. Assim sendo, pode-se afirmar que os mesmos não representam completamente um determinado objeto, fato ou fenômeno (CÂMARA, 1995).

Segundo Serra (2006) os modelos podem ser classificados quanto à:

- Finalidade;
- Constituição; e
- Aspectos temporais.

Em relação à finalidade, os modelos podem ser descritivos, exploratórios, de planejamento e preditivos. Enquanto os modelos descritivos objetivam explicar e compreender a realidade, os modelos exploratórios visam à descoberta de outras realidades possíveis. Já os modelos de planejamento propiciam a otimização de variáveis utilizando os modelos de simulação. Por fim, os modelos preditivos existem com o intuito de prognosticar o futuro. Por sua vez, estes modelos podem ser subdivididos em extrapolativos ou condicionais. Enquanto os modelos preditivos extrapolativos utilizam as tendências atuais para projetar o futuro, os modelos preditivos condicionais são baseados em relações de causa e efeito (ECHENIQUE, 1975; SERRA, 2006).

Quanto à constituição dos modelos, eles podem ser físicos ou conceituais. Os modelos físicos possuem características análogas às dos objetos reais. Por sua vez,

¹⁶ A palavra 'homomórfico' vem de homomorfismo. Sua origem é grega, sendo que ὁμός (homos) significa 'mesmo' e μορφή (morphé) significa 'formato' (WIKIPÉDIA, 2018).

os modelos conceituais são baseados em propriedades lógicas e abstrações (ECHENIQUE, 1975; SERRA, 2006).

Os modelos físicos são subdivididos em icônicos e analógicos. Enquanto os modelos icônicos se caracterizam predominantemente pela diferença de escala e nível de detalhe encontrados nos objetos reais (AMORIM, 2018¹⁷), o modelo analógico utiliza regras de transformações para relacionar-se com os objetos reais (ECHENIQUE, 1975; CÂMARA, 1995; SERRA, 2006).

Por sua vez, os modelos conceituais podem ser verbais ou matemáticos. A constituição dos modelos verbais engloba os discursos lógicos escritos ou falados. Os modelos matemáticos podem ser analíticos ou numéricos, e empregam a lógica e as propriedades matemáticas. Enquanto os modelos analíticos são fundamentados em simbologia e notação abstrata, os modelos numéricos são implementados em computadores¹⁸ (ECHENIQUE, 1975; SERRA, 2006).

Finalmente, considerando-se os aspectos temporais, os modelos podem ser estáticos e dinâmicos. Os modelos estáticos consideram o estado do sistema em um dado momento, já os modelos dinâmicos, consideram o comportamento do sistema ao longo do tempo.

Tendo em vista o contexto desta pesquisa é importante esclarecer a ideia de modelagem da informação. O substantivo 'modelagem' pode ter várias interpretações. No entanto, neste trabalho deve ser entendido como o processo ou a técnica de construção do modelo.

A modelagem da informação está relacionada à construção de uma estrutura simbólica baseada em computador que capta o significado da informação e a organiza de forma que seja fácil de entender e usar. Tais estruturas simbólicas também são consideradas modelos conceituais, representando entidades e seus relacionamentos (MYLOPOULOS, 1998; ALMEIDA, 2018).

Para Schenck e Wilson (1994), um modelo de informação é uma descrição formal dos tipos de pensamentos, fatos e processos. Esses pensamentos, fatos e processos juntos constituem um modelo da parte de interesse do mundo real e

¹⁷ Notas de aulas das explicações dadas pelo professor Arivaldo Leão de Amorim na disciplina ARQB30 - Modelagem da Informação da Cidade, ministrada no segundo semestre de 2018 no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Bahia.

¹⁸ Modelos implementados em computadores também são ditos digitais.

forneem um conjunto de regras claras de interpretação de dados. Idealmente, o modelo de informação é uma representação completa, precisa e clara (ALMEIDA, 2018).

Modelos geométricos, por apresentarem apenas a forma dos objetos no computador, não representam a realidade de modo completo. Esses modelos podem ser de aresta, de superfície, de sólidos, ou ainda, de pontos (nuvem de pontos ou *pointcloud*). Para suprir a limitação dos modelos geométricos, foram desenvolvidos os modelos procedurais, os quais permitem representar objetos mais complexos, seus comportamentos, relacionamentos e comportamento dinâmico.

Na Modelagem da Informação da Cidade (CIM) são empregados modelos numéricos 3D de cidades, que representam os diversos tipos de objetos urbanos (edificações, sistema viário, mobiliário urbano, vegetação, corpos d'água entre outros), com suas propriedades (atributos), relações e comportamentos. Cada um dos objetos que constituem esses modelos de cidade possui características: geométricas (forma), gráficas (aparência), topológicas (relacionamentos) e semânticas (propriedades/comportamentos).

O surgimento dos modelos BIM, e mais recentemente, dos modelos CIM, parecem contradizer duas premissas clássicas da modelagem, que estabelecem “[...] ser o modelo uma representação reducionista do objeto [...]” e que os “[...] modelos são construídos para finalidades específicas [...]” (AMORIM, notas de aulas¹⁹). Os modelos BIM e os modelos CIM são construídos para múltiplas finalidades e procuram ser representações isomórficas²⁰ dos objetos que representam. Assim sendo, esses modelos são iniciativas que buscam subverter, de certa forma, a ideia de que o modelo é menos que a realidade (AMORIM, 2018).

¹⁹ Notas de aulas das explicações dadas pelo professor Arivaldo Leão de Amorim na disciplina ARQB30 - Modelagem da Informação da Cidade, ministrada no segundo semestre de 2018 no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Bahia.

²⁰ A palavra ‘isomórfica’ vem de isomorfismo. Ela se refere a representações que possuem formas / comportamentos idênticos.

2.2 DISCUTINDO BIM E CIM

O BIM, de acordo com o *National Building Information Modeling Standard Committee* (NBIMS), pode ser entendido como:

[...] uma representação digital de características físicas e funcionais de uma edificação. Como tal, ela serve como uma fonte de conhecimento compartilhado para obter informações sobre uma edificação formando uma base confiável para as decisões durante o seu ciclo de vida desde início. (NBIS, 2007, p. 21, tradução nossa).

Para Eastman *et al.* (2011, p. 16, tradução nossa), o BIM é “[...] uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção.” Com o tempo, o BIM foi ganhando espaço e perspectivas cada vez mais amplas (AHMAD-LATIFFI *et al.*, 2013).

Existem várias conceituações para o BIM. Algumas são específicas, outras mais amplas. Eastman *et al.* (2004), em um artigo intitulado "Modelagem Funcional em Sistemas CAD Paramétricos", descreveram o paradigma BIM da seguinte forma: “Trata-se de uma mudança revolucionária na forma como o projeto é concebido, como as informações sobre o edifício são representadas e como serão utilizadas em operações de construção” (EASTMAN *et al.*, 2004, p. 1, tradução nossa).

Com base na afirmação de Eastman *et al.* (2004), pode-se intuir que o BIM cobre todo o ciclo de vida do edifício, desde o estudo de viabilidade à renovação ou demolição. Em Eastman *et al.* (2008), um guia para o BIM que aponta as melhores práticas para sua implementação, apesar de não conceituar claramente o BIM, os autores apresentam seis características essenciais:

- ser digital;
- ser espacial (3D);
- ser mensurável (quantificável, dimensionável e pesquisável);
- ser abrangente (incorporando e comunicando a intenção do projeto, a performance do edifício, a construtibilidade, e incluindo aspectos sequenciais e financeiros dos meios e métodos envolvidos);
- ser acessível (a toda a equipe de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) e aos proprietários por meio de uma interface interoperável e intuitiva); e

- ser durável (utilizável ao longo de todo o ciclo de vida da edificação).

A origem do termo BIM está diretamente relacionada com a necessidade de um método de construção mais abrangente. Succar (2009) observou a amplitude conceitual do BIM e tentou estabelecer um conceito conciso. Para esse autor, o BIM é um conjunto de políticas, processos e tecnologias mutuamente coordenadas que produzem um método de gestão de projetos de construção de capital e dados de projetos em formato digital ao longo do ciclo de vida de um edifício.

Para Andrade (2012), uma abordagem mais coerente é tratar o BIM como um processo, sistema ou método que tem o propósito de gerenciar informações de construção por meio de modelos numéricos, visando a colaboração, coordenação, integração, simulação e otimização do processo de projeto, construção e operação.

O BIM é uma expressão da inovação tecnológica e processual na construção civil. É um método de geração, troca e gerenciamento de dados ao longo do ciclo de vida de um edifício. Em razão do BIM estar firmemente enraizado no avanço tecnológico, ele também se estende à realidade da comunicação social entre os envolvidos na indústria AECO (SUCCAR, 2013; ALMEIDA, 2018).

Tomando como base as características do BIM é possível verificar a amplitude de seu escopo, que parte de um ponto de vista instrumental e atinge um nível paradigmático mais amplo e complexo. A amplitude e complexidade do BIM tem ficado cada vez mais perceptível diante das diversas conceituações encontradas (RUSCHEL *et al.*, 2013). No entanto, acredita-se que a integração o fará ter um papel importante na reforma da indústria de AECO (BERNSTEIN, 2005).

Succar (2013) enfatiza a importância de construir um pensamento multidisciplinar sobre o BIM, que deve ir além da arquitetura civil pragmática para atingir os ideais de coordenação, colaboração e interoperabilidade da AECO.

O BIM é um novo paradigma que se tornou ressonante em outros campos de pesquisa relacionados à tecnologia da informação. Isso se deve fundamentalmente à grande quantidade de dados associados ao modelo BIM e à forma de vincular esses dados a outros processos de análise, síntese e avaliação (ANDRADE; RUSCHEL, 2011).

O BIM ajuda a integrar melhor os diferentes aspectos de interesse ligados aos edifícios. Por sua vez, o CIM pode ser capaz de integrar melhor as diferentes infraestruturas e serviços na cidade (KHEMLANI, 2005).

A Modelagem da Informação da Cidade pode ser destacada como um novo paradigma em desenvolvimento. Apesar de emergente, sabe-se que sua viabilização depende de conhecimentos de diferentes áreas, tais como Arquitetura e Urbanismo, Engenharias, Geografia, Ciência da Computação, entre outras (ALEXANDER *et al.*, 2009; JANCOSEK; PAJDLA, 2011; XU *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2017).

Acredita-se que o termo CIM foi utilizado pela primeira vez por Khemlani (2005). Ao se basear em BIM, Khemlani (2005) retrata a necessidade de desenvolvimento de uma modelagem capaz de reunir dados urbanos objetivando a interoperabilidade, a colaboração e o controle para proposição de soluções para a cidade.

De 2005 até a presente data, o CIM vem ganhando espaço e diferentes níveis de aprofundamento, entretanto, há importantes questões que precisam ser discutidas e elucidadas, como por exemplo, o que vem a ser o CIM? Tendo em vista que o CIM é um termo proposto tendo como referência o paradigma BIM, é necessário discutir brevemente o entendimento deste último, uma vez que ele é um dos maiores sinais da mudança de paradigma global na indústria de AECO, e isso se deve à eficácia do uso da modelagem de informações (AMORIM, 2015; AMORIM, 2016).

Para alguns autores, tal como Amorim (2015), o CIM surge de uma analogia possível com o BIM. Assim sendo, Amorim (2015, p. 96) afirma que:

[...] uma visão de CIM tem que contemplar necessariamente uma visão de BIM. Em outras palavras, o conceito de BIM está contido no conceito de CIM, da mesma forma que o conceito de CAD está contido no conceito de BIM. É importante destacar que o fato de estar contido não significa estar superado, ultrapassado ou ainda ser substituído, ser substituível ou mesmo ser de importância menor. A condição 'está contido' significa apenas a submissão hierárquica de um sistema em relação ao outro, a partir de uma visão sistêmica, estratégica e integrada. (AMORIM, 2015, p. 96).

Apesar da analogia possível entre BIM e CIM, é importante esclarecer que há muitas diferenças entre a edificação e a cidade. O ambiente urbano é muito mais complexo, nele estão contidos além dos modelos estáticos, os objetos dinâmicos. Assim sendo, para analisar a realidade urbana, entre muitos fatores, as empresas, os transportes, e as pessoas precisam ser considerados.

Sobre a base de dados necessária para viabilizar as aplicações do CIM, é importante ressaltar que as informações precisam ser centralizadas em um único modelo²¹, e que este permita acesso e transação dos dados entre administradores e subsistemas. Assim sendo, é preciso integrar os subsistemas envolvidos e garantir a interoperabilidade deles (AMORIM, 2015).

Nas últimas décadas, as ferramentas *Geographic Information System* (GIS) têm sido desenvolvidas para dar suporte às atividades relacionadas com gestão (manutenção e operação), planejamento e monitoramento de sistemas, tais como de políticas públicas, segurança e infraestrutura²² (AMORIM, 2015). Para Gil *et al.* (2010), os modelos CIM terão características SIG e CAD, necessitando de integração de dados e interoperabilidade.

Para Amorim (2016), boa parte das ferramentas tecnológicas necessárias para a implementação do CIM já existem, no entanto, foram desenvolvidas para resolverem problemas específicos e independentes, caracterizando-se como ferramentas e abordagens *stand alone*.

[...] uma parte desta tecnologia já está incorporada nas plataformas para *Building Information Modeling*, como as ferramentas para planejamento e gestão da construção, orçamento etc., e que não são específicas para a aplicação em edificações. Deste modo, com a introdução de pequenos acréscimos nos seus códigos fontes e estruturas de dados, essas ferramentas poderão ter os seus escopos expandidos e serem facilmente integradas às ferramentas CIM (AMORIM, 2016, p. 486).

No contexto descrito por Amorim (2016), surge a necessidade do desenvolvimento de uma abordagem integradora e, até mesmo, colaborativa para as aplicações do CIM. Isso significa que os diferentes agentes interessados no CIM deverão ter a capacidade de colaborar entre si para integrar as ferramentas que existem, por exemplo, para planejar e gerir as edificações, e que podem ser também aplicadas após as devidas adaptações para o contexto urbano.

²¹ A centralização de informações em um modelo único ainda não recebe a devida atenção por parte das administrações municipais, no entanto, é fundamental para que os desafios urbanos sejam enfrentados de forma integrada e colaborativa. Acredita-se que compartilhamento, integração e colaboração são essenciais para concretizar o CIM e as cidades inteligentes (AMORIM, 2016).

²² Por exemplo, saneamento, transportes públicos, telecomunicações, sistemas de saúde e educacionais etc.

2.3 CONCEITUAÇÃO DO CIM

Khemlani (2005), no *blog* AECbytes²³, tomando como base o paradigma BIM, mostrou a necessidade de plataformas adequadas para apoiar a tomada de decisões no contexto dos problemas das cidades de modo mais seguro e rápido por meio de um modelo de informações coeso, controlável e colaborativo. O artigo de Khemlani tratou da crise urbana provocada pelo furacão Katrina e a sua relação com a demanda por novos paradigmas tecnológicos.

As pesquisas relacionadas com o desenvolvimento de tecnologia para a aplicação no CIM são por natureza multi e transdisciplinares, envolvendo áreas tais como Urbanismo, Estatística, Geografia, Engenharia, Ciência da Computação, dentre outras, podendo se relacionar de diferentes formas na criação de soluções para os problemas das cidades (KHEMLANI, 2005).

Atualmente, percebe-se que o termo CIM se difundiu em diversos trabalhos, mas o conceito não é usado de forma unânime na literatura. Mas afinal, o que é o CIM? Amorim (2015) e Almeida e Andrade (2016) são exemplos de autores que abordam a falta de um conceito consensual para o CIM. Em seus trabalhos, para elucidar a ideia de modelagem da informação da cidade, esses pesquisadores investigaram os conceitos de diferentes autores.

Para avançar no desenvolvimento de modelos de informação da cidade são necessárias colaboração e interoperabilidade. Além disso, os modelos precisam ser adequados tanto semanticamente quanto conceitualmente (ALMEIDA, 2018). Sobre a conceituação, o estabelecimento de um conceito comum de CIM pode permitir que os pesquisadores criem fundamentos úteis para resolver questões práticas e teóricas de forma sistemática e integrada. Se por um lado, a existência de conceitos diversos sobre o CIM é desejável para o seu amadurecimento, por outro lado, a existência de múltiplos conceitos pode dificultar seu desenvolvimento coordenado em escala global.

Apresenta-se, a seguir, as diferentes conceituações encontradas para “*City Information Modeling*” na literatura. Como resultado das buscas, serão abordados os

²³ AECbytes é um *website* lançado pela doutora Lachmi Khemlani em novembro de 2003. Nele, são publicadas pesquisas, análises e revisões de produtos e serviços tecnológicos para a indústria da construção. Lá são encontrados artigos, boletins informativos sobre conferências, estudos de caso relacionados ao uso da tecnologia e dicas de especialistas da indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) (AECbytes, 2021).

conceitos elaborados por Hamilton *et al.* (2005), Duarte *et al.* (2010), Hisham (2010), Beirão (2011), Beirão, Montenegro e Duarte (2011), Gil, Almeida e Duarte (2011), Stojanovski (2013), Xu *et al.* (2014), Amorim (2015), Thompson *et al.* (2016), Chen (2018) e Almeida (2018).

Para Hamilton *et al.* (2005), o modelo de informação urbana deve integrar os aspectos econômicos, sociais e ambientais da cidade. Estes autores afirmam ainda que o modelo de informações da cidade tem o objetivo de fornecer suporte para as várias aplicações de planejamento urbano.

Apesar de levarem em consideração a necessidade de integração e a possibilidade de várias aplicações para os modelos CIM, Hamilton *et al.* (2005) não levam em conta a colaboração e a interoperabilidade, que na atualidade são características ditas indispensáveis ao processo de criação dos modelos de informação.

Ainda sobre a ideia de Hamilton *et al.* (2005) para o CIM, Almeida (2018) destaca a necessidade dos modelos serem apresentados em formatos de arquivos interoperáveis, tais como IFC e CityGML²⁴, e menciona que as informações urbanas devem poder ser aplicadas como um conjunto de dados que possa ser facilmente utilizado a partir de um banco de dados, como os usados em SIG.

Duarte *et al.* (2010) elencaram diferentes recursos necessários a uma plataforma CIM:

- Incorporar a ontologia da cidade;
- Responder aos regulamentos e estratégias de planejamento definidas para o local;
- Considerar os antecedentes, mantendo informações sobre a localização e a população;
- Apoiar a elaboração de planos de intervenção urbana;
- Fornecer diferentes alternativas na concepção dos projetos urbanos;
- Incluir modelo de projeto generativo;
- Realizar análise de índices de sustentabilidade;
- Permitir interação entre dados e projeto;

²⁴ Esses padrões são apresentados com o nível de aprofundamento necessário a esta pesquisa no Capítulo 4.

- Possibilitar a visualização interativa de dados; e
- Avaliar e classificar diferentes soluções de projeto.

Mesmo citando recursos que podem enriquecer os modelos, Duarte *et al.* (2010) não elencaram alguns aspectos indispensáveis às plataformas CIM. Tal como observado em Hamilton *et al.* (2005), a interoperabilidade e a colaboração não são contempladas. Assim sendo, os recursos elencados podem ser ditos incompletos, uma vez que acredita-se que garantir a interoperabilidade e a colaboração seja inegociável na ideia de CIM.

Para Hisham (2010, p. 1):

[...] mais recentemente foi cunhado um novo termo CIM ou modelo de informações sobre a cidade, o qual objetiva transformar a maneira como os planejadores urbanos tratam com os seus planos a semelhança dos arquitetos. (HISHAM, 2010, p. 1, tradução nossa).

A conceituação apresentada por Hisham (2010) é simplista. Ao considerar que com o CIM a projeção da cidade ocorrerá à semelhança da projeção da edificação, o autor não leva em conta as várias diferenças existentes entre essas atividades. Um dos aspectos importantes a ser ressaltado é que no projeto das edificações há um número bem menor de restrições em relação a um projeto urbano. Assim sendo, as complexidades de um modelo CIM não foram consideradas (AMORIM, 2015).

Beirão (2011) apresenta o CIM como uma plataforma para projeto, análise e monitoramento urbano, na qual são empregadas análises especializadas e ferramentas de projeção para coletar informações georreferenciadas. As ferramentas são generativas e podem gerar esquemas de conversão. A associação de alternativas para análise e projeção permite a determinação de indicadores de suporte à decisão avaliando objetivamente a qualidade das soluções geradas.

Conforme o parágrafo anterior, Beirão (2011) apresenta o CIM focando no projeto, análise e monitoramento urbano. Apesar disso ser interessante, deve-se levar em consideração as principais finalidades do modelo. Beirão (2011) não considera que o modelo deve ser produzido em um formato padrão que favoreça a interoperabilidade e a colaboração.

Os modelos urbanos interessam aos profissionais de diferentes áreas que lidam com as cidades, assim sendo, os mesmos só serão úteis para uma grande

quantidade de profissionais e aplicações se forem fornecidos em formatos que promovam o uso adequado em outras ferramentas sem a perda de informações importantes. Deve-se lembrar aqui que, normalmente, o processo de conversão de formato de arquivo para uso em outras aplicações geralmente favorece a perda de informação.

Para Beirão, Montenegro e Duarte (2011), CIM é o processo de criação de um modelo de conhecimento e normas padronizadas sobre o ambiente urbano. Seu processo de desenvolvimento ocorre por meio de computadores.

Apesar de levar em consideração uma ideia ampla de CIM, o que conduz os autores a utilizarem o termo 'modelo de conhecimento', a conceituação carece dos dois pilares bem aceitos para a modelagem da informação da cidade, a colaboração e a interoperabilidade.

Do ponto de vista de Gil, Almeida e Duarte (2011, p. 143):

O CIM poderá ampliar o uso dos sistemas de Informações Geográficas (SIG) no planejamento urbano como instrumento de apoio à decisão (WEBSTER, 1993; BATTY *et al.*, 1998), por meio da integração com o Projeto Assistido por Computador (CAD), constituindo uma ferramenta de auxílio ao projeto (DAVE; SCHMITT, 1994; MAGUIRE, 2003). (GIL; ALMEIDA; DUARTE, 2011, p. 143, tradução nossa).

Conforme mostra o texto de Gil, Almeida e Duarte (2011), a integração SIG e CAD poderá auxiliar a projeção e tomada de decisão no planejamento urbano. No entanto, tal como analisado por Hisham (2010), o conceito proposto por Gil, Almeida e Duarte (2011) não leva em conta toda extensão e expectativas para um modelo CIM.

Para Stojanovski (2013, p. 4):

CIM é uma analogia ao BIM em urbanismo. É um sistema de elementos urbanos representados por símbolos em um espaço 2D e dentro de um espaço 3D. Ele também é elaborado como expansão 3D do GIS (SI3D ou sistema de informação 3D) enriquecido com vistas em vários níveis e múltiplas escalas, caixa de ferramentas de projeto e inventário de elementos 3D com seus relacionamentos. (STOJANOVSKI, 2013, p. 4, tradução nossa).

Sobre a conceituação de Stojanovski (2013), percebe-se que o autor pensa o CIM como uma ferramenta para a projeção urbana em 2D e 3D. Essa forma de conceituar o CIM também pode ser considerada simplista, uma vez que não leva em conta que essas ferramentas são importantes não somente para as atividades de projeção, mas até mesmo, para a gestão e o monitoramento urbano.

Xu *et al.* (2014), levando em consideração a interoperabilidade entre BIM e SIG, afirmam que o CIM deve ser um sistema de gestão integrado, multifuncional e eficiente com dados mais completos, modelos mais precisos e maior eficiência. Quanto ao seu objetivo, além de atingir um melhor gerenciamento em todos os níveis, seu foco também está no compartilhamento de informações e na colaboração multisserviços e multidomínios. Assim sendo, o CIM deve desempenhar sua função levando a melhorias na eficiência de gestão da cidade.

A ideia de Xu *et al.* (2014) aborda o CIM como um sistema de gestão integrado e considera os dois pilares indispensáveis para o mesmo, interoperabilidade e colaboração. Apesar disso, os autores não tratam sobre a confiabilidade e a necessidade de um formato padrão para o modelo. Ressalta-se, aqui, que a adoção de um formato padrão adequado é indispensável para que o CIM possa ser multisserviços e multidomínios, tal como destacado por Xu *et al.* (2014).

Sobre o conceito de Modelagem da Informação da Cidade, Amorim (2015, p. 96) afirma que "[...] uma visão do CIM deve necessariamente contemplar uma visão BIM". Além disso, Amorim (2015, p. 96) pondera que:

[...] A informação deve ser centralizada em um único modelo e será acessada e transacionada entre os vários subsistemas do CIM e seus administradores. No entanto, aqui está um dos maiores problemas a serem enfrentados, que é a integração dos vários subsistemas e a garantia de interoperabilidade entre eles. (AMORIM, 2015, p. 96).

Thompson *et al.* (2016) entendem o CIM como uma abordagem transversal e holística para a geração de modelos de dados espaciais nos quais a integração, a aplicação e a visualização dos dados da cidade são utilizadas para gerir e mediar a demanda por terras, propriedades e recursos ambientais. Para eles, o CIM tem como objetivo equilibrar as necessidades das várias partes interessadas, com a finalidade de proporcionar cidades sustentáveis e habitáveis, onde os cidadãos desempenham um papel importante em sua gestão.

Como pode-se observar, Thompson *et al.* (2016) levam em conta a integração e a possibilidade de usar o modelo em diferentes aplicações, tais como visualização e gestão. Apesar disso, a analogia com o BIM, como defendido por Amorim (2015), a colaboração e a interoperabilidade não são consideradas. Assim, a necessidade de adoção de algum formato padrão também não é enfatizada.

Mais recentemente, Chen *et al.* (2018, p. 22) afirmam que:

Um modelo de informações da cidade contém dados espaciais e a representação virtual (sic) de todos os objetos de interesse de uma área urbana. Um modelo CIM bem desenvolvido pode facilitar o trabalho dos planejadores da cidade e os projetos urbanos na abordagem de problemas tais como tráfego, acessibilidade, conectividade e impactos de desastres naturais. (CHEN *et al.*, 2018, p. 22, tradução nossa).

Apesar do conceito de Chen *et al.* (2018) levar em conta que um modelo CIM engloba dados espaciais da cidade que são úteis na gestão urbana, não considera a necessidade de integrar os diversos subsistemas e garantir a interoperabilidade entre eles.

Após avaliar alguns conceitos e determinar convergências, Almeida (2018) conceituou o CIM como:

[...] a Modelagem da Informação da Cidade consiste no desenvolvimento de um modelo de conhecimento compartilhável e baseado em computação, envolvendo processos, políticas e tecnologias, com o propósito de gerar soluções sustentáveis, participativas e competitivas para as cidades. (ALMEIDA, 2018, p. 80).

Para que seu conceito seja melhor compreendido, Almeida (2018) esclarece que:

Entende-se '**modelo de conhecimento**' como um conjunto articulado de classificações, taxonomias, ontologias, modelos, estruturas e teorias (SUCCAR, 2013), orientado à noção de modelagem da informação; entende-se '**compartilhável**' como aquilo que se propõe a ser difundido e de conhecimento consensual (BORST, 1997); entende-se '**baseado em computação**' como aquilo cujos dados são predominantemente coletados, armazenados e processados em formato digital por meio de processos computacionais, e cuja informação é entregue/devolvida em meio digital por meio de mecanismos computadorizados; entendem-se '**tecnologias**' como o campo de aplicação do conhecimento científico com propósitos práticos (OXFORD, 2007 *apud* SUCCAR, 2009, p. 359), e que envolve agentes especializados no desenvolvimento de *software*, *hardware*, *middleware*, equipamentos e sistemas de rede necessários para promover o aumento da eficiência, produtividade e aproveitamento de um determinado setor produtivo; entendem-se '**processos**' como ordenamentos específicos de atividades de trabalho distribuídas no tempo e espaço, com início e fim, entradas e saídas (*inputs* e *outputs*) claramente identificados (DAVENPORT, 1992 *apud* SUCCAR, 2009), e que incorporam aqueles agentes envolvidos em licitações, projetos, planos, construção, uso, gestão e manutenção de construções e equipamentos urbanos; entendem-se '**políticas**' como princípios ou regras escritas que guiam as tomadas de decisão (CLEMSON, 2007 *apud* SUCCAR, 2009, p. 5), e que envolvem os agentes de formação, pesquisadores, além daqueles que distribuem benefícios, alocam riscos e minimizam conflitos na produção de soluções para o espaço urbano, não gerando nenhum produto construído, mas exercendo um papel central de preparação, regulação e contratação nos processos de projeto, planejamento e gestão urbanas e construção; como '**solução sustentável**' entende-se

aquela na qual segue-se uma agenda de otimização do consumo de recursos, tanto em sua elaboração como nos resultados de sua implantação, de modo a não comprometer seu uso ao longo do tempo (BRUNDTLAND, 1987); como '**solução participativa**' entende-se aquela destinada ao fortalecimento de canais de comunicação direta, transparência e abertura de dados, interoperabilidade colaborativa, permitindo alto grau de interação dos cidadãos e sociedade em geral com a governança local, transversalmente e em distintos arranjos (ULRICH *et al.*, 2016); entende-se '**solução competitiva**' como aquela que conduz a cidade a atingir um determinado conjunto de indicadores favoráveis ao aumento de seu potencial atrativo de investimentos e geração de negócios (CHOE; ROBERTS, 2011; BOUSKELA *et al.*, 2016). (ALMEIDA, 2018, p. 80 e p. 81).

Almeida (2018) afirma que a força do conceito proposto vem do uso da palavra 'compartilhável'. Para esse autor, as estratégias de compartilhamento e integração, os processos de colaboração e as tecnologias interoperáveis estão fortemente relacionados. Com o objetivo de tornar o compartilhamento mais eficiente, Almeida (2018) relata que os pesquisadores precisarão determinar, por meio de acordo, as bases de informações a serem utilizadas. No entanto, deve-se esclarecer aqui, que esses aspectos do CIM já haviam sido destacados por Amorim (2016).

O conceito de Almeida (2018) leva em consideração a colaboração quando apresenta o CIM como "um modelo de conhecimento compartilhável". No entanto, não leva em consideração a analogia com o BIM, defendida por Amorim (2015), nem a necessidade de adoção de um formato padrão para uma melhor concretização do compartilhamento do modelo.

Com base nos trabalhos apresentados, percebe-se que os diferentes conceitos encontrados na literatura não englobam toda complexidade e alcance de um modelo CIM. Portanto, permanece em aberto na literatura a necessidade de um conceito mais amplo e consistente. Em razão disso, a seguinte conceituação é proposta para o CIM neste trabalho:

A modelagem da Informação da Cidade é o processo no qual uma base de dados relativa aos diversos aspectos da cidade e análoga ao BIM (confiável, consistente, interoperável e integrada) é construída de forma colaborativa para a representação das cidades e seus diversos subsistemas, em um formato padrão, com a finalidade de possibilitar a sua aplicação em várias operações. Essa base de dados será denominada nesta pesquisa, como modelo CIM.

O conceito apresentado foi elaborado adotando como premissa que o CIM surgiu de uma analogia com o BIM. Como consequência disso, espera-se que o modelo CIM também seja confiável, consistente, interoperável, integrado e baseado em colaboração, tal como desejado no BIM. Visando a garantia dessas características, especialmente a interoperabilidade, é de suma importância a adoção de um formato padrão. Nesta pesquisa, a autora acredita que este formato deve ser o padrão CityGML. As razões para isso ficarão claras no Capítulo 4, onde na seção 4.2, sobre interoperabilidade, são comparados diferentes formatos de arquivos.

2.4 DESAFIOS DO CIM

Com base na revisão da literatura foram identificados importantes desafios que precisam ser superados para que o CIM se concretize. Não se pretende aqui, esgotar as possibilidades em relação aos problemas existentes, mas sim, elencar e discutir alguns dos principais desafios que têm sido reportados constantemente em trabalhos científicos relacionados ao tema desta pesquisa.

2.4.1 Desafio 1: Consistência

Atualmente, diferentes fontes de dados, métodos de reconstrução e ferramentas computacionais são usados para gerar modelos numéricos 3D de cidades. Como consequência disso, os modelos que cobrem uma mesma área podem ter diferenças significativas em relação a geometria, aparência e semântica. Isso resulta em um desafio relacionado com a falta de consistência entre os modelos de cidades de uma mesma área (STOTER *et al.*, 2020).

As diferenças em relação a geometria, aparência e/ou semântica denunciam que os dados usados na criação dos modelos são distintos. Inclusive, em alguns casos, até os formatos dos arquivos são diferentes. As diferenças de formatos e as conversões de arquivos para lidar com as incompatibilidades podem tornar ainda maiores as discrepâncias. Todas as diferenças resultantes dos processos aos quais os modelos podem ser submetidos terão um impacto profundo na prática, uma vez que afetam as ferramentas que utilizam os modelos e a qualidade geométrica e semântica do produto final (STOTER *et al.*, 2020).

2.4.2 Desafio 2: Padronização

A padronização é fundamental para garantir a consistência da geometria e da semântica dos modelos. O CityGML²⁵ é o principal padrão usado para armazenar e trocar modelos semânticos de cidades. Ele é usado como um modelo de informação codificado cuja representação é baseada em XML²⁶ (*eXtensible Markup Language*). Suas definições geométricas são oriundas da *Geographic Markup Language* (GML).

Por meio do CityGML é possível definir as classes dos objetos da cidade, sua composição, atributos e as relações entre objetos distintos. Além dos edifícios, que são comumente representados nos conjuntos de dados em CityGML, há a possibilidade de representar outras categorias de recursos, tais como uso do solo, relevo, rodovias e ferrovias, vegetação, pontes e mobiliário da cidade.

Quando arquivos em formato CityGML são utilizados, há um desafio em relação ao suporte de *software*, que ainda é limitado. Isso pode ser explicado, em parte, pela dificuldade em se oferecer suporte a todas as situações possíveis de definição dos objetos no CityGML, o que por sua vez torna difícil sua implementação completa. Adicionalmente, deve-se considerar que a linguagem XML pode ser prolixa e complexa, tornando-a impraticável para muitos aplicativos (STOTER *et al.*, 2020).

Para superar esses problemas relacionados ao padrão CityGML podem ser utilizados o 3DCityDB e o CityJSON. O 3DCityDB é um sistema gerenciador de base de dados de código aberto, criado para armazenar dados CityGML no Oracle ou no PostgreSQL/PostGIS²⁷. Já o CityJSON, é uma codificação baseada em *JavaScript Object Notation* (JSON). Esse formato é compacto e muito adequado para a troca de dados na *web* e para o suporte de dados tridimensionais. A versão 1.0 do CityJSON foi lançada em 2019. A mesma é compatível com vários *software*, incluindo ferramentas de visualização e modelagem (STOTER *et al.*, 2020).

²⁵ Este padrão é abordado com maior nível de profundidade em uma das seções do Capítulo 4.

²⁶ O propósito principal desta linguagem é o de facilitar o compartilhamento de informações através da *web*.

²⁷ Oracle e PostgreSQL/PostGIS são diferentes sistemas gerenciadores de bases de dados relacionais.

2.4.3 Desafio 3: Qualidade dos dados

A presença de erros nos conjuntos de dados e, portanto, a falta de qualidade dos mesmos, é outra questão que limita o compartilhamento de modelos de cidades entre ferramentas distintas. Erros geométricos e topológicos, tais como duplicação de vértices, superfícies ausentes, interseções de volumes, entre outros, podem não ser percebidos pelos profissionais que constroem os modelos em razão de não serem um problema para o *software* específico usado na modelagem. No entanto, esses erros impedirão que os dados sejam empregados em outras ferramentas úteis, por exemplo, na conversão do modelo para o formato CityGML ou na realização de simulações com os modelos (STOTER *et al.*, 2020).

Esses problemas podem ser evitados no processo de modelagem quando a ferramenta empregada requer que a geometria esteja em conformidade com a norma ISO 19107²⁸ (ISO 19107, 2019). Outra maneira de lidar com esse desafio consiste em utilizar ferramentas que reparam automaticamente os modelos. Apesar de existirem, essas ferramentas não são muito confiáveis, pois para corrigir um erro acabam gerando novos erros em outras partes do modelo (STOTER *et al.*, 2020).

Nouvel *et al.* (2017) afirmam que a qualidade dos dados, expressa por meio das incertezas, disponibilidade e nível de detalhamento, é um grande desafio da modelagem numérica da informação da cidade.

Os aspectos que indicam a qualidade satisfatória dos dados são: disponibilidade, consistência, integralidade, validade temporal e precisão (ISO 19157, 2013). Sobre a disponibilidade dos dados, é importante ressaltar que a mesma é fortemente dependente dos métodos empregados na coleta dos mesmos. A privacidade e a propriedade impactam diretamente na disponibilidade dos dados. Nesse contexto, é importante destacar que ter conjuntos de dados precisos, completos e atualizados para a escala urbana é uma utopia. Assim sendo, é essencial definir estratégias satisfatórias de coleta de dados e controle da qualidade dos mesmos (NOUVEL *et al.*, 2017).

Chen *et al.* (2018) destacam que a superfície dos terrenos, árvores e vias comprometem a qualidade dos dados obtidos por nuvens de pontos em razão de

²⁸ Essa norma apresenta o padrão geométrico exigido para a construção de modelos válidos no padrão CityGML.

produzirem muito ruído. Por sua vez, regiões com grande número de edifícios prejudicam a segmentação necessária para geração dos modelos individuais de edificação. É importante ressaltar também que a reconstrução automática de um grande número de edifícios eleva drasticamente a complexidade do trabalho computacional (CHEN *et al.*, 2018).

Além da qualidade, às vezes há problemas relacionados com a falta de dados. Em muitas situações, não estão disponíveis, por exemplo, os dados de elevação (alturas) necessários para a construção de modelos numéricos de cidades. Comumente, dados de elevação são obtidos por fotogrametria e varredura à laser²⁹, no entanto, a coleta dessas informações continua sendo considerada um processo demorado e caro. Além disso, deve-se ressaltar que em algumas situações os dados estão disponíveis, porém, podem estar desatualizados e/ou imprecisos (BILJECK; LEDOUX; STOTER, 2017).

Mesmo com os avanços recentes do sensoriamento remoto, será necessário algum tempo para que, até mesmo os países desenvolvidos, tenham cobertura nacional de dados de elevação satisfatórios para geração de modelos numéricos de cidades. Nesse contexto, permanece em aberto na literatura a necessidade de avaliar alternativas de construção de modelos numéricos de cidades mesmo na ausência de dados de elevação (BILJECK; LEDOUX; STOTER, 2017).

2.4.4 Desafio 4: interoperabilidade

A interoperabilidade não está relacionada exclusivamente com a troca de arquivos, mas sim, com a necessidade de formatos de arquivos comuns, para que possam ser utilizados em diferentes ferramentas digitais (GIL *et al.*, 2010; AMORIM, 2016).

No CIM, as informações precisam estar centralizadas em um modelo único (base de dados), de modo que as informações possam ser acessadas e transacionadas entre diferentes subsistemas e administradores do CIM (AMORIM, 2015). Assim sendo, é possível afirmar que um dos maiores desafios da modelagem

²⁹ A Fotogrametria e a varredura a laser são explicadas no Capítulo 3.

da informação da cidade consiste em integrar os diferentes subsistemas e garantir a interoperabilidade (AMORIM, 2015).

Tanto do ponto de vista geométrico, quanto semântico, é um desafio converter um modelo de um formato para outro. Cita-se aqui o caso da conversão de um modelo IFC para CityGML ou vice-versa. No padrão IFC, para modelagem da informação da construção (BIM), deve-se integrar os modelos de construções altamente detalhados. Fazer uma conversão automática entre o modelo IFC e o modelo CityGML não é tarefa simples. O problema ocorre em razão do IFC ser semanticamente mais rico que o CityGML, bem como em virtude das representações geométricas usadas em cada um dos padrões poderem ter informações semânticas diferentes (STOTER *et al.*, 2020). Além disso, deve-se esclarecer que os tipos de objetos que estão disponíveis nos dois padrões são diferentes, sob os mais diversos aspectos. Os padrões IFC e CityGML são discutidos com maior riqueza de detalhes no Capítulo 4.

2.4.5 Desafio 5: Manutenção e gestão dos dados

Um outro desafio importante no contexto da modelagem da informação da cidade diz respeito à atualização dos modelos. Em geral, os administradores das cidades estão cada vez mais conscientes da importância de utilizar modelos de informações atualizados nas atividades relacionadas à gestão das cidades. Além da necessidade de atualização dos dados, pode-se destacar também a relevância do armazenamento das diferentes versões dos dados. Encontrar boas estratégias para manter os dados antigos e atualizar os modelos não é uma tarefa simples. Assim sendo, serão necessárias estratégias adequadas para lidar com essas demandas. Stoter *et al.* (2020) sugerem que os dados de modelos BIM/IFC aprovados pelos municípios para legalização das obras sejam empregados no processo de atualização. No entanto, reconhecem que nesse contexto surgem algumas questões difíceis de serem resolvidas como, por exemplo: quem é responsável pelos dados? Como garantir que a propriedade intelectual do projetista seja respeitada?

2.4.6 Desafio 6: Implementação de novas tecnologias

Um dos desafios encontrados na modelagem da informação da cidade diz respeito à implementação das novas tecnologias. Apesar de às vezes mostrarem-se

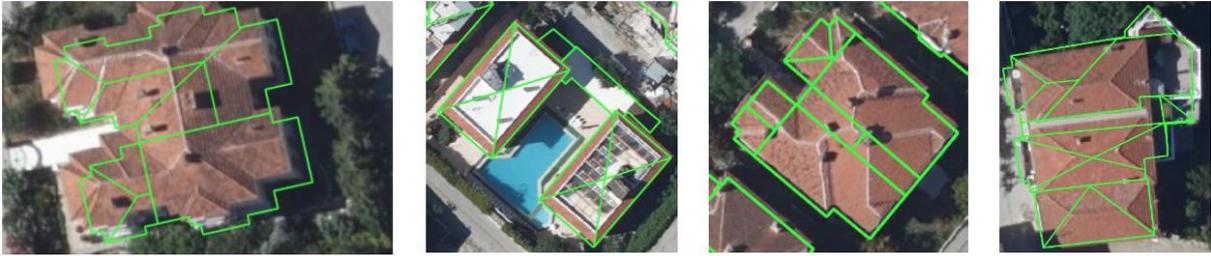
promissoras em testes pilotos, elas podem apresentar muitos problemas em casos reais envolvendo grandes áreas urbanas. Os problemas geralmente surgem porque para grandes áreas é mais interessante o uso de alternativas automatizadas, no entanto, quanto maior o grau de automação, mais desafiante fica o controle e o monitoramento da qualidade dos dados.

No CIM, podem ser utilizados *software* que permitem a reconstrução automática das edificações. No entanto, as ferramentas tecnológicas disponíveis atualmente para esse fim possuem limitações. Para exemplificar isso, será tratado a seguir a representação incorreta da cobertura das edificações no *software* denominado BuildingReconstruction. Esse problema pode ocorrer em razão da quantidade limitada de tipos de telhados disponíveis na biblioteca dessa ferramenta.

O BuildingReconstruction possui uma biblioteca com 32 tipos de modelos de telhados (BUILDINGSMART, 2018). Com esse *software*, é possível reconstruir grandes áreas urbanas com diferentes níveis de detalhe. Além disso, permite o processamento rápido de edificações com dados semânticos e a texturização com imagens aéreas. Suas limitações estão relacionadas com a omissão de partes menores do telhado, reconstrução em áreas menores que 1 km² (BUYUKDEMIRCIUGLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018).

As edificações com as geometrias de telhados mais comuns podem ser reconstruídas com boa precisão, no entanto, as edificações com telhados geometricamente mais complexos não são reconstruídas corretamente, por não haver modelo correspondente na biblioteca do *software*. Esse tipo de problema é identificado por inspeção visual e resolvido por meio de edição manual. É importante ressaltar que a edição manual não é um processo fácil, uma vez que a interface do BuildingReconstruction não é muito amigável (BUYUKDEMIRCIUGLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018). A Figura 1 ilustra algumas edificações cujas coberturas foram interpretadas incorretamente pelo BuildingReconstruction 2018, na cidade de Cesme, localizada na província de Izmir, na Turquia.

Figura 1 - Telhados incorretos obtidos automaticamente utilizando o *software* BuildingReconstruction 2018, para cidade de Cesme em Izmir, na Turquia



Fonte: Buyukdemircioglu, Kocaman e Isikdag (2018, p. 18).

Os modelos numéricos de cidade criados automaticamente podem ter muitas informações desnecessárias em relação aos criados com elevada carga de trabalho manual. Isso acontece porque o processo de construção automática geralmente ocorre a partir de conjuntos de dados que estão enriquecidos com vias, vegetações e outros objetos urbanos que nem sempre são de interesse. Li *et al.* (2017) propõe o uso de Principal Components Analyses³⁰ (PCA) para simplificar os modelos criados automaticamente. No trabalho desses autores, o PCA mostrou-se promissor na compactação do arquivo de um modelo numérico de cidade, sendo capaz de reduzir o documento de 14,7 Mb para 609 Kb.

Tomando como base os problemas que podem surgir oriundos dos processos automáticos de construção dos modelos, deve-se atentar sempre para a necessidade da alta qualidade dos dados. Isso requer que padrões de qualidade sejam definidos e verificados. A esse respeito, Stoter *et al.* (2020) afirmam que a alta qualidade não implica necessariamente em maior precisão dos dados. Para os autores, a qualidade elevada está relacionada com dados atualizados e sem erros, o que por sua vez é bastante positivo para uma ampla gama de aplicações dos modelos.

Além dos problemas técnicos relacionados com a implementação real de novas tecnologias é necessário considerar que também podem existir dificuldades oriundas da falta de conhecimentos e de habilidades ligadas a aquisição, manutenção e distribuição de dados (STOTER *et al.*, 2020). Uma vez que essas dificuldades podem afetar a qualidade dos resultados obtidos com a utilização dos dados, as organizações ou instituições interessadas nos modelos devem treinar seus profissionais e definir

³⁰ O Principal Components Analyses (PCA) foi criado por Pearson em 1901 e aprimorado por Hotelling em 1933; e é provavelmente o método multivariado mais conhecido e empregado para simplificação e redução de dados (PRATI, 2010).

com clareza, por exemplo, como e quais dados devem ser obtidos e fornecidos. Além disso, deve-se definir também quem é responsável pela atualização dos dados.

2.4.7 Desafio 7: Modelagem de formas urbanas irregulares

Quando a modelagem é realizada para cidades históricas, os desafios residem nas formas geométricas irregulares, que podem ser percebidas por meio de ruas estreitas e alta concentração de edificações de valor histórico. Nesse contexto, os aspectos ressaltados, juntamente com o fato de que essas áreas recebem elevado fluxo de visitantes, representam para o processo de coleta de dados grande complexidade. Além disso, os modelos de cidades históricas demandam modelagem mais detalhada e, até mesmo, aplicação de foto-texturas, uma vez que edificações históricas estão sujeitas a alterações com o passar dos anos, e para que as memórias sejam preservadas, uma documentação detalhada é imprescindível (BALSA-BARREIRO; FRITSCH, 2018).

Sobre a reconstrução digital de cidades históricas, deve-se ressaltar que o processamento dos dados requer elevada carga de trabalho manual. Apesar de atraentes, os métodos automatizados possuem limitações em relação a presença frequente de ruídos nas nuvens de pontos obtidas por varredura a laser.

As metodologias com alta carga de trabalho manual têm a vantagem de geralmente proporcionar um elevado nível de realismo dos modelos de edificações históricas geometricamente complexas. Isso é bastante desejável, uma vez que esses modelos são utilizados na documentação do patrimônio cultural, planejamento urbano, promoção turística etc. (BALSA-BARREIRO; FRITSCH, 2018).

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CIM

A Modelagem da Informação da Cidade possui diferentes formas de ser conceituada na literatura. Assim sendo, este capítulo partiu das ideias de modelos, modelagem e BIM para esclarecer a compreensão que se tem do CIM nesta pesquisa. Adotou-se que o CIM é oriundo de uma analogia com o BIM e, deste modo, também é esperado que o mesmo seja uma base de dados colaborativa, integrada, consistente, confiável e interoperável. Além disso, pelo entendimento dos desafios envolvidos na construção de uma base com essas características, a conceituação

elaborada considera a necessidade de adoção de um formato padrão que favoreça a aplicação dos dados nas mais variadas operações.

3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOMÉTRICOS

O conteúdo deste capítulo está focado nos métodos mais utilizados na aquisição e processamento de dados empregados na preparação de modelos numéricos 3D de cidades. Além disso, ao longo do capítulo, são apresentadas algumas ferramentas de modelagem geométrica.

3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

A geração de modelos numéricos 3D de cidades ocorre comumente a partir da integração de dados. Como exemplo, pode-se citar a junção de dados oriundos de fotogrametria ou escaneamento a laser com dados provenientes dos *footprints*³¹ das edificações representadas em sistemas de informações geográficas (JULIN *et al.*, 2018).

Inevitavelmente, o avanço da tecnologia digital teve uma influência significativa na aquisição de dados para a geração de modelos de edificações. Dada a variedade e o potencial dos equipamentos tecnológicos que têm sido desenvolvidos, bem como os preços cada vez mais acessíveis, um dos processos que sofreu alterações substanciais é possivelmente a fase de coleta de dados primários de campo (AMORIM, 2011).

Vários métodos são encontrados para aquisição de dados a serem empregados na modelagem geométrica de cidades e edificações. Os métodos podem ser diferenciados entre si pelos seguintes aspectos: precisão necessária, tempo demandado na aquisição, objetivo do uso do modelo, tamanho e complexidade geométrica do objeto ou extensão da área em estudo (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

As plantas cadastrais e os métodos topográficos são alternativas tradicionalmente empregadas no levantamento de dados e representação urbana. No entanto, tais métodos envolvem processos caros, lentos e, na maioria das vezes, com pouca precisão quando são utilizados na aquisição de dados para representar cidades extensas ou objetos de grandes dimensões e com geometria complexa. Atualmente, vários pesquisadores estão se dedicando para encontrar alternativas com precisão e

³¹ Os *footprints* correspondem ao perímetro externo das edificações representados sobre um mapa, ou um modelo digital de terreno.

eficácia para gerar modelos numéricos 3D de cidades. Essa busca ocorre em razão da elevada demanda de trabalho envolvida na obtenção de modelos geométricos de grandes áreas com precisão (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

No estado da arte da aquisição de dados urbanos geométricos e de edificações tem se destacado o uso de técnicas digitais, especialmente os sistemas baseados na varredura a laser e restituição fotogramétrica automatizada, os quais proporcionam a geração de nuvem de pontos (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

A obtenção de modelos digitais tridimensionais de áreas urbanas pode envolver dois grupos de métodos, sendo um de novos dados e outro que usa dados já existentes (ÁLVAREZ *et al.*, 2018).

Enquanto no grupo de dados novos são utilizados comumente métodos que possibilitam a geração de modelos por meio de varredura a laser ou fotogrametria³², no grupo de dados existentes são empregadas imagens de satélite ou plantas cadastrais, as quais podem servir de base para geração de modelos simplificados, bem como podem ser usadas bibliotecas de programas com diferentes modelos de edificações (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

3.1.1 Medição direta

Esta técnica de levantamento é a que demanda os instrumentos mais elementares de cadastramento. Trens³³, fios de prumo³⁴, e níveis de bolha, ótico ou mangueira³⁵ são comumente usados quando a medição direta é escolhida para o levantamento. No uso desta técnica é necessário determinar em campo os pontos que deverão ser levantados. A quantidade e o posicionamento dos pontos são definidos com base no nível de detalhamento desejado para os produtos de interesse (fachadas, cortes etc.) (GROETELAARS, 2015).

As medições podem ser realizadas utilizando o procedimento de triangulação, irradiação ou coordenadas cartesianas. A triangulação é o procedimento mais empregado, e está fundamentada na divisão das formas de interesse em triângulos.

³² Automatizada ou interativa.

³³ Trens são empregadas em medição linear.

³⁴ Fios de prumo são usados quando se deseja verificar a verticalidade.

³⁵ Níveis de bolha, ótico ou mangueira são empregados quando o interesse está na verificação da horizontalidade.

Para que erros não sejam propagados é indispensável que as medidas sejam levantadas como cotas acumuladas (GROETELAARS, 2015).

Por sua simplicidade e equipamento de baixo custo, como trenas, fios de prumo e níveis, a aquisição de dados de edificações usando medição direta continua sendo altamente essencial e útil. Esta abordagem agora pode ser melhorada usando equipamentos de medição baseados em microeletrônica digital, como trenas digitais, níveis à laser, goniômetros e prumo. Como resultado, essa abordagem ainda é viável e popular para estruturas com formas básicas (poucas faces poliédricas), poucos detalhes ornamentais e pequenas, principalmente em relação à altura. Também a medição direta é inadequada para um grande número de edificações.

3.1.2 Métodos topográficos

Os métodos topográficos englobam um grupo de processos e técnicas usados na determinação de distâncias e ângulos por meio de instrumentos, tais como estações totais, teodolitos e distanciômetros. A utilização desses instrumentos está fundamentada na definição dos pontos empregados para fazer as observações (estações) e na obtenção das direções entre pontos de medição. O posicionamento espacial dos pontos pode ser alcançado pela observação de duas ou mais estações ou, pelo uso de apenas uma estação, sendo necessário nesse caso observar as direções (ângulos verticais e horizontais) (GROETELAARS, 2015).

Em se tratando da aquisição de dados, as edificações complexas, especialmente as que possuem muitos ângulos não retos, costumam ser um desafio para o levantador, pois é difícil fazer a medição e o controle da deformação desses ângulos por medição direta, sem o subsídio de instrumentos topográficos (AMORIM, 2011).

Usar a topografia para determinar pontos de difícil acesso em levantamentos, bem como medir ângulos em formas irregulares com o subsídio de uma poligonal topográfica fechada, permite a compensação de erros e garante a precisão das dimensões lineares e angulares na medição direta. Essa é uma forma de sanar as limitações indicadas anteriormente. Além disso, a topografia é uma forma precisa de determinar as coordenadas de pontos que não são mensuráveis diretamente. Com a automação dos equipamentos de levantamento, a identificação das coordenadas de

pontos, distâncias e ângulos ficou mais fácil, pois o aparato tecnológico faz os cálculos e as anotações (AMORIM, 2011).

O levantamento cadastral por topografia é adequado para um pequeno grupo de edificações, seja pelo tempo demandado, seja pela dificuldade de visada dos pontos imposta pelas divisas das distintas propriedades. Por outro lado, a topografia tem sido largamente empregada em levantamentos semicadastrais, onde somente as caixas das vias, as testadas dos lotes e das edificações são levantadas (AMORIM, 2019³⁶).

3.1.3 GNSS

Outra opção para aquisição de dados é o *Global Navigation Satellite System* (GNSS), ou, em português, Sistema de Navegação Global por Satélite, cuja implementação mais conhecida e amplamente utilizada é o sistema norte-americano conhecido como *Global Positioning System* (GPS) (CARDOSO *et al.*, 2021). Embora possa ter uma aplicação significativa em algumas situações, essa tecnologia geralmente serve a um propósito secundário, o georreferenciamento da edificação ou de um conjunto de edificações (AMORIM, 2011).

Há alguns sistemas de navegação de satélite operando globalmente (CARDOSO *et al.*, 2021). São eles:

- *Global Positioning System* (GPS), construído e operado pelo governo dos Estados Unidos da América desde 1978, sendo o mais utilizado em todo o mundo;
- *Global'naya Navigatsionnay Sputnikovaya sistema* (GLONASS), lançado pela União Soviética em 1982;
- Galileo, lançado pela União Europeia em 2011; e o
- Bei Dou, lançado pela China em 2015.

O GPS é composto por um conjunto de satélites que orbitam a terra e transmitem sinais de rádio para dispositivos receptores determinarem continuamente

³⁶ Notas de aulas das explicações dadas pelo professor Arivaldo Leão de Amorim na disciplina ARQA08 – Tecnologias digitais na documentação do patrimônio arquitetônico, ministrada no primeiro semestre de 2019 no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Bahia.

sua posição (altitude, latitude e longitude). A velocidade e o tempo também podem ser conhecidos para pontos de interesse onde se encontre o receptor GPS perto ou sobre a superfície terrestre (GROETELAARS, 2015; CARDOSO *et al.*, 2021).

No mercado podem ser encontrados diversos tipos de equipamentos GNSS, os quais se diferenciam principalmente pela precisão e possibilidade de aplicação (JESUS; OLIVEIRA, 2018). A precisão pode ser de metros para alguns dispositivos (*data loggers*) e de milímetros para outros (equipamentos V30 e RTK). No contexto da aquisição de dados para o CIM, o GNSS pode apoiar a fotogrametria, topografia e varredura a laser. Isso porque possibilita que pontos de controle sejam obtidos e sistemas de referência de cadastramento de áreas extensas sejam uniformizados (GROETELAARS, 2015).

3.1.4 Imageamento por satélite

A aquisição de imagens por satélite se desenvolveu tecnologicamente proporcionando na atualidade a obtenção de imagens de alta resolução, as quais podem ser utilizadas em monitoramentos ambientais, planejamento urbano, prevenção de desastres naturais, modelagem numérica 3D de cidades, entre outras aplicações. As imagens de alta resolução são obtidas por meio de satélites equipados com sensores ópticos³⁷.

Alguns países têm lançado satélites equipados com sensores de alta resolução. Por exemplo, os Estados Unidos lançaram em 2008 o satélite GeoEye 1, que pode fornecer imagens coloridas com resolução espacial de até 0,41 m. Por sua vez, a França lançou em 2014 os satélites Pleiades (1 A e 1 B) que podem fornecer imagens coloridas com resolução espacial de 0,5 m. No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibilizou para a administração pública das esferas municipal, estadual e federal imagens oriundas dos satélites SPOT³⁸ e Pleiades (1A e 1B) que possuem resolução espacial de 1,5 m, 0,5 m e 0,5 m, respectivamente.

O satélite lançado pela China em 2019, Gao Fen-7, é uma fonte de dados muito importante para modelagem numérica 3D de cidades, uma vez que o mesmo foi

³⁷ Sensores ópticos (ou fotoelétricos) são dispositivos que realizam a emissão e recepção de raios de luz infravermelhos. Os raios infravermelhos possuem comprimentos de onda na faixa de 700 a 750 nm (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

³⁸ Os satélites da série SPOT são controlados pela empresa francesa Spot Image.

equipado com altímetros³⁹ a laser que poderão fornecer imagens estéreo com elevação de alta precisão (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Além dos satélites tradicionais de grande porte, pequenos satélites, que neste trabalho serão denominados microssatélites, também têm sido empregados. Para Kramer e Cracknell (2008), os microssatélites têm até 1.000 kg. Entre várias vantagens, eles são mais leves e podem ser produzidos e lançados em grupo, o que por sua vez reduz os custos de pesquisa, desenvolvimento e lançamento. Também é importante destacar que os microssatélites possuem capacidade de coleta de dados maior que a dos satélites convencionais, o que pode ser justificado em relação as vantagens elencadas por Silva (2018).

As principais vantagens são:

- a. oportunidades de missões mais frequentes e, conseqüentemente, um retorno mais rápido de resultados científicos e dados de aplicações;
- b. diminuição do tempo de revisita⁴⁰ quando do uso de constelações de satélites;
- c. diminuição do risco e do prejuízo de falhas e perda do satélite, em comparação com os grandes satélites (ponto de falha único);
- d. aumento escalonado de um único tipo de serviço ou de serviços diversificados / complementares;

[...]

g. uma expansão mais rápida da base de conhecimento técnico-científico; e

h. maior envolvimento da base industrial local e de pequeno porte. (SILVA, 2018, p. 3).

Apesar das vantagens, podem ser elencadas também algumas desvantagens para os microssatélites.

As principais desvantagens do uso de pequenos satélites para sensoriamento remoto são:

- a. capacidade de emprego limitada para atividades de radares de abertura sintética [...];
- b. emprego limitado a órbitas baixas, o que impacta, potencialmente, em um tempo de vida útil menor; e
- c. potencial perda de controle internacional de registro de objetos no espaço, de controle de órbitas e de descomissionamento, que podem impactar no aumento de riscos de colisões e de geração de detritos espaciais. (SILVA, 2018, p. 4).

³⁹ Altímetros são dispositivos empregados para medir altitude.

⁴⁰ É o intervalo de tempo necessário para que múltiplas imagens sejam capturadas a partir de um mesmo ponto de posicionamento do satélite. É o tempo de retorno do satélite à mesma posição.

3.1.5 Fotogrametria

A fotogrametria é uma tecnologia ‘clássica’ e bem conhecida para aquisição de dados que passou por vários estágios de desenvolvimento: gráfico, analógico, analítico e digital. A fotogrametria digital desafiou os paradigmas anteriores da fotogrametria, que exigiam equipamentos extremamente caros e especializados, além de mão de obra altamente experiente (fotogrametristas) (AMORIM, 2011).

A introdução da fotogrametria digital permitiu uma simplificação substancial das operações, diminuindo a necessidade de mão de obra especializada e permitindo que arquitetos e engenheiros possam utilizá-la. Simultaneamente, os recursos financeiros necessários para adquirir equipamentos como câmeras precisas, programas específicos e computadores são significativamente menores do que os necessários anteriormente (AMORIM, 2011; RAHAMAN, 2021).

Desse modo, a fotogrametria ‘clássica’ resolveu o problema do registro de formas complexas usando estereoscopia e representação por meio de curvas de isovalor, enquanto a fotogrametria digital permitiu a geração de vários tipos de modelos geométricos, além da nuvem de pontos, como desenhos técnicos, ortofotos, fotos retificadas e mosaicos (AMORIM, 2011).

Porém, a fotogrametria ainda apresenta algumas limitações, principalmente em relação à captura das imagens, seja por ângulos de visão inadequados, seja por obstrução dos pontos de interesse, por outros objetos, seja ainda, pela dificuldade de se fotografar a parte superior de estruturas muito altas. Entretanto, hoje isto é facilmente solucionável pelo emprego de câmeras fotográficas embarcadas em drones. Além disso, há também o desafio de construir modelos numéricos 3D a partir de imagens obtidas por câmeras descalibradas⁴¹ (RAHAMAN, 2021).

Para facilitar o trabalho com fotografias obtidas por câmeras descalibradas, algumas pesquisas sobre os *software* de modelagem têm investigado desempenho (SCIANNA; LA GUARDIA, 2019), precisão (ONIGA; CHIRILĂ; STĂTESCU, 2017) e algoritmos (KNAPITSCH *et al.* 2017). Há também estudos propondo fluxos de trabalho

⁴¹ Uma imagem descalibrada é obtida quando não são conhecidos os parâmetros de calibração da câmera, como por exemplo distância focal e coeficientes de distorção. Esses parâmetros são fundamentais no processamento das fotografias para corrigir a distorção da lente, medir as dimensões dos objetos ou determinar a localização da câmera em relação a uma cena (MATHWORKS, 2017).

automatizados que podem ser adotados por usuários menos experientes para criar modelos facilmente, com baixo custo ou gratuitamente (RAHAMAN, 2021).

As principais vantagens da fotogrametria são:

- Registros precisos - a fotogrametria é uma alternativa altamente precisa, podendo ser usada com confiabilidade em uma ampla variedade de aplicações (RAHMAN; CHAMPION, 2019);
- Facilidade, rapidez e baixo custo - é uma maneira fácil, rápida e barata de obter medidas e outras informações, como, por exemplo, a aparência real dos objetos. As imagens podem ser usadas repetidamente para novas análises (LINDER, 2006; RAHMAN; CHAMPION, 2019);
- Flexibilidade em relação às dimensões dos objetos que podem ser digitalizados - a fotogrametria é uma técnica de digitalização aplicável para objetos das mais variadas dimensões (LINDER, 2006);
- Acesso a locais difíceis – a fotogrametria aérea pode ser empregada para coletar dados de locais perigosos ou de difícil acesso (RAHMAN; CHAMPION, 2019); e
- Menos interrupções – a fotogrametria pode ser usada para coletar dados de áreas movimentadas, tais como estradas e cidades, sem provocar interrupções na rotina dos espaços em estudo (RAHMAN; CHAMPION, 2019).

A fotogrametria também possui limitações como, por exemplo:

- Suscetibilidade ao clima - uma das principais limitações da fotogrametria diz respeito a sua suscetibilidade a más condições climáticas. A qualidade das imagens pode ser comprometida por chuva, neblina e vento (LINDER, 2006);
- Restrições ambientais – o relevo e a natureza dos ambientes construídos podem ser limitadoras da altura de voo necessária para que sejam atingidas alta precisão e resolução da fotografia (RAHMAN; CHAMPION, 2019); e
- Dificuldade de combinar pontos - na fotogrametria automatizada (DSM) pode ser difícil a marcação e correlação de conjuntos de *pixels* homólogos de objetos com texturas uniformes (como areia) ou superfícies reflexivas (como corpos d'água) (RAHMAN; CHAMPION, 2019).

Dense Stereo Matching, também denominado *Photo-based Scanning* ou *Dense Surface Modeling* (DSM) é um dos métodos mais conhecidos e usados em fotogrametria. Ele propicia a construção de modelos de elevada qualidade e com rapidez, obtidos por diversos tipos de câmeras, inclusive de celulares (RAHAMAN, 2021).

Há uma grande variedade de *software* baseados em DSM no mercado, como por exemplo Regard3D, Colmap, VisualSfm, e Python Photogrammetry Toolbox. Essas ferramentas podem ser sistemas simples ou pacotes profissionais de alta tecnologia (RAHAMAN, 2021).

Rahman e Champion (2019) compararam diferentes pacotes populares de *software* livre e de código aberto que usam DSM. Em resumo, as etapas do trabalho fotogramétrico podem ser apresentadas em seis etapas, as quais são:

- (1) Aquisição de imagens;
- (2) Detecção de pontos, correspondência, triangulação;
- (3) Geração de nuvem de pontos esparsa⁴²;
- (4) Geração de nuvem densa;
- (5) Geração de malha/superfície, e
- (6) Geração de malha TIN texturizada.

Na fotogrametria, após a captura das fotografias, deve ser realizada a geração das nuvens de pontos, malha TIN texturizada e ortofotos. Para isso, é feita a restituição das fotografias em algum *software* específico como, por exemplo, Agisoft Metashape (antigo Photoscan), COLMAP, Autodesk Recap Photo (antigo Autodesk 123D Catch), Pix4D, PhotoMesh, Altizure, entre outros. Estas ferramentas fazem o processamento automático das imagens para gerar a malha triangular irregular (também chamada de malha TIN - (*Triangular Irregular Network*) e a nuvem de pontos (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

A documentação fotogramétrica tem diversas aplicações. Para exemplificar, podem ser citadas as áreas de turismo e de educação, que podem utilizar os modelos

⁴² A nuvem de pontos esparsa é obtida por meio da identificação e correlação automáticas das feições análogas de diferentes fotografias.

obtidos por fotogrametria em atividades ligadas à divulgação e preservação de patrimônios históricos (BERTOCCI; ARRIGHETTI; BIGONGIARI, 2019).

A fotogrametria é econômica em comparação à digitalização a laser e pode envolver o uso de sistemas automatizados na geração de modelos numéricos 3D. No entanto, a depender do nível de automatização desejado, haverá despesas relacionadas com a aquisição de licenças de *software* comerciais e com treinamentos para desenvolvimento das habilidades técnica essenciais (SCIANNA; LA GUARDIA, 2019).

3.1.5.1 Fotogrametria terrestre

A fotogrametria pode ser aérea ou terrestre. Por sua vez, na fotogrametria terrestre, também conhecida como fotogrametria a curta distância, são obtidas fotografias por meio de uma câmera localizada próxima ao solo. As imagens obtidas são usadas para criar, por exemplo, nuvens de pontos⁴³ e modelos de superfície simplificados de pequenos objetos ou de edificações. Nesse caso, não são criados mapas ou modelos de terreno (produtos topográficos). A fotogrametria terrestre pode ser realizada com uma câmera comum, tal como a de um *smartphone* (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Sobre a utilização da fotogrametria, é necessário compreender que a mesma requer a realização de tomada fotográfica para obtenção de uma série de imagens sobrepostas. Na fotogrametria terrestre isso é alcançado por meio de um conjunto de fotos dos objetos de interesse a partir de vários ângulos da câmera.

3.1.5.2 Fotogrametria aérea

Na fotogrametria aérea, a câmera é colocada em uma aeronave tripulada ou *drone*. Atualmente, as imagens aéreas são a principal fonte de aquisição de dados para a modelagem numérica 3D de cidades. Elas podem possuir alta resolução espacial, ampla cobertura e podem ser obtidas em curto intervalo de tempo. Quando veículos aéreos tripulados são utilizados, entre outros fatores, os custos para a aquisição de dados podem ser mais altos, por exemplo, devido à suscetibilidade às

⁴³ As nuvens de pontos são arquivos de dados com grande quantidade de vértices que foram digitalizados ou escaneados. A identificação dos vértices ocorre por meio das coordenadas X, Y e Z (BENTLEY, 2021).

condições climáticas. No entanto, imagens aéreas (oblíquas⁴⁴ e verticais (NADIR)) obtidas com *drones*, tendem a ser mais baratas em razão dos menores valores requeridos para altura e velocidade de voo. Isso também tem implicação na resolução espacial das imagens, que pode ser da ordem dos centímetros. Além disso, ao empregar os *drones*, as possibilidades de sobreposição de imagens são maiores devido à flexibilidade de voo que estes dispositivos possuem (SHAN; LI; ZHANG, 2019). Os *drones* são muito utilizados atualmente, no entanto, no passado, eram usadas exclusivamente aeronaves tripuladas (KRAUS, 2004).

Após realizar o planejamento de voo para obter uma série de imagens sobrepostas, é necessário proceder o processamento. No processamento, faz-se necessário utilizar *software*⁴⁵ que identifiquem pontos de interseção geométrica dos raios de luz entre duas ou mais fotos, bem como informações específicas da fotografia, como a posição, ângulos e a distância focal da câmera, distorção da lente e tamanho do *pixel*. É importante compreender que cada ponto das imagens capturadas define um raio de luz no espaço que começa com a câmera e se estende até o ponto correspondente do objeto ou paisagem real. A identificação dos pontos correspondentes ao mesmo local 3D, onde há interseção de raios de luz para duas ou mais imagens, é denominada triangulação. Isso pode ser feito manualmente ou automaticamente. A triangulação ocorre de modo semelhante à forma como os olhos humanos funcionam para criar a percepção de profundidade. Tal percepção ocorre em razão dos olhos enxergarem os objetos de diferentes ângulos. O cérebro processa as diferentes imagens e as transformam em uma única imagem. Esse processo da visão denominado estereoscopia é semelhante à triangulação (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

O processamento das imagens obtidas por *drones* é semelhante ao realizado com imagens aéreas de veículos aéreos tripulados. Isso é mais uma característica importante que favorece a alta aplicação dos *drones* na aquisição de dados 3D. O uso

⁴⁴ A imagem aérea oblíqua é obtida quando o eixo da câmera utilizada na aquisição da imagem não está direcionado o mais verticalmente possível para o solo. Imagens oblíquas podem ser mais facilmente compreendidas que aquelas obtidas com o eixo da câmera perfeitamente na vertical. Apesar disso, os objetos localizados no plano de fundo das imagens oblíquas geralmente ficam muito pequenos, o que dificulta seu reconhecimento, ou podem ficar ocultos atrás de construções. Para obter fachadas detalhadas, as imagens aéreas oblíquas são preferíveis (SHIODE, 2001).

⁴⁵ Como ferramentas que podem ser utilizadas no processamento fotogramétrico destacam-se: Autodesk ReCap Pro, Agisoft Metashape, Meshroom, Pix4D, 3DF Zephyr, Regard3D, PhotoModeler, WebODM, RealityCapture e COLMAP.

da fotogrametria aérea para obtenção de imagens oblíquas de alta resolução possibilita a reconstrução das partes laterais e superiores de edificações quando se tem ao menos cinco perspectivas distintas: uma vertical e quatro inclinadas (laterais). Essa nova tecnologia desenvolvida nos últimos anos favorece à reconstrução de modelos que reflitam melhor a realidade, uma vez que possui alta precisão e fornece as texturas. Além de melhorar a representação das coberturas, a fotogrametria aérea com imagens oblíquas melhora o registro das fachadas, permitindo o registro bem completo e eficiente das edificações (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

É importante esclarecer também que os programas de fotogrametria usam algoritmos para obter informações tais como ângulos de câmera, localizações e características dos pontos correspondentes. Os *software* geralmente são capazes de criar superfícies, linhas, texturas e modelos geométricos completos usando as localizações dos pontos no espaço (KRAUS, 2004).

Os métodos fotogramétricos podem ser utilizados para a construção de nuvens de pontos, as quais podem ser produzidas a partir de técnicas de Reconhecimento de Padrões, Processamento de Imagens e Visão Computacional. Apesar de terem custos significativamente mais baixos do que o do *3D laser scanning*, que será apresentado na próxima seção (3.1.6), os modelos de pontos geométricos ainda requerem muito processamento. Independentemente disso, suas principais vantagens são o baixo custo em relação à varredura a laser e a diminuição do tempo de trabalho em campo (AMORIM, 2011).

No contexto desta pesquisa, é necessário destacar que os modelos de superfície com textura são os produtos de interesse que os métodos mencionados anteriormente podem oferecer. Esses modelos podem ser gerados por meio de métodos interativos (Fotogrametria digital *stricto sensu*) e por nuvens de pontos resultantes do processamento (digital) de fotos (DSM - *Dense Stereo Matching*) ou varredura a laser (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

3.1.6 Varredura a laser

O 3D *laser scanning*, especificamente os que utilizam a tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*⁴⁶), é útil na obtenção de dados espaciais que podem ser empregados, por exemplo, na construção de mapas de alta resolução e modelos numéricos de superfícies e terrenos. Seu uso possui aplicações em áreas tais como geodésia, geomática, arqueologia, geografia, geologia, geomorfologia, silvicultura, entre outras. O mesmo também pode ser usado para fazer representações digitais 3D do fundo do oceano. Desde que surgiu, em 1930, o LiDAR tem sido usado fortemente em meteorologia e estudos atmosféricos. Para se ter ideia da sua importância, a National Aeronautics and Space Administration (NASA), indicou o LiDAR como uma tecnologia fundamental para o pouso preciso e seguro de veículos robóticos e tripulados na lua (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Nas últimas décadas, a varredura a laser tem sido empregada e aprimorada devido à sua adaptabilidade na captura de qualquer forma e alta velocidade de coleta de dados. Esta técnica cria nuvens de pontos em falsa cor ou em cores realistas, possibilitando modelos geométricos precisos. Apesar da tecnologia da varredura a laser ter suas vantagens, o preço de seu uso na documentação arquitetônica continua elevado no Brasil. Além disso, tal como acontece no DSM, há a demanda pelo processamento de um grande número de pontos, o que será melhor explicado na seção 3.2. Os modelos geométricos de nuvem de pontos e, após o processamento, os modelos de superfície e as ortofotos, são os principais produtos desse tipo de tecnologia. O processamento dos dados primários também possibilita a obtenção de outros produtos. A velocidade com que essa tecnologia captura dados em campo, bem como a capacidade de trabalhar no escuro se a aquisição da textura da superfície do objeto não for necessária, são vantagens significativas da varredura a laser (AMORIM, 2011).

Na varredura a laser, um feixe de luz com comprimento de onda na faixa da luz visível, ultravioleta e/ou infravermelha é empregado para alcançar objetos que consigam provocar sua reflexão. Os comprimentos de onda podem variar, a depender do objeto a ser escaneado, de aproximadamente 10 micrômetros (infravermelho) a cerca de 250 nm (ultravioleta). Nesta tecnologia, as distâncias entre o equipamento e

⁴⁶ Em tradução livre para o português, Detecção e Alcance de Luz.

os objetos escaneados são obtidas pelo tempo que a luz leva para retornar ao receptor após sua emissão e reflexão. O uso de um feixe de laser pulsado permite o mapeamento de alta resolução. A aquisição dos dados pode ocorrer a partir de dispositivos terrestres e aéreos.

Em pesquisas recentes, tal como a de Maalek e Lichti (2021), *smartphones* têm sido testados na varredura a laser para a geração de nuvens de pontos. Segundo Sadeq (2018), isso ocorre em razão do rápido desenvolvimento tecnológico observado na atualidade para os dispositivos móveis, o qual é impulsionado pela competitividade que existe nesse mercado. Os fabricantes buscam o desenvolvimento de câmeras com sensores de reduzido tamanho e com elevada qualidade na captura. Com o propósito de avaliar esses dispositivos, Khalloufi *et al.* (2020) realizaram a varredura a laser de sítios históricos marroquinos e Tavani *et al.* (2020) de uma falésia. Em ambos os casos, os *smartphones* foram apresentados como equipamentos de baixo custo que permitem alcançar resultados com boa precisão.

3.1.6.1 Varredura a laser aerotransportada

A varredura a laser aerotransportada consiste no uso de um dispositivo a laser embarcado numa aeronave. A partir de um voo é criado um modelo de nuvem de pontos da área escaneada. Esse método é atualmente considerado o mais detalhado e preciso para criação de modelos digitais de elevação. Uma grande vantagem dessa tecnologia, quando comparada com a fotogrametria, consiste na capacidade do feixe de luz empregado alcançar o solo mesmo em ambientes complexos, tais como em florestas com cobertura vegetal densa (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Apesar das vantagens mencionadas, o uso desta técnica demanda alto custo. Além disso, na aquisição de dados a alta ou baixa altitude influencia os resultados. A precisão e a densidade da nuvem de pontos diminuem quando os dados são adquiridos em altitudes mais elevadas (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

3.1.6.2 Varredura a laser terrestre

A varredura a laser terrestre pode ocorrer a partir de pontos fixos ou móveis na superfície da Terra. O uso de ponto estacionário é mais comum como método de levantamento, por exemplo, em topografia convencional, monitoramento e

documentação de patrimônio cultural. As nuvens de pontos obtidas a partir de *scanners* estacionários podem ser combinadas com imagens digitais para criar modelos de aparência realista em um intervalo de tempo relativamente curto quando comparado a outras tecnologias. Cada ponto da nuvem construída tem a cor do *pixel* da imagem adquirida no mesmo ângulo do feixe de luz (laser) que criou o ponto (LINDER, 2006; MOKROŠ, 2021).

A varredura a laser móvel ocorre quando dois ou mais *scanners* são acoplados a um veículo em movimento para coletar dados ao longo de um trajeto. Esses *scanners* geralmente são combinados com outros tipos de equipamentos, incluindo receptores GNSS e *Inertial Measurement Units* (IMU). Um exemplo de aplicação da varredura a laser móvel é a determinação da altura de pontes, árvores, entre outros. Nesse caso, ao invés de coletar os dados individualmente de cada objeto por medições de campo, um modelo de nuvem de pontos pode ser criado e empregado para realização das medições necessárias. Essa estratégia tem inclusive a vantagem de eliminar os problemas relacionados com o levantamento incompleto das medidas dos objetos. Desde que o modelo esteja disponível, seja confiável e tenha um nível adequado de precisão poderá ser empregado para obter dados dos diferentes objetos localizados na área de interesse (KRAUS, 2004).

Por fim, é importante esclarecer que, na varredura a laser, tal como na fotogrametria aérea, também é possível obter a textura dos objetos. Isso ocorre porque as imagens aéreas podem ser obtidas simultaneamente com os dados coletados na varredura a laser. O City Mapper-2, da LEICA®, é uma tecnologia que combina a aquisição de imagens oblíquas e sensores de varredura a laser. Essa combinação é capaz de melhorar a eficiência do processo de mapeamento em mais de 40% em razão de promover uma rápida digitalização dos dados urbanos com elevada qualidade de texturização, obtida pela integração do *laser scanning* com a tomada fotográfica (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Vale ressaltar que nessa tecnologia, tal como na fotogrametria, as medições são realizadas sem contato direto com os objetos de interesse. Dados topográficos e das construções podem ser obtidos com alta qualidade para modelagem urbana (KRAUS, 2004).

3.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

O estágio de processamento de dados na geração de modelos numéricos 3D de cidades é essencial na transformação dos dados obtidos na coleta em produtos finais. Outro benefício das tecnologias digitais é a capacidade de gerar diferentes produtos a partir dos dados primários coletados, dependendo da quantidade de processamento, utilizando abordagens metodológicas automatizadas, semiautomáticas ou manuais⁴⁷. Esses procedimentos envolvem uma variedade de ferramentas e a utilização de profissionais qualificados, e são essencialmente determinados pelo tipo de tecnologia e produtos a serem gerados. No entanto, como a coleta de dados primários impacta o resultado final, mais atenção deverá ser dada à necessidade de planejamento do trabalho (AMORIM, 2011).

Conforme relatado anteriormente, o processamento dos dados pode ser realizado de forma manual (ou interativo), semiautomática ou automática. Em cada uma dessas modalidades são requeridos níveis diferentes de interação homem/computador. O 'processamento manual' permite a obtenção de modelos com alta precisão, no entanto, as áreas estudadas geralmente não são amplas e o tempo de modelagem é longo.

Fotografias oblíquas das fachadas e ortofotos podem ser usadas para modelagem interativa de formas simples. No SketchUp, o Match Photo pode ser utilizado para importar uma foto oblíqua e fazer associação dos eixos x, y e z às arestas que são visíveis em um objeto de interesse, as quais terão correspondência com as linhas ortogonais e paralelas do mesmo. Com isso, é possível visualizar em perspectiva, tal como na foto, o que por sua vez favorece que o profissional interessado modele usando a foto como um pano de fundo. Este tipo de modelagem geométrica corrige as deformações da perspectiva, mas não corrige as deformações óticas da imagem, não sendo considerada como uma aplicação fotogramétrica. Depois da modelagem, a foto pode ser aplicada como textura em cada plano construído (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

Uma outra possibilidade de método interativo diz respeito à modelagem de objetos por meio de ortofotos. Na pesquisa de Koehl *et al.* (2008), em um primeiro momento, foram obtidas as ortofotos das fachadas, oriundas de fotogrametria digital,

⁴⁷ Também podem ser denominadas interativas.

através do Photomodeler. Depois disso, empregando as ortofotos como referencial de modelagem, Koehl e colaboradores realizaram a modelagem da geometria das edificações no SketchUp. Os passos envolvidos na modelagem da geometria foram:

- Construção de um bloco prismático;
- Aplicação das ortofotos às faces do bloco prismático realizando as correspondências necessárias; e
- Criação das feições necessárias com base nas ortofotos até alcançar um formato final do objeto de interesse.

Apesar de muitos dos métodos atuais de construção dos modelos serem concebidos para proporcionar um processo de modelagem automatizado, na prática, os métodos de modelagem semiautomáticos são os mais utilizados (SHAN; LI; ZHANG, 2019). Isso ocorre em razão dos progressos ocorridos na fotogrametria e nas tecnologias de varredura a laser, bem como pela demanda por modelos numéricos 3D de cidades de grandes áreas. Por sua vez, a obtenção de modelos de forma automática, ainda é tecnicamente complexa. A complexidade envolve a necessidade de preparação de dados de diferentes fontes e níveis de detalhe (BUYUKDEMIRCIOLU; KOCAMAN; ISIKDAG, 2018).

O processamento de dados obtidos por medição direta ou métodos topográficos é feito usando ferramentas CAD, como editores de desenho ou modeladores geométricos. Nesses casos, o procedimento é trabalhoso, interativo, demorado e sujeito a interpretações errôneas. Os resultados finais são pranchas de desenhos técnicos ou modelos geométricos para visualização *online* na *web*. Além disso, esses modelos podem ser utilizados para criar produtos adicionais, como animações 3D, utilizando técnicas de síntese de imagem ou análises que empregam simulações numéricas (AMORIM, 2011).

Dense Stereo Matching (DSM) e *3D Laser Scanning* são os sistemas de varredura que mais se destacam no levantamento de cidades e edificações. A justificativa para isso é a precisão e o menor intervalo de tempo requerido para registrar elevadas quantidades de dados em nuvens de pontos. Para o modelo de nuvem de pontos ser utilizado em grande parte de suas aplicações possíveis, seu pós-processamento deve ser realizado. Com o pós-processamento obtém-se uma série de produtos, tais como modelos físicos, desenhos, modelos de superfície ou sólidos

com ou sem texturas, entre outros (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

O uso de nuvens de pontos para geração de modelos de superfície simplificados geometricamente precisos, topologicamente corretos e semanticamente ricos é um desafio tratado em várias pesquisas. Os desafios encontrados no processo de modelagem estão relacionados com a grande quantidade de dados envolvida e a densidade não uniforme geralmente verificada nas nuvens de pontos. Isso implica em nuvens de pontos com ruídos, áreas vazias e sombras (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Com as metodologias disponíveis atualmente, a construção de modelos urbanos a partir de nuvens de pontos incompletas e/ou com erros é uma tarefa complexa. Em razão disso, os pesquisadores têm desenvolvido novos métodos para superar os desafios citados. Um exemplo a ser citado, trata-se do uso de redes neurais de aprendizagem profunda (*deep learning*) para classificar e processar nuvens de pontos.

Para obter modelos urbanos mais realísticos e fáceis de serem compreendidos pelas pessoas, o mapeamento da textura é fundamental. Em razão de melhorar a compreensão, a presença da textura pode facilitar o planejamento e a tomada de decisões quando o modelo é empregado (YANG; LEE, 2019).

As pesquisas nesta área tratam com frequência de métodos automáticos ou semiautomáticos para construção de modelos (YANG; LEE, 2019; ABAYOWA, YILMAZ; HARDIE, 2015). É possível observar que a fotogrametria com obtenção de imagens oblíquas é comumente aplicada como alternativa para construção de modelos numéricos 3D realísticos de grandes áreas. No entanto, problemas relacionados com falta de uniformidade nas cores das imagens e texturas incompletas são importantes obstáculos na obtenção de texturas de alta qualidade. As diferenças de cores nas imagens são ocasionadas por condições climáticas e variações na iluminação.

Yang e Lee (2019) sugerem que uma abordagem computacional baseada em imagens oblíquas pode extrair automaticamente a textura das paredes laterais de um edifício, uniformizar a cor e 'fechar' a nuvem densa da construção. Enquanto isso, Abayowa, Yilmaz e Hardie (2015) sugerem o mapeamento semiautomático da textura

através da combinação automática de imagens. O método é classificado como semiautomático porque o usuário final precisa escolher as texturas.

Ao usar a varredura a laser, o tratamento dos dados começa com o registro de várias nuvens de pontos (modelos parciais) para construir o modelo completo. Os procedimentos de segmentação, filtragem e classificação são feitos neste modelo para criar modelos geométricos de superfícies, ortofotos, desenhos técnicos e uma variedade de outras possibilidades. É possível fazer uma associação das coordenadas dos pontos registrados às suas cores reais usando técnicas fotogramétricas e processamento de imagem, reapresentando a nuvem de pontos em fotos de alta resolução obtidas de ângulos extremamente próximos aos usados na coleta de pontos. O principal desafio dessa técnica é justamente o processamento de nuvens de pontos, devido ao tamanho dos arquivos de dados e à quantidade de processamento requerida, que exige o uso de computadores robustos e pessoal bem treinado (AMORIM, 2011).

Tanto no DSM quanto na varredura a laser há a necessidade de pós-processamento das nuvens de pontos. Essa necessidade é oriunda das dificuldades de visualizar, bem como de importar e realizar aplicações diretas de arquivos de nuvens de pontos, os quais geralmente são grandes. Com o pós-processamento, uma ampla gama de produtos pode ser gerada para diferentes aplicações, tais como malha triangular irregular, desenhos, modelos de superfície, ortofotos etc. (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020).

Os resultados das investigações e testes conduzidos até o momento sugerem que o uso de um único *software* não é flexível e eficiente para atender a todas as possíveis aplicações (GROETELAARS; NASCIMENTO; AMORIM, 2020). Assim, a tecnologia a ser utilizada durante a coleta e processamento dos dados será determinada por uma variedade de critérios, incluindo recursos tecnológicos, humanos e financeiros, prazos de implementação, bem como a experiência dos profissionais envolvidos (AMORIM, 2011).

3.3 PLATAFORMAS DE MODELAGEM

As diferentes possibilidades de aplicações dos modelos geométricos de cidades implicaram no aumento da demanda de ferramentas computacionais

adequadas para geração dos modelos. Como consequência disso têm surgido variados programas para essa finalidade. Como exemplos, podem ser mencionados:

- *Software* de código aberto para modelagem geométrica: Blender;
- *Software* para DSM (geração de nuvens de pontos e malhas triangulares irregulares): COLMAP, Autodesk Recap Photo, Agisoft Metashape (antigo Photoscan), Pix4D, Altizure, Smart 3D Capture, PhotoMesh, entre outros;
- *Software* que podem ser usados para geração de modelos numéricos 3D: AutoCAD, SketchUP, 3D Studio Max, SolidWorks, Maya, entre outros;
- *Software* de modelagem urbana: CityEngine da Esri, Infracore da Autodesk, entre outros; e
- Ferramentas de código aberto para processamento de malha 3D: OpenMesh, Point Cloud Library (PCL), MeshLab, entre outros.

A seguir, serão dadas informações sobre algumas das ferramentas citadas.

3.3.1 City Engine

O City Engine da Esri é um *software* que pode ser utilizado para gerar modelos de áreas urbanas extensas. Nele, dados 2D podem ser empregados para geração de modelos numéricos 3D de cidades. É possível usar diferentes formatos de arquivo nesta ferramenta, como por exemplo, KML, Geodatabase, OpenStreetMap, Shapefile, entre outros. Diferente das ferramentas tradicionais de projeção auxiliada por computador, esse *software* tem a vantagem de gerar automaticamente os modelos numéricos 3D de cidades de grandes áreas. Para isso, é utilizado um conjunto de códigos de Arquitetura Gerada por Computador (AGC), os quais permitem que até modelos complexos sejam criados com parâmetros ajustáveis. Isso tem a vantagem de proporcionar a obtenção de novos modelos a partir do ajuste de parâmetros. O City Engine também tem a vantagem de proporcionar a renderização em tempo real. Sua aplicação pode ser realizada para desenvolvimento de jogos, planejamento urbano, produção de filmes, entre outros (ARCGIS CITY ENGINE, 2021).

3.3.2 SketchUp

O SketchUp possui interface simples e fácil de utilizar. Isso se reflete em sua utilização, que abarca tanto o público em geral, quanto profissionais da arquitetura, planejamento urbano, desenvolvedores de jogos, entre outros. O *software* reconhece automaticamente as linhas desenhadas pelos usuários. Nele, os polígonos formados podem ser fácil e rapidamente transformados em volumes. O SketchUp é comumente empregado na modelagem de interior e exterior de edificações. Alguns de seus recursos incluem o mapeamento de texturas, a possibilidade de geolocalização dos modelos, o compartilhamento através da publicação de modelos no Google Earth ou no 3D Warehouse e a facilitação da exportação para um sistema SIG em razão da rápida determinação de coordenadas espaciais (SKETCHUP, 2020).

3.3.3 Agisoft Metashape

O Agisoft Metashape é um *software* comercial que era denominado Agisoft Photoscan. É empregado no processamento de imagens para geração de nuvem de pontos e, conseqüentemente, dados espaciais 3D, com rapidez e eficiência, os quais podem ser usados em SIG, modelagem urbana, arqueologia, entre outros. Algumas de suas funções também proporcionam a geração de malhas triangulares irregulares texturizadas e ortofotos, mapeamento de texturas, entre outras (AGISOFT, 2021).

3.3.4 Pix4D

O Pix4D, tal como o Agisoft Metashape, também é *software* comercial com aplicação em fotogrametria. Há diferentes produtos pertencentes à série Pix4D como, por exemplo, Pix4Dmapper, Pix4Dfields, Pix4Dbim, Pix4Dengine, Pix4Dmodel, entre outros. Esses produtos podem ser usados em serviços de nuvem, dispositivos móveis e computadores de mesa. O Pix4Dmapper pode processar até 10.000 imagens. Ele pode realizar o processamento de imagens aéreas oriundas de fotogrametria para obtenção de nuvem de pontos. Além disso, pode realizar o processamento de imagens para construção de modelos de superfície texturizados (PIX4D, 2021).

3.3.5 Blender

O Blender é uma ferramenta de código aberto e gratuita, o que faz dele uma alternativa a ser usada no ensino ou comercialmente de modo livre. O *software* pode ser empregado na modelagem geométrica, animação, simulação e renderização de objetos. Por poder ser usado na composição e rastreamento de movimento, também tem aplicação na criação de jogos e edição de vídeos.

Para modelagem numérica 3D de cidades no Blender é possível usar o OpenStreetMap, no entanto, *plugins* serão necessários como, por exemplo, o OpenStreetMap and Terrain *add-on* (BLENDER, 2021).

3.3.6 Infracad

O Infracad, da Autodesk, é um *software* comercial que permite modelar, visualizar, analisar e simular a infraestrutura urbana. Nele, é possível criar objetos tais como vias, túneis e pontes com menor grau de detalhamento, no entanto, com a exportação para o AutoCAD, os elementos de interesse podem ser enriquecidos com detalhes e depois importados. O Infracad também pode ser integrado com o Revit (ferramenta BIM) e dados SIG (AUTODESK, 2021).

3.3.7 AutoCAD

O AutoCAD é um *software* comercial da Autodesk. Por meio dele, é possível criar representações em 2D ou 3D. Sua aplicação permite o desenvolvimento de mapas, projetos de engenharia, arquitetura, interiores, entre outros. No contexto do CIM, pode ser usado para modelagem dos objetos de interesse, os quais depois podem ser convertidos para CityGML por meio do FME (Feature Manipulation Engine). Uma outra opção, seria utilizar o AutoCAD Map 3D para realizar as etapas de exportação de objetos de DWG para CityGML⁴⁸.

⁴⁸ Uma descrição do procedimento de exportação de objetos no AutoCAD Map 3D para o padrão CityGML pode ser encontrada em: AUTODESK. AutoCAD Map 3D: suporte e aprendizado. Para exportar para CityGML. 2018. Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/autocad-map-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/PTB/MAP3D-Use/files/GUID-23A90A09-90EA-41C5-B401-5BB5EE068B09-htm.html>. Acesso em: 12 jan. 2022.

3.3.8 COLMAP

O COLMAP é um *software* de código aberto que pode ser usado na construção de nuvens de pontos esparsas e densas a partir de um conjunto de imagens que podem estar ordenadas ou não. A ferramenta é compatível com os sistemas operacionais Windows, Linux e Mac. Durante o uso, quando informações específicas da fotografia (posição, ângulos e a distância focal da câmera, distorção da lente etc.) são conhecidas, a construção de uma nuvem de pontos esparsa não é uma etapa necessária para obtenção de um modelo denso. Em razão da natureza modular e aberta do COLMAP, os usuários podem visualizar os dados da reconstrução e os dados intermediários dos modelos, bem como, alterar parâmetros do algoritmo de reconstrução (COLMAP, 2021).

3.3.9 OpenDroneMap

O OpenDroneMap é mais uma ferramenta de código aberto que pode ser aplicada na modelagem geométrica a partir de imagens obtidas por *drones*. Este *software* tem a vantagem de ser adequado à realização de modelagem urbana em grandes áreas de forma colaborativa. O OpenDroneMap também fornece uma grande quantidade de parâmetros pré-definidos para geração do modelo digital do terreno, modelo digital de superfície, nuvem de pontos, entre outros (OPENDRONEMAP, 2021).

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS GEOMÉTRICOS

Neste capítulo, foram apresentadas diferentes alternativas de aquisição de dados para construção de modelos numéricos 3D de cidades. Entre elas, DSM e o uso de imagens de satélite se destacam pelo baixo custo.

Algumas plataformas de modelagem geométrica, como por exemplo Blender e SketchUp, foram investigadas. O SketchUp foi escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa em razão da etapa de conversão do modelo para CityGML e, também, em razão da Universidade Federal da Bahia ter licença para uso.

Para concluir este capítulo, é necessário esclarecer que há muitos desafios a serem superados no campo da modelagem da informação da cidade. Um desses desafios diz respeito à aquisição de dados. Quando a aquisição de informação por meio de imagens é utilizada, é difícil obter dados completos e prontos para a modelagem, principalmente para grandes cidades, que possuem ruas movimentadas, e geram grande quantidade de dados desnecessários, como pedestres e veículos.

Além disso, edifícios espelhados afetam a coleta de dados devido o reflexo e a refração que impactam principalmente os sensores de varredura, o que reduz significativamente a densidade de dados obtida. Também é um desafio conseguir equilibrar a geração de um modelo realístico e detalhado com a necessidade de obtenção de modelos de grandes áreas urbanas (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

4 MODELOS NUMÉRICOS 3D DE CIDADES

Este capítulo trata da preparação de modelos urbanos em formato CityGML e no seu armazenamento no 3DCityDB. O capítulo começa com uma explicação sobre modelos numéricos 3D de cidades, e em seus desdobramentos apresenta informações sobre interoperabilidade, funcionalidades do 3DCityDB, visualização na *web* e aplicações dos modelos.

4.1 NOÇÕES INTRODUTÓRIAS

Os modelos numéricos 3D de cidades devem ter a representação dos diferentes objetos que compõem a complexidade urbana. No entanto, em razão deste termo ser usado na literatura para se referir a representações que englobam a geometria e até mesmo a semântica, é difícil definir o que constitui um modelo numérico 3D de cidade. Devido essa dificuldade, Julin *et al.* (2018) afirmam que os modelos numéricos 3D de cidades podem ser compreendidos como a combinação de dados geométricos tridimensionais de objetos, tais como edificações, árvores, estradas, terrenos etc. e seus atributos (dados não geométricos).

Para Stadler e Kolbe (2007), os modelos numéricos 3D de cidades são representações digitais da terra (superfície e subsuperfície) e dos objetos urbanos sobre ela. Na pesquisa de Morton *et al.* (2012) foi identificado que há mais de mil modelos numéricos 3D de cidades no mundo. Entre vários fatores, inclusive devido ao aumento da disponibilidade de dados nestas primeiras décadas do século 21, é possível que essa quantidade tenha crescido ainda mais (BILJECKI *et al.*, 2015).

Há várias aplicações para os modelos numéricos 3D de cidades. Na pesquisa de Biljecki *et al.* (2015) são reunidas mais de cem aplicações distintas. Eles podem, por exemplo, ser aplicados na realização de diferentes tarefas relacionadas com a simulação do ambiente urbano, tais como o mapeamento de ruídos, gestão e prevenção de desastres, planejamento urbano, simuladores de treinamento, entre outros. Essas e outras aplicações serão discutidas de forma mais ampla na seção 4.5, no final deste capítulo.

4.2 INTEROPERABILIDADE

A maioria dos modelos urbanos encontrados na literatura são exclusivamente geométricos. Isso implica no fato destes modelos não possuírem semântica. Modelos geométricos têm sua aplicação praticamente limitada à visualização e, assim sendo, não podem ser utilizados em aplicações mais nobres como na realização de consultas temáticas e mineração de dados⁴⁹ espaciais.

Por muito tempo, devido à necessidade de padrões para dados 3D, vários formatos de arquivos foram desenvolvidos e, muitos deles são incompatíveis entre si. Como consequência disso, os modelos acabam tendo pouco ou nenhum potencial de reutilização em razão das dificuldades de troca e compartilhamento que surgem entre diferentes campos de aplicação que demandam os produtos da modelagem urbana 3D em formatos específicos (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Tendo em vista a problemática apresentada, a definição de um formato padrão para troca e compartilhamento de dados urbanos tornou-se com o tempo um problema fundamental a ser resolvido. Isso porque a solução deste desafio é capaz de propiciar maior interoperabilidade para diferentes aplicações, implicando também na redução de custos de produção e manutenção de tais modelos.

Há diferentes formatos de arquivos que podem ser usados na produção e troca de modelos. Alguns exemplos são: X3D, KML, COLLADA, Esri Shapefile, CityGML, IndoorGML e *Industry Foundation Classes* (IFC). No Quadro 1 esses formatos são comparados em relação a geometria, topologia, textura, semântica, níveis de detalhe (*Level of Detail* – LOD), coordenadas geográficas, escalabilidade⁵⁰ e aplicação (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Formatos tais como X3D, KML, COLLADA e Esri Shapefile não dão suporte ao uso de informações semânticas. Assim sendo, possuem aplicação restrita a tarefas mais básicas, como por exemplo, a visualização 3D.

⁴⁹ Termo utilizado para se referir ao processo de exploração de uma base de dados utilizando algoritmos adequados para extrair conhecimento a partir de dados pré-processados (CASTRO; FERRARI, 2016).

⁵⁰ A escalabilidade está relacionada com a capacidade do padrão conseguir acomodar diferentes demandas operacionais (altas ou baixas) pela flexibilização do uso de seus recursos (CITYGML, 2012). Assim sendo, a escalabilidade dos padrões diz respeito à sua capacidade de suportar a realização de tarefas (tais como análise e visualização dos modelos) requisitadas para um mesmo objeto em diferentes níveis de detalhes.

Quadro 1 - Avaliação do suporte oferecido por diferentes formatos para armazenar modelos numéricos 3D de cidades

Formato de arquivo	Geometria	Topologia	Textura	Semântica	Coordenadas geográficas	LOD	Escalabilidade	Aplicação
X3D	Médio*	Básico	Completo	Não suportado	Médio	Médio	Médio	Básico
KML	Médio	Não suportado	Completo	Não suportado	Básico	Básico	Médio	Básico
COLLADA	Básico	Básico	Básico	Não suportado	Não suportado	Médio	Completo	Básico
Shapefile	Básico	Não suportado	Não suportado	Não suportado	Médio	Não suportado	Não suportado	Básico
CityGML	Médio	Médio	Médio	Completo	Completo	Completo	Completo	Completo
IndoorGML	Médio	Médio	Não suportado	Completo	Completo	Básico	Básico	Completo
IFC	Completo	Médio	Básico	Completo	Básico	Básico	Básico	Completo

Fonte: adaptado de Shan, Li e Zhang (2019).

*A classificação: básico, médio, completo e não suportado foi apresentada por Shan, Li e Zhang (2019) apenas para comparar os formatos de modo gradativo.

Quanto aos formatos CityGML, IndoorGML e IFC, o CityGML se destaca principalmente quanto a um suporte melhor em relação a escalabilidade, LOD e textura. Embora modelos em formato IFC suportem a semântica, os mesmos são geralmente usados em escalas locais para uma edificação. Eles possuem suporte limitado para coordenadas geográficas e não são adequados para a escala urbana.

Com base no Quadro 1, pode-se afirmar que o CityGML é o formato com melhor desempenho, sendo então uma alternativa muito adequada, pelo menos no contexto atual, para armazenamento, troca, compartilhamento e aplicação de modelos semânticos de cidades.

Como visto até aqui, os modelos podem ser representados em diferentes formatos, os quais podem ser divididos basicamente em dois grupos; um para a escala da edificação e, o outro, para a escala urbana. Nas próximas seções são explicados dois padrões; o IFC, formato padrão para edificações e, o CityGML, concebido para a escala das cidades.

4.2.1 IFC

No BIM, o desenvolvimento dos projetos geralmente engloba diferentes participantes e fases. A necessidade de compartilhamento de informações é constante, envolvendo todas as fases das atividades de projeção, construção e utilização das edificações. Nesse contexto, é comum serem encontrados desafios ligados ao compartilhamento das informações dos projetos que empregam o BIM. Um desafio muito discutido na literatura diz respeito à interoperabilidade⁵¹. Quando existe interoperabilidade os dados não são perdidos, viabilizando a execução de projetos que envolva o uso de diferentes ferramentas (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; SÁ, 2014).

Na prática, a adoção de um padrão para compartilhamento de dados dos projetos, se faz necessário. Atualmente, para o BIM, o *Industry Foundation Classes* (IFC) é o principal padrão aberto e neutro utilizado (NASCIMENTO, 2017).

⁵¹ A interoperabilidade refere-se à capacidade de sistemas ou produtos de natureza digital se conectarem e compartilharem informações entre si, sem limitação, seja em termos de implementação ou acesso (EASTMAN *et al.*, 2008).

A demanda por troca de informações entre ferramentas é antiga nas atividades ligadas à construção civil. Enquanto há alguns formatos de arquivos mais interoperáveis, há outros bem limitados em relação a sua capacidade de troca, sendo então adequados apenas em trocas internas (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; MANZIONE, 2013).

Eastman *et al.* (2008) citam quatro alternativas para compartilhar dados em BIM:

- Ligação direta;
- Formato de arquivo de troca proprietário;
- Formatos de arquivos de trocas de domínio público; e
- Formatos de troca baseados em XML.

Para esclarecer cada uma das alternativas, são dadas algumas informações sobre elas. Na ligação direta é utilizada uma interface compatível com as duas ferramentas que deverão compartilhar dados. O compartilhamento utilizando formato proprietário diz respeito ao uso de formatos criados por desenvolvedores comerciais de tecnologia. O 3DS e o DXF são dois exemplos de formatos de troca de arquivos proprietários que são capazes de estabelecer interface entre ferramentas distintas (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

Sobre os formatos de domínio público, tais como *CIMSteel Integration Standards*⁵² (CIS/2) e IFC, é preciso compreender que esses são padrões abertos. Além da geometria, os padrões abertos podem apresentar os relacionamentos, os materiais e as propriedades dos objetos (NASCIMENTO, 2017).

Para a última alternativa de compartilhamento de dados listada, formatos de troca baseados em *eXtensible Markup Language* (XML), destaca-se que esses formatos, possibilitam a utilização de esquemas criados para atender às demandas do usuário. O formato XML é uma extensão da linguagem empregada na *web*, o HTML. Sobre os formatos de domínio público, acrescenta-se que, enquanto o CIS/2 é usado no projeto de estruturas em aço, o IFC é empregado na projeção, construção e gestão de edificações. Além disso, o IFC é fundamental no estabelecimento dos processos de troca de informações entre as ferramentas da indústria da Arquitetura,

⁵² CIS/2 é um formato de arquivo para troca de dados de projetos de estruturas em aço.

Engenharia e Construção e da Gestão de Facilidades (*Facility Management*) (PINHO, 2013).

4.2.1.1 Um pouco da história

Em 1994, a *Industry Alliance for Interoperability* (IAI) iniciou a criação do padrão *Industry Foundation Classes* (IFC). O IFC começou a partir de um consórcio entre empresas interessadas no compartilhamento de dados de edificações em formato aberto e não proprietário. Assim sendo, o formato de dados foi criado para permitir o compartilhamento e a troca de dados das edificações para os diferentes programas que viessem a ser utilizados pelos interessados (BuildingSmart, 2020). O consórcio foi transformado na *International Alliance for Interoperability*, em 1997, recebendo em seguida a denominação “buildingSMART”. Visando contribuir para a melhoria da sustentabilidade, da qualidade e dos custos dos ambientes construídos, a buildingSMART, uma organização sem fins lucrativos, propõe o compartilhamento de dados em formato aberto e neutro (AMORIM, 2015).

A buildingSMART engloba profissionais de diferentes áreas, como por exemplo, Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). Assim sendo, arquitetos, desenvolvedores de *software*, engenheiros, agentes governamentais, universidades etc., contribuem para que as operações sejam mais integradas e eficazes (BuildingSmart, 2020).

Com o intuito de tornar o IFC um padrão mundial aberto para o BIM, o IFC 1.0 evoluiu até o atual padrão, o IFC4, um padrão internacional normatizado ISO 16739:2013(E). Após aproximadamente 6 anos de desenvolvimento, o IFC4 foi lançado em 2013 (AMORIM, 2015). Em sua próxima atualização, o IFC englobará a possibilidade de modelar canais, estradas, viadutos, entre outros (BuildingSmart, 2020). Ou seja, por meio do IFC5 será possível modelar alguns componentes da infraestrutura urbana. Acredita-se que o IFC5 ainda não contemplará todos os objetos do escopo da cidade, no entanto, este novo padrão surge como uma possibilidade de tornar os modelos urbanos uma realidade. Tendo em vista o intervalo de tempo necessário para desenvolvimento do IFC4, acredita-se que o lançamento do IFC5 não ocorrerá logo. Após seu lançamento, será necessário aguardar as *softhouses* implementarem o IFC5 em formato adequado de arquivo para *software* voltados para a modelagem das cidades (AMORIM, 2015; BuildingSmart, 2020).

4.2.1.2 Arquitetura do IFC

IFC é uma sigla empregada para identificar um conjunto de dados e um esquema básico, sendo o mesmo útil no compartilhamento de informações entre ferramentas criadas para atender à indústria de arquitetura, engenharia e construção, bem como, a gestão de facilidades (*Facility Management*). O IFC é um padrão aberto e internacional (HAAGENRUD *et al.* 2007), oriundo da concordância da indústria da construção.

Eastman (1999) afirma que este padrão é o mais elaborado e maior modelo de dados criado para o BIM. Os modelos em IFC possuem entidades⁵³ de natureza genérica ou específica como, por exemplo, geometria, topologia, planos de trabalhos, mobiliário, equipamentos, elementos dos edifícios, entre outros. Tais entidades são empregadas para descrever objetos, atores e conceitos.

Cada entidade específica possui as categorias objeto, relações e propriedades. Além disso, cada entidade é fundamentada em um IFC *root*⁵⁴. Cada objeto tem sua geometria, e as suas propriedades proporcionam a definição de materiais, propriedades contextuais⁵⁵ e desempenho (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; PINHO, 2013).

Por sua vez, as relações podem existir entre objetos ou entre propriedades e objetos. No IFC, as entidades *PropertySets* e *ProxyObjects* foram criadas com a

⁵³Para esclarecer a ideia de entidade, Kemlani (2004 *apud* ANDRADE; RUSCHEL, 2009) exemplifica a estrutura de duas entidades, espaço e parede, as quais são apresentadas a seguir. No caso de uma parede, IFC *Wall*, entidade parede, a mesma será um subtipo IFC *BuildingElement*, Entidade elemento de construção, que é um subtipo IFC *Element*, Entidade Elemento, que é um subtipo IFC *Product*, Entidade Produto, que é um subtipo IFC *Object*, Entidade Objeto, que por sua vez é um subtipo IFC *Root*, Entidade Raiz. É importante esclarecer que a entidade parede herdará os atributos de suas entidades superiores. Enquanto os supertipos são compreendidos como entidades de natureza abstrata, a parede não é abstrata. Assim sendo, haverá a criação de um objeto do tipo parede que ficará localizado no modelo da edificação. A localização, as aberturas, a forma, o tipo, entre outras, são os atributos da parede, os quais são definidos pelo supertipo IFC *Element* (Entidade Elemento). Para espaço, IFC *Space* (entidade espaço), tem-se um subtipo de IFC *SpatialStructureElement* (entidade elemento de estrutura espacial), que por sua vez é um subtipo de IFC *Product* (Entidade Produto), que dessa entidade em diante seguirá a mesma lógica hierárquica que foi detalhada para a parede. Vários relacionamentos podem ocorrer entre entidades. Um exemplo disso pode ser um confinamento estabelecido entre espaço e parede. Tal relacionamento envolve um IFC *Element*, a parede, e IFC *SpatialStructureElement*, nesse caso, o espaço. Na prática, qualquer elemento (porta, viga, parede, pilar e outros) pode se relacionar com estruturas de natureza espacial (lugar, pavimento, espaço e outros).

⁵⁴ IFC *root* é o supertipo comum de todas as entidades IFC, além daquelas definidas em um esquema de recursos IFC. Todas as entidades que são subtipos de IFC *root* podem ser usadas independentemente, enquanto entidades de esquema de recursos que não são subtipos de IFC *root* não devem ser entidades independentes (EASTMAN *et al.*, 2011).

⁵⁵ Dados climáticos e dados geológicos servem para exemplificar propriedades contextuais.

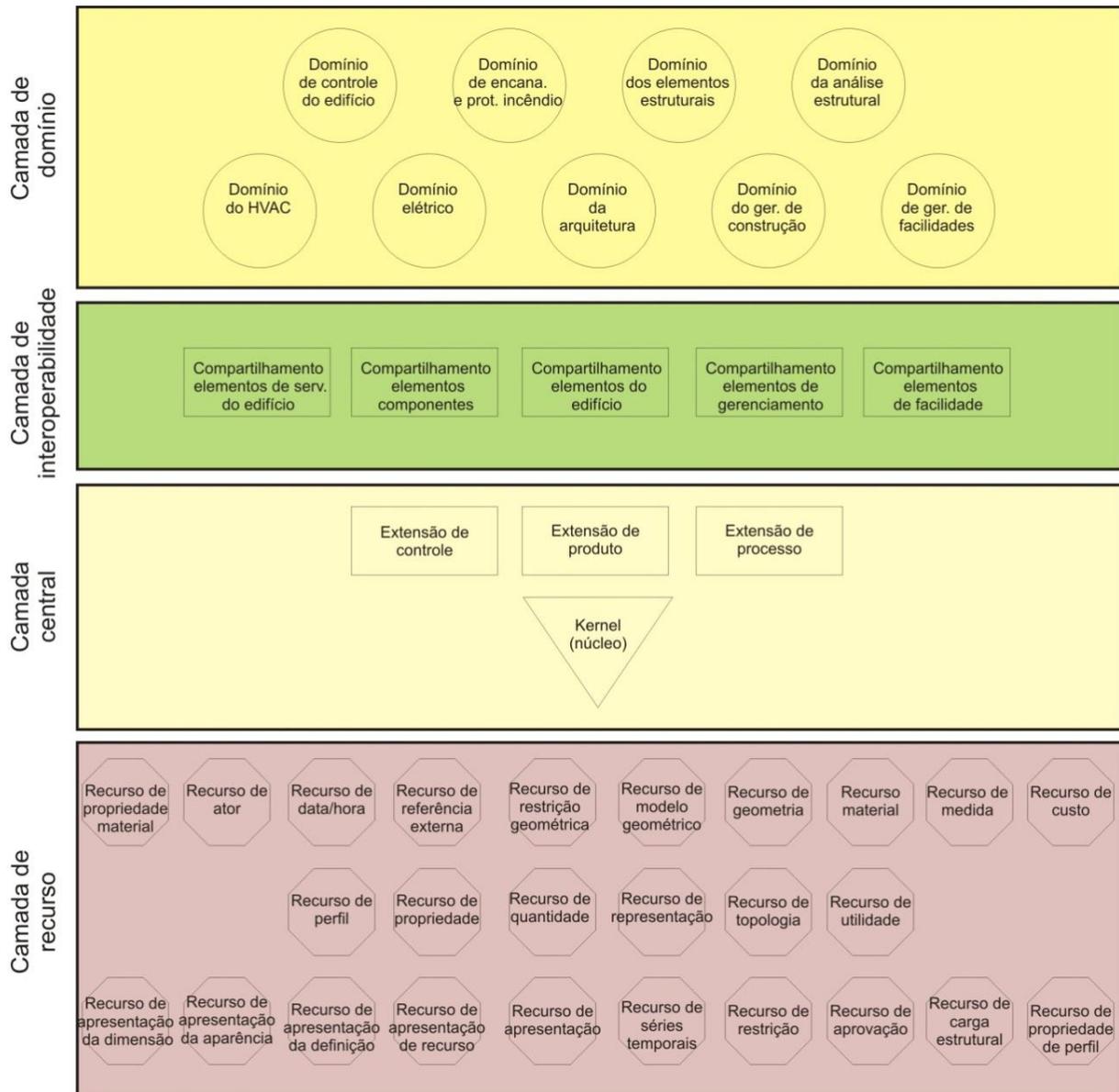
finalidade de ampliar a extensibilidade e a flexibilidade. Enquanto ProxyObjects são úteis na criação de entidades novas, as quais podem ser indicadas como representações geométricas no espaço, os PropertySets acrescentam propriedades variáveis às entidades como, por exemplo, códigos para identificação e classificação. Por mais que uma entidade tenha alguma propriedade inequívoca, a mesma pode exigir outras propriedades para atender a algumas necessidades. ProxyObjects podem ter semântica, atributos, propriedades e serem empregados para criar entidades específicas (PINHO, 2013).

A estrutura e organização do padrão IFC está pautada em alguns requisitos fundamentais que são resumidamente listados a seguir:

- Prover uma estrutura modular para um modelo de edifício;
- Prover uma estrutura de compartilhamento de informações entre diferentes disciplinas da AEC/FM;
- Facilitar a manutenção e desenvolvimento do modelo do edifício;
- Habilitar modeladores de informação a reutilizar componentes de modelos;
- Habilitar produtores de *software* para reutilização de componentes de *software*, e,
- Permitir melhorias continuadas nas versões subsequentes de modelos de edifícios. (HAAGENRUD *et al.*, 2007, p. 22, tradução nossa).

O IFC possui arquitetura com estrutura em módulos, composta por camada de interoperabilidade, camada de recursos, camada central e camada de domínio (NASCIMENTO, 2017). Essas camadas são conceituais e podem ser compreendidas como os quatro níveis do IFC, sendo cada nível composto por categorias, as quais podem ser visualizadas na Figura 2. As entidades são definidas em termos de propriedades dentro das categorias (PINHO, 2013). Para melhor compreensão da Figura 3 será explicado a seguir cada uma das camadas.

Figura 2 - Arquitetura geral do formato IFC



Fonte: Andrade e Ruschel (2009, p. 85).

4.2.1.2.1 Camada de recursos

Possui categorias para representar as propriedades dos objetos. Nela, estão incluídas as categorias para materiais, data/hora, quantidade, utilidade, medida, geometria, custo, entre outros. A maioria dos recursos desta camada são adaptados com base no ISO-STEP (ISO-10303: *Standard for the Exchange of Product Model Data*) (SÁ, 2014).

Ao todo, há 26 módulos nesta camada, sendo que, para cada categoria existe um esquema próprio. Merecem destaque os módulos dedicados a recursos de

geometria (*Geometry Resource*) e propriedade (*Property Resource*). Enquanto o primeiro leva em consideração as bases geométricas ligadas a localização, ponto, curva, superfície, direção e vetor; o segundo considera materiais, tempo, classificação do uso, custo, entre outros, definindo classes de objetos e tipos não técnicos (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

4.2.1.2.2 Camada central

Esta camada consegue acessar a camada inferior. A mesma é composta por entidades capazes de representar especificações industriais e não industriais, bem como, entidades que representam conceitos abstratos e gerais úteis para definição das entidades da camada de interoperabilidade (SÁ, 2014).

Os módulos mais importantes desta camada são *Kernel* e *Product Extension*. O *Kernel*, ou núcleo, é responsável pela definição da parte mais abstrata do IFC, sendo empregado nas entidades de nível mais elevado dos modelos. É responsável por direcionar os níveis abstratos de auxílio de modelagem, as diferentes classes relacionais e todos os tipos de objetos dos usuários. Além disso, é útil na definição de conceitos centrais, tais como produto, sequência temporal de processos, localização de produtos, ator, entre outros (PINHO, 2013).

Por sua vez, a *Product Extension*, ou extensão de produto, é fundamental na definição dos conceitos mais básicos de objetos que podem ser usados no IFC. Isso inclui espaços, elementos e agregação hierárquica de bases do IFC como, por exemplo, sítio, edifício, pavimento, espaço e elementos de pavimento (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; SÁ, 2014).

4.2.1.2.3 Camadas de interoperabilidade

É uma camada útil para fornecer a definição dos objetos trocados entre ferramentas diferentes empregadas nas construções de edifícios e gestão de facilidades. Dois módulos merecem destaque nesta camada. O primeiro módulo, o *Shared Building Elements*, ou compartilhamento de elementos dos edifícios, define completamente vários objetos que possuem propriedades das partes dos edifícios e as classifica com base em seu tipo, como porta, janela, parede, viga, entre outras. Já o segundo módulo, o *Shared Facilities*, ou compartilhamento de facilidades de

elementos, define entidades de tipos de imóveis, ocupação, posse, entre outros (PINHO, 2013).

4.2.1.2.4 Camada de domínio

É uma camada que detém a definição dos objetos fundamentais para domínios específicos, tais como engenharia, arquitetura, gestão de facilidades, ar condicionado e ventilação para aquecimento (*Heating Ventilation e Air-Conditioning*). Em arquitetura, são obtidas informações sobre espaços individuais e sua vizinhança. No domínio da estrutura, são obtidas informações tais como o número de pavimentos da edificação. Em *Heating Ventilation e Air-Conditioning*, é possível obter informações de resfriadores, caldeiras, entre outros (MANZIONE, 2013; SÁ, 2014).

4.2.1.3 Os desafios do IFC

O principal desafio de utilização do IFC, inclusive na sua versão mais recente, o IFC4, diz respeito à perda de informação que pode ocorrer nas atividades de importação ou exportação dos dados neste formato. Este desafio está presente mesmo quando se utilizam ferramentas BIM que foram adaptadas para uso do formato IFC. Isso ocorre porque cada ferramenta possui a sua própria estrutura organizadora dos dados, que geralmente são diferentes umas das outras. Como consequência, podem ocorrer problemas na tradução dos dados e a geração de arquivos ‘pesados’. Os problemas de tradução da informação acontecem por falta de repertório de muitas ferramentas em uso. Na importação, as entidades que fazem parte do repertório da ferramenta serão reconhecidas. Ao contrário, as que não fizerem parte do repertório, não serão reconhecidas e, portanto, serão perdidas. Isso também é reflexo do fato do padrão IFC não abarcar todos os processos e sistemas ligados à indústria de arquitetura, engenharia e construção, que precisariam ser contemplados em sua estrutura de dados para ser possível o reconhecimento de todos os repertórios (ANDRADE; RUSCHEL, 2009; PINHO, 2013; NASCIMENTO, 2017).

4.2.2 CityGML

Como explicado, o padrão *Industry Foundation Classes* (IFC) é utilizado para as edificações. Para as cidades, é comum encontrar formatos tais como COLLADA,

X3D, VRML, 3DS MAX, entre outros. No entanto, os formatos citados não incluem a semântica dos modelos. Ou seja, tratam-se de opções que permitem definir modelos focados exclusivamente na geometria e na aparência (OHORI *et al.*, 2018).

Gröger e Plümer (2012) afirmam que para uma ampla gama de aplicações, além dos aspectos geométricos e gráficos, a semântica dos objetos da cidade é muito importante. Com as informações semânticas é possível fazer análises espaciais, simulações, consultas, mineração de dados, entre outras possibilidades.

O CityGML aparece nesse contexto com o intuito de representar cidades em aspectos visuais, geométricos, topológicos e semânticos. Assim sendo, trata-se de um modelo de informações geométricas e semânticas para representar as cidades com seus diferentes objetos (GRÖGER *et al.*, 2012).

O surgimento do padrão CityGML ampliou as oportunidades de compartilhamento de informações geográficas 3D. Seu uso possibilita suprir as limitações de outros formatos de armazenamento e troca de dados de cidades. Além disso, permite levar em consideração geometria, aparência, topologia, semântica e outros atributos, de modo que sua aplicação favorece a interoperabilidade e o compartilhamento de dados (SHAN; LI; ZHANG, 2019)

O CityGML surgiu na Alemanha pela iniciativa dos membros do Grupo de Interesse Especial 3D (*Special Interest Group 3D – SIG3D*) pertencentes ao *Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia* (GDI NRW). Desde 2008, o CityGML é desenvolvido e mantido pelo *Open Geospatial Consortium* (OGC) como um padrão internacional aberto de modelos tridimensionais urbanos e de paisagens (OHORI *et al.*, 2018).

Em 2008, o CityGML 1.0 foi oficialmente reconhecido pelo Comitê Internacional de Padrões de Informações Geográficas da Organização Internacional de Normalização (ISO TC211) e pelo Comitê Técnico do OGC (Open GIS Consortium) como padrão aberto internacional para compartilhamento e armazenamento de modelos numéricos 3D de cidades (GRÖGER; PLÜMER, 2012). A versão 2.0 do CityGML foi lançada em 2012 e, atualmente, está em uso a versão 3.0, lançada em 2021.

O CityGML possui quatro características importantes, sendo elas: diferentes níveis de detalhe, integração geométrica/semântica, módulos temáticos e

escalabilidade. Os diferentes níveis de detalhe (*Level of Detail* – LOD) favorecem que o modelo possa atender aos requisitos de diferentes campos de aplicação (SHAN; LI; ZHANG, 2019). Esse tópico será abordado com maior riqueza de detalhes na seção 4.2.2.1.

A integração geométrica/semântica, por sua vez, faz com que o modelo seja mais completo uma vez que esses dois tipos de informações cooperam entre si e fornecem uma nova maneira de armazenar e processar dados urbanos (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Quanto aos módulos, o CityGML possui diferentes módulos temáticos para definir e classificar os objetos das cidades (Quadro 2). É importante destacar que os objetos geralmente encontrados no cenário urbano são vias, edificações, pontes, rios, mobiliário urbano, vegetação, entre outros.

Alguns autores como, por exemplo, Dsilva (2009), e Gröger e Plümer (2012) afirmam que o módulo *Building* é o mais importante do CityGML. Esse módulo é utilizado para representar as edificações e seus elementos. Cada edifício pode receber atributos, tais como, função, ano, altura, número, endereço, tipo de telhado, entre outros.

Quadro 2 - Módulos do CityGML 2.0

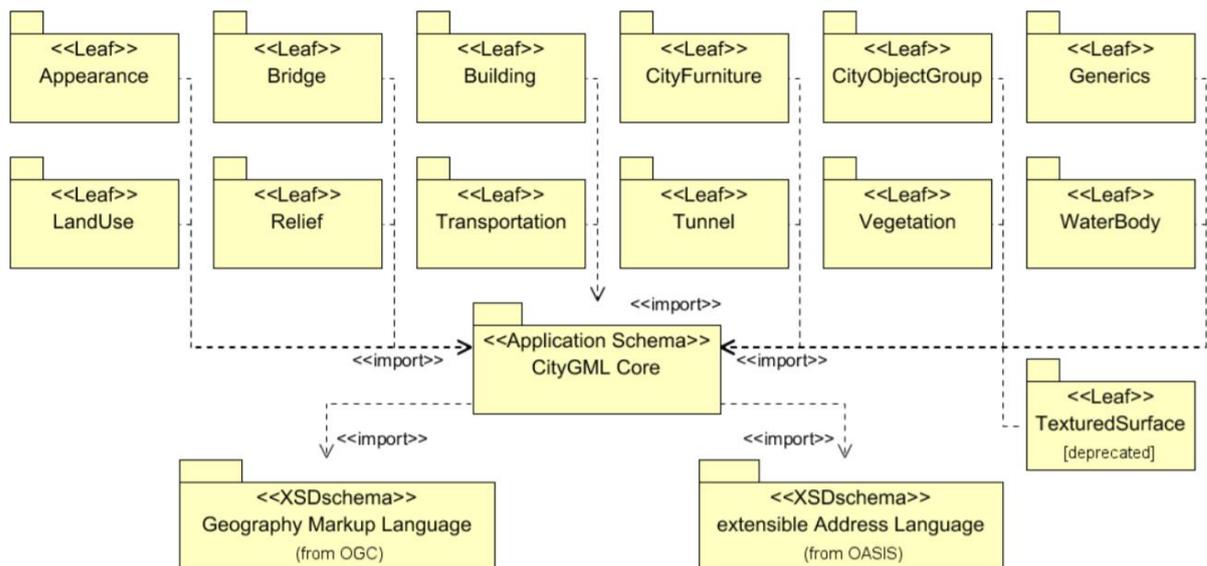
	Módulo	Prefixo
<i>Appearance</i>	Aparência: texturas e materiais	<i>app</i>
<i>Bridge</i>	Pontes	<i>brdg</i>
<i>Building</i>	Exterior e interior de edifícios	<i>bldg</i>
<i>CityFurniture</i>	Mobiliário urbano como: semáforos, bancos etc.	<i>frn</i>
<i>CityObjectGroup</i>	Grupo de objetos da cidade	<i>grp</i>
<i>Generics</i>	Genéricos	<i>gen</i>
<i>LandUse</i>	Uso do solo	<i>luse</i>
<i>Relief</i>	Relevo	<i>dem</i>
<i>Transportation</i>	Transporte	<i>tran</i>
<i>Tunnel</i>	Túneis	<i>tun</i>
<i>Vegetation</i>	Vegetação	<i>veg</i>
<i>WaterBody</i>	Corpos d'água: rios, canais e lagos.	<i>wtr</i>

Fonte: CityGML (2020).

Os módulos do formato CityGML (Quadro 2) estão descritos dentro do seu módulo principal (*CityGML Core*), no entanto, são independentes entre si, conforme representado na Figura 3 (CITYGML, 2020). Os módulos possuem uma quantidade

arbitrária de classes. Por sua vez, as classes possuem atributos comuns que descrevem datas de criação, exclusão, referências externas, entre outras (GRÖGER *et al.*, 2012).

Figura 3 - Módulos do CityGML definidos no CityGML Core



Fonte: Gröger *et al.* (2012).

É importante destacar que cada módulo recebe um prefixo, conforme mostrado na última coluna do Quadro 2. O módulo de construção, por exemplo, recebe o prefixo “bldg”. Assim sendo, todos elementos deverão receber um prefixo, sendo que, aqueles que não possuírem um prefixo serão definidos no módulo *CityGML Core*.

Sobre a escalabilidade, o CityGML possui extensões de domínio que fazem dele um padrão que pode ser estendido para diferentes áreas de aplicação como, por exemplo, estimativa energética, análises de ruídos, projeção e análise hidráulica, entre outros (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

As características mencionadas anteriormente fazem do CityGML uma alternativa efetiva para atender às necessidades cada vez mais presentes de análise espacial e consulta de dados. O CityGML já é aplicado atualmente na estimativa de iluminação e demanda energética de edifícios, análise de sombras, cadastro tridimensional, navegação, planejamento urbano, estimativa de propagação de ruídos, e gerenciamento urbano. Como prova disso, uma série de ferramentas CityGML foram produzidas, por exemplo, Solar ADE, Energy ADE, Noise ADE, GEOBIM ADE e Utility Network ADE (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

A Alemanha e a Holanda são países europeus que estão na vanguarda das pesquisas e aplicações do CityGML. Entre os pesquisadores desta temática, merece destaque o professor Thomas Kolbe, que tem grande contribuição no projeto, promoção, aplicação e internacionalização do padrão CityGML (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Ao armazenar dados no formato CityGML também é possível manter as relações existentes entre objetos, tal como entre partes distintas de uma construção e, adicionalmente, para melhorar a aparência, os objetos podem ser coloridos e/ou texturizados (OHORI *et al.*, 2018).

4.2.2.1 Níveis de detalhe

Os modelos urbanos demandarão maior capacidade de armazenamento quanto mais detalhados forem. Além disso, quando ricos em detalhes, demandam maior capacidade computacional para renderização. Para demandar menos dos computadores e, principalmente, tornar mais fácil e eficiente sua análise, os mesmos podem ser obtidos em diferentes níveis de detalhe (*Level of detail* - LOD) (KOLBE; BURGER; CANTZLER, 2015). Os diferentes LOD também são necessários em razão das diferentes tecnologias de aquisição de dados e aplicações (KOLBE, 2009).

Os atributos e a geometria contidos nos módulos podem ser classificados em cinco diferentes níveis de detalhe. São eles: LOD0, LOD1, LOD2, LOD3 e LOD4 (Figura 4). Cada LOD permite que os objetos sejam representados para finalidades diferentes, sendo a obtenção de cada um deles dependente da técnica de aquisição de dados. À medida que o LOD aumenta é elevada a complexidade geométrica e semântica do modelo. Quanto aos LOD relacionados às edificações, o LOD 0 é o mais simples. Sua representação consiste em um *footprint* (delimitação do contorno externo da edificação) em seu respectivo nível (elevação). Nesse caso, não há representação volumétrica (GRÖGER *et al.*, 2012).

Figura 4 - Os diferentes níveis de detalhes para edificações do CityGML 2.0



Fonte: Biljecki, Ledoux e Stoter (2016, p. 26).

Por sua vez, o LOD1 é resultado da extrusão do *footprint* a uma dada altura, produzindo um modelo de bloco. Tal modelo pode ser construído automaticamente utilizando nuvens de pontos ou bases de dados cadastrais. Suas aplicações são amplas, podendo variar de análise de sombras a fluidodinâmica computacional⁵⁶. Em razão de serem construídos facilmente e possuírem muitas aplicações são os modelos mais populares (GRÖGER; PLÜMER, 2012).

Diferente do LOD1, o LOD2 possui o formato geral do telhado das edificações. Sua construção pode ocorrer por meio do uso de fotogrametria aérea ou varredura a laser aerotransportada. Os modelos com este nível de detalhamento podem ser aplicados, por exemplo, em estimativas de potencial solar (GRÖGER *et al.*, 2012).

Em LOD3, além da volumetria das edificações com o formato do telhado, devem ser representadas as aberturas, beirais do telhado, detalhes da fachada, entre outros. Esse nível de detalhamento pode ser obtido a partir da conversão de modelos em BIM ou, até mesmo, por varredura a laser terrestre ou integração de fotogrametria terrestre e aérea (*drones*) (GRÖGER; PLÜMER, 2012).

Por fim, no LOD4 há a necessidade de representar a parte interna das edificações. A integração das características internas e externas das edificações fazem este LOD ser muito interessante para as simulações de inundações em análises mais realistas (GRÖGER *et al.*, 2012).

No Quadro 3 podem ser encontradas diferentes possibilidades oferecidas pelo CityGML para os diferentes níveis de detalhe. Entre elas, encontra-se escala, precisão, estrutura dos telhados e suas saliências, instalações, mobiliário urbano e

⁵⁶ A fluidodinâmica computacional ou, em inglês, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), é a implementação da Mecânica dos Fluidos em ambiente computacional que permite realizar previsões quantitativas de fenômenos que envolvem o movimento de fluidos (ANDERSON; WENDT, 1995).

vegetação. É importante destacar, conforme o Quadro 3, que quanto maior o nível de detalhe, maior a precisão requisitada e maior o realismo necessário para representação dos telhados, mobiliários e vegetações.

Quadro 3 - Requisitos dos diferentes níveis de detalhe do CityGML 2.0

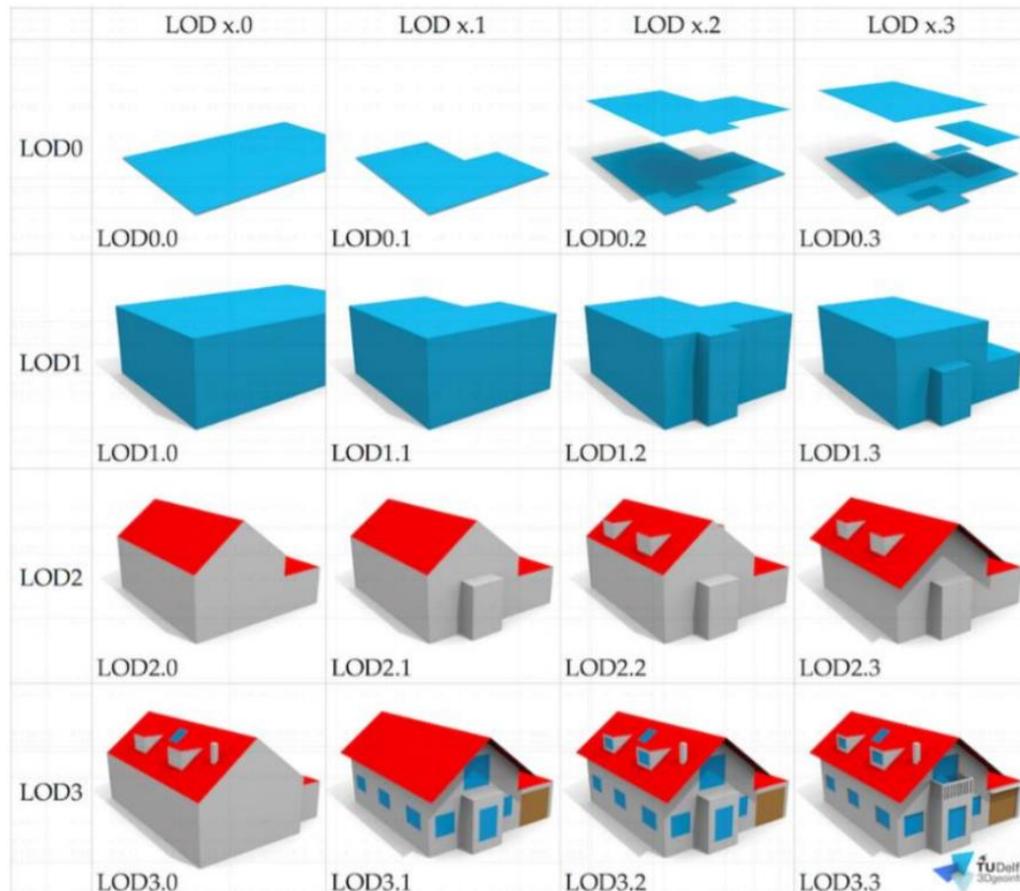
	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Escala do modelo	Regional, paisagem	Cidade, região	Cidade, distritos, projetos	Distritos, modelos arquitetônicos (exteriores), ponto de referência	Modelo arquitetônico (interior), ponto de referência
Precisão	Mais baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Precisão absoluta de pontos 3D para posição e altura	Menor que do LOD1	5 m	2 m	0,5 m	0,2 m
Generalização	Generalização máxima	Blocos de objetos como recurso generalizado	Objeto como feições generalizada	Objeto como feições reais	Elementos construtivos e aberturas são observados
Instalações das edificações	Não	Não	Sim	Características externas representativas	Forma do objeto real
Estrutura do telhado	Sim	Plana	Estruturas de cobertura diferenciadas	Forma do objeto real	Forma do objeto real
Representações de partes externas das edificações	Sim	Não	Sim, se conhecido	Sim	Sim
Mobiliário da cidade	Não	Objetos importantes	Protótipos, objetos generalizados	Forma do objeto real	Forma do objeto real
Objetos da vegetação	Não	Objetos importantes	Protótipos, superior a 6 m	Protótipos, superior a 2 m	Protótipos, a forma real do objeto
Áreas de vegetação	Não	> 50 x 50 m	> 5 x 5 m	< LOD2	< LOD2

Fonte: adaptado de Büyükdemircioğlu (2018, p. 11, tradução nossa).

Quanto aos níveis de detalhe, Biljecki, Ledoux e Stoter (2016) fizeram uma proposta de aprimoramento, conforme mostra a Figura 5. Na proposta, para melhor especificação dos detalhes, cada LOD é dividido em quatro possibilidades (LOD x.0,

LOD x.1, LOD x.2, LOD x.3). Para cada LOD, a complexidade do modelo cresce conforme a seguinte ordem: $LOD\ x.0 < LOD\ x.1 < LOD\ x.2 < LOD\ x.3$.

Figura 5 - Proposta de Biljecki, Ledoux e Stoter (2016) para aprimorar a especificação dos LOD



Fonte: Biljecki, Ledoux e Stoter (2016, p. 28).

No CityGML, em termos de LOD, além da correta representação geométrica e da consistência semântica, a qualidade (resolução) da textura também é um aspecto a ser considerado (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

A geração automática de modelos urbanos é um tópico importante na modelagem da informação da cidade. Embora haja algoritmos que permitem a criação de modelos com diferentes níveis de complexidade, os mesmos ainda não podem evitar a ocorrência de erros geométricos. Em razão dos edifícios serem os objetos mais importantes e utilizados na modelagem urbana, há algumas pesquisas relacionadas com o desenvolvimento de algoritmos específicos para a simplificação de edifícios representados em 3D (GARLAND; HECKBERT, 1997; COHEN-STEINER;

ALLIEZ; DESBRUN, 2004). Fan, Meng e Jahnke (2009) propuseram um conjunto de algoritmos para simplificação geométrica e semântica de modelos em LOD4 para o LOD3, e modelos em LOD2 para o LOD1 automaticamente.

É importante ressaltar que todos os LOD podem ser empregados em análises espaciais, no entanto, quanto maior o nível de detalhamento, maior tenderá a ser a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos nas análises e simulações (GRÖGER; PLÜMER, 2012).

Apesar disso, os LOD mais detalhados implicam em processos de aquisição de dados mais trabalhosos, uma vez que demandam um conjunto de dados mais completo (GRÖGER *et al.*, 2012).

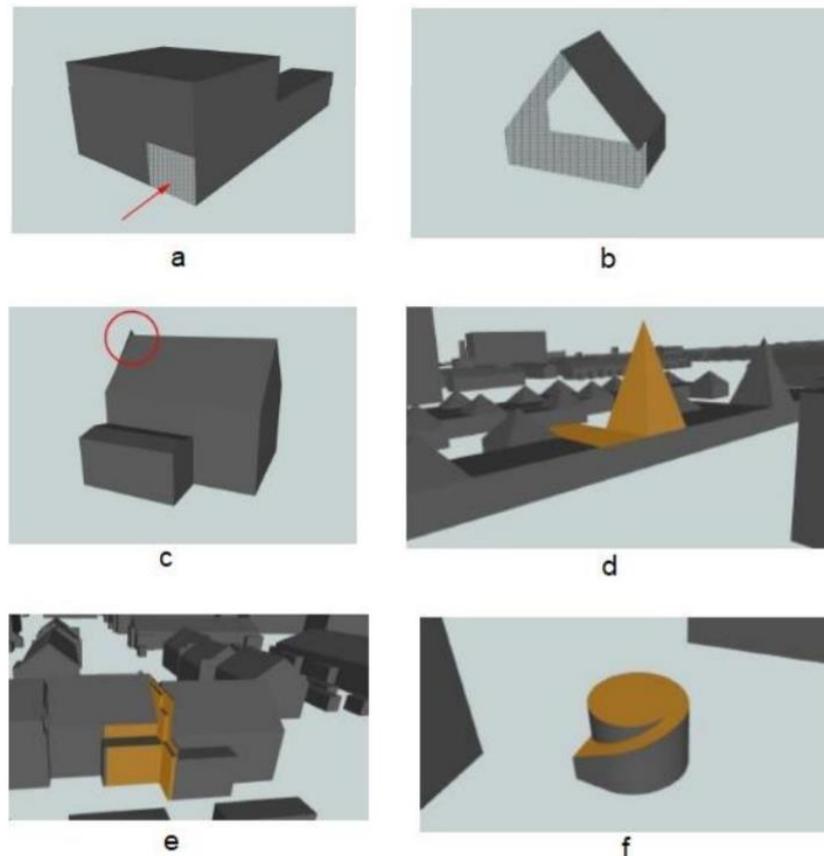
Quanto maior o nível de detalhamento, maior será o nível de informação semântica envolvida, mas não se deve esquecer que o CityGML é um padrão flexível, não implicando neste caso, na obrigatoriedade do uso da semântica. Ogori *et al.* (2018) afirmam que, mesmo sem a semântica, um modelo geométrico em LOD2 é válido.

A adição da semântica no modelo pode ocorrer de modo manual, semiautomático ou automático (PRIETO; IZKARA; DELGADO, 2012). Atualmente, a adição automática da semântica ainda é um desafio. Em razão disso, objetos tais como paredes, portas, janelas, entre outros, são declarados semanticamente de modo manual ou semiautomático. Independente da geometria, a relação entre pequenos objetos pode ser expressa em nível semântico, incluindo hierarquias, atributos e associações. Nesse contexto, o modelo pode ser entendido também como a representação das hierarquias geométricas e semânticas dos objetos que o compõe. Assim sendo, análises e consultas geométricas e temáticas podem ser realizadas para responder questões que dependam da navegação dentro ou entre hierarquias. Afinal, as hierarquias geométricas e semânticas devem se combinar e se adaptar mostrando-se consistentes para cada objeto (BÜYÜKDEMİRCİOĞLU, 2018). Para exemplificar, se uma edificação tem em uma de suas paredes duas janelas e uma porta (semântica), a geometria da parede precisa, por questões de consistência, conter a geometria das janelas e da porta simultaneamente (CityGML, 2012).

4.2.2.2 Validação dos conjuntos de dados

A demanda por modelos geométricos de cidades é crescente, no entanto, o uso desses modelos em simulações geralmente requer dados geométricos de qualidade. Isso implica na necessidade contínua de aprimoramento e validação dos conjuntos de dados urbanos. Para os conjuntos de dados, o CityGML é o padrão normalmente utilizado para o armazenamento e a troca de informações geométricas e semânticas, sendo que os LOD 1 e 2 são amplamente empregados para esses fins. Apesar de serem bem difundidos, os modelos em LOD 1 e 2 podem ter vários erros de natureza geométrica que os invalidem como, por exemplo, a presença de aberturas, orifícios, superfícies não totalmente fechadas, cobertura íngreme, entre outros (Figura 6). Para as simulações, esses erros podem implicar em falhas dos programas escolhidos. Assim sendo, é fundamental que os modelos sejam corrigidos (SAEEDRASHED; BENIN, 2019).

Figura 6 – Alguns problemas que podem ser encontrados em edificações representadas digitalmente: (a) orifícios, (b) aberturas, (c) vértices que excedem os limites geométricos, (d) coberturas íngremes, (e) paredes finais irreais e (f) superfícies não totalmente fechadas



A situação fica ainda mais complexa quando se leva em consideração que não há padrões precisos que apoiem a análise e validação desses modelos, no entanto, tendo em vista essa carência, há trabalhos dedicados à proposição de regras e à construção de ferramentas adequadas para diagnosticar os erros que podem impedir a validação dos modelos (SAEEDRASHED; BENIN, 2019).

Segundo Bogdahn e Coors (2010), a qualidade do conjunto de dados de informações urbanas pode ser avaliada por meio de sete elementos:

- linhagem⁵⁷;
- precisão posicional;
- precisão dos atributos;
- integridade;
- consistência lógica;
- precisão semântica; e
- informações temporais.

Há ferramentas distintas que podem ser aplicadas para análise, teste e correção de erros de sintaxe, geometria e semântica de modelos numéricos 3D de cidades em CityGML como, por exemplo:

- FreeCAD;
- MeshLAb;
- CityDoctor;
- BuildingReconstruction;
- GeomagicWrap;
- Space Claim; e
- NetFaab.

⁵⁷ Termo relacionado com o que ocorre com os dados desde sua origem, incluindo também os diversos processos que podem passar (TECHOPEDIA, 2021).

Segundo Saeedrashed e Benin (2019), apesar dessas ferramentas indicarem em alguns casos que o reparo do arquivo CityGML foi bem sucedido, é possível identificar que alguns erros menores podem não ser reparados. Esses erros geralmente são identificados na aplicação dos modelos.

É importante destacar que os arquivos em CityGML podem ser visualizados por meio de diferentes editores e visualizadores⁵⁸ (CITYGML, 2020; GRÖGER; PLÜMER, 2012), como por exemplo: FZKViewer, Liquid XML Editor, GML Viewer, TerrainView, eveBIM, BIMserver, 3DCityDB, Aristoteles, QS-City3D e Citygml4j.

4.3 3DCityDB

O armazenamento de dados espaciais no formato CityGML de modo que as informações possam ser visualizadas, analisadas e gerenciadas de maneira eficaz é um dos desafios dos fornecedores de tecnologias ligadas à modelagem da informação da cidade. Isso ocorre em virtude da complexidade dos dados urbanos.

Uma resposta atual a este desafio é dada por meio do 3DCityDB⁵⁹. O 3DCityDB é um sistema gerenciador de base de dados geográficos 3D (*geodatabase 3D*) gratuita para modelos urbanos baseados no padrão CityGML. Esta ferramenta possui um conjunto de componentes independentes de código aberto que permitem importar, gerenciar, analisar, visualizar e exportar modelos numéricos 3D de cidades em formato CityGML.

Os conjuntos de dados em padrão CityGML são muito úteis para troca de informações e implementação em 3DCityDB. Os arquivos são encontrados em formato de texto (arquivos XML) e de imagem. As imagens, quando empregadas, são usadas nos modelos como texturas. É importante esclarecer que os arquivos CityGML possuem estrutura hierárquica composta por objetos e seus atributos. A geometria dos objetos está em *Geography Markup Language* (GML) (OHORI *et al.*, 2018).

⁵⁸ Disponível em: <https://citygmlwiki.org/index.php/Freeware>. Acesso em: 20 jan. 2020.

⁵⁹ “[...] 3D *City Database* é um sistema gerenciador de base de dados geográficos, gratuito, para armazenar, representar e gerenciar modelos numéricos 3D de cidades em um sistema gerenciador de base de dados objeto-relacional espacial padrão. O esquema do SGBDOR implementa o padrão CityGML com objetos urbanos ricos semanticamente e em várias escalas, facilitando além da visualização, tarefas complexas de análise” (3DCityDB, 2020, tradução nossa).

O 3DCityDB realiza o gerenciamento de bancos de dados do tipo objeto-relacional, tal como Oracle e PostgreSQL/PostGIS, para o armazenamento de modelos em CityGML. Isso tem a vantagem de permitir que os dados geométricos sejam exportados para os formatos *Keyhole Markup Language* (KML), *Collaborative Design Activity* (COLLADA) e glTF, o que possibilita a visualização dos modelos sobre o globo terrestre em ferramentas como o ArcGIS, CesiumJS, Google Earth, entre outros (SAEEDRASHED; BENIN, 2019).

O armazenamento do modelo no 3DCityDB e a exportação dos dados geométricos para um formato interoperável, tal como KML ou COLLADA, é mais adequada, uma vez que a visualização eficiente das informações geométricas e semânticas em CityGML é mais complexa. Isso acontece porque o formato CityGML foi criado como um padrão para representação e troca dos modelos urbanos, e não para a visualização dos modelos em navegadores da *web*. Ohori *et al.* (2018) afirmam que a visualização de modelos de cidades na *web* ainda é um desafio.

Em um modelo de dados único, o CityGML combina informações geométricas e semânticas. No entanto, a visualização dos modelos na *web* requer a separação de dados geométricos de semânticos. A geometria precisa ser colocada em formatos gráficos que propiciem a visualização na *web*, como por exemplo, KML, COLLADA, X3D, entre outros (OHORI *et al.*, 2018).

Enquanto os formatos KML e COLLADA são adequados para a visualização do modelo em globos terrestres virtuais, o formato X3D é mais adequado para visualizar os modelos urbanos em navegadores como, por exemplo Google Chrome ou Firefox, que estão disponíveis em linguagem HTML (OHORI *et al.*, 2018).

Os globos terrestres virtuais são uma forma atual de acessar e utilizar informações geográficas. Sua aplicação favorece alterar a posição empregada na visualização do modelo no ambiente virtual. Além de permitir a conversão do arquivo CityGML para os formatos KML e COLLADA, que é interoperável, o 3DCityDB possibilita que as informações semânticas sejam consultadas no banco de dados através da *web* (OHORI *et al.*, 2018).

O 3DCityDB possui poderosos recursos de processamento dos dados contidos no banco de dados objeto-relacional. O processamento suporta, por exemplo, LOD diferentes e relações geométricas entre objetos e texturas.

Em virtude da perfeita compatibilidade entre 3DCityDB e CityGML, os modelos de diferentes cidades têm sido armazenados e gerenciados no 3DCityDB. Como exemplos de cidades, podem ser citadas Singapura, Berlim, Roterdã, Zurique, Potsdam e Frankfurt.

4.3.1 Armazenamento no 3DCityDB

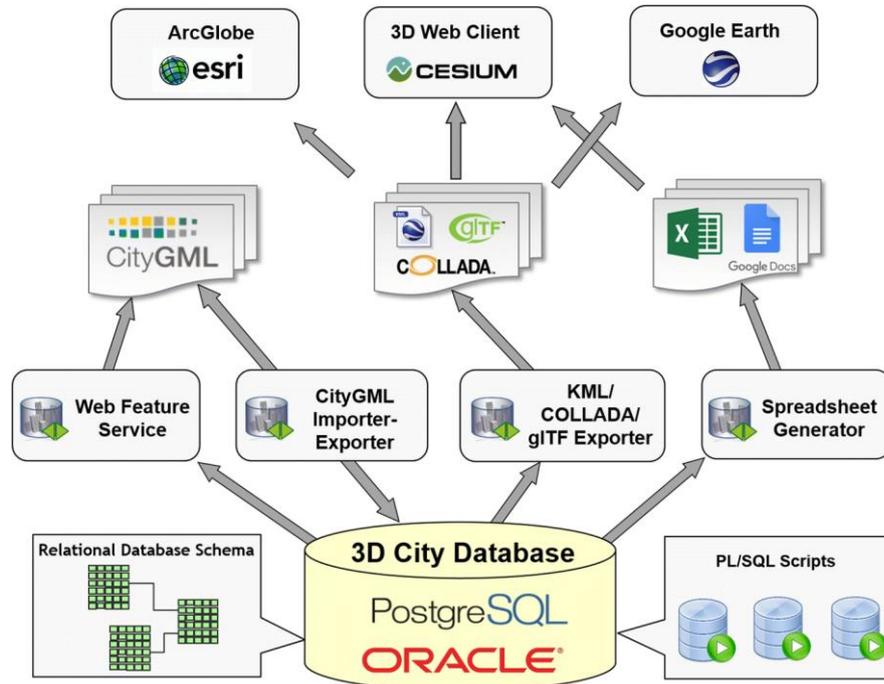
O 3DCityDB possui arquitetura de um sistema gerenciador de base de dados objeto-relacional. Em sua estrutura é possível trabalhar com dados espaciais que estejam no formato CityGML. Para o gerenciamento da base de dados há duas opções possíveis: o Oracle e o PostgreSQL (YAO *et al.*, 2018).

O 3DCityDB realiza a esquematização de tabelas no banco de dados para o armazenamento das informações geométricas e semânticas. Na implementação é possível que se trabalhe com uma quantidade reduzida de tabelas, o que traz a vantagem de facilitar a interação do usuário com o banco de dados. Além disso, há possibilidade dos nomes dos atributos e tabelas serem semelhantes ou iguais aos respectivos nomes encontrados no arquivo em formato CityGML (YAO *et al.*, 2018).

Com a utilização da linguagem SQL no banco de dados, além de ser possível gerenciar, consultar e analisar os dados em formato CityGML de qualquer nível de complexidade, é possível acessá-los através de ferramentas externas, tais como *software* GIS. Conforme mostra a Figura 7, o 3DCityDB possibilita o gerenciamento, a importação de arquivos em formato padrão CityGML e a exportação de arquivos em formato XLS, KML, COLLADA, gITF e CityGML. As planilhas XLS podem ser empegadas para complementar a visualização do modelo no 3D Web Client.

É importante ressaltar que no 3DCityDB algumas tarefas, tais como o cálculo do volume de objetos, podem ser realizadas graças ao uso da linguagem SQL (3DCityDB, 2020).

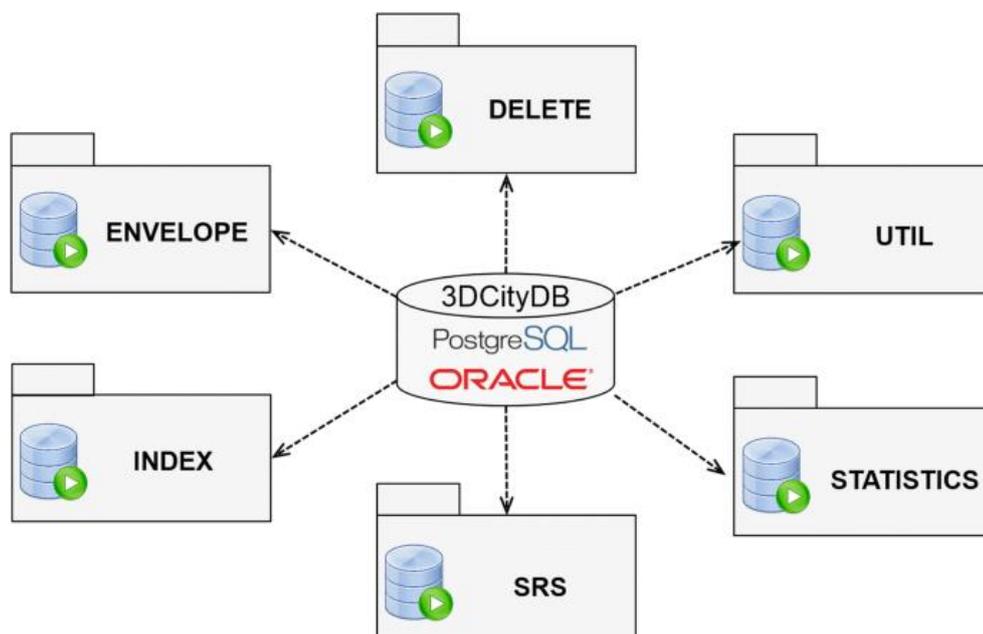
Figura 7 - Funcionalidades do 3DCityDB



Fonte: Yao *et al.* (2020).

Para armazenamento dos dados no formato CityGML no 3DCityDB são utilizados seis pacotes distintos que requerem *scripts* em linguagem PL/SQL do Oracle ou PL/SQL do PostgreSQL (3DCityDB, 2020). Os pacotes são SRS, STAT, INDEX, ENVELOPE, DELETE e UTIL, conforme esquematiza a Figura 8.

Figura 8 - Seis pacotes para armazenamento de dados no 3DCityDB



Fonte: Yao *et al.* (2020).

O Quadro 4 elenca as funções dos diferentes pacotes encontrados no sistema de armazenamento de dados no 3DCityDB.

Quadro 4 - Funções dos pacotes disponíveis no 3DCityDB para armazenamento de dados

Pacote	Principais funções
SRS	- Conversão dos dados 3D para novos sistemas de coordenadas no processo de exportação.
STAT	- Contabiliza as linhas de cada tabela e gera um relatório.
DELETE	- Possibilita a exclusão de objetos da tabela CityObject.
ENVELOPE	- Calcula o volume limite de um objeto 3D. - Permite a atualização do Atributo ENVELOPE dos objetos com base no valor calculado para o volume limite.
INDEX	- Possibilita ativar e desativar a indexação de dados espaciais ou não espaciais utilizados nas consultas. Isso permite importações de dados CityGML mais rápidas quando os arquivos são “pesados”.
UTIL	- Permite verificar as informações relacionadas com a versão do banco de dados. - Possibilita realizar conversões em coordenadas 3D semelhantes. - Determina a relação a ser estabelecida entre a tabela do 3DCityDB e a classe do objeto em CityGML.

Fonte: Adaptado de Yao *et al.* (2020).

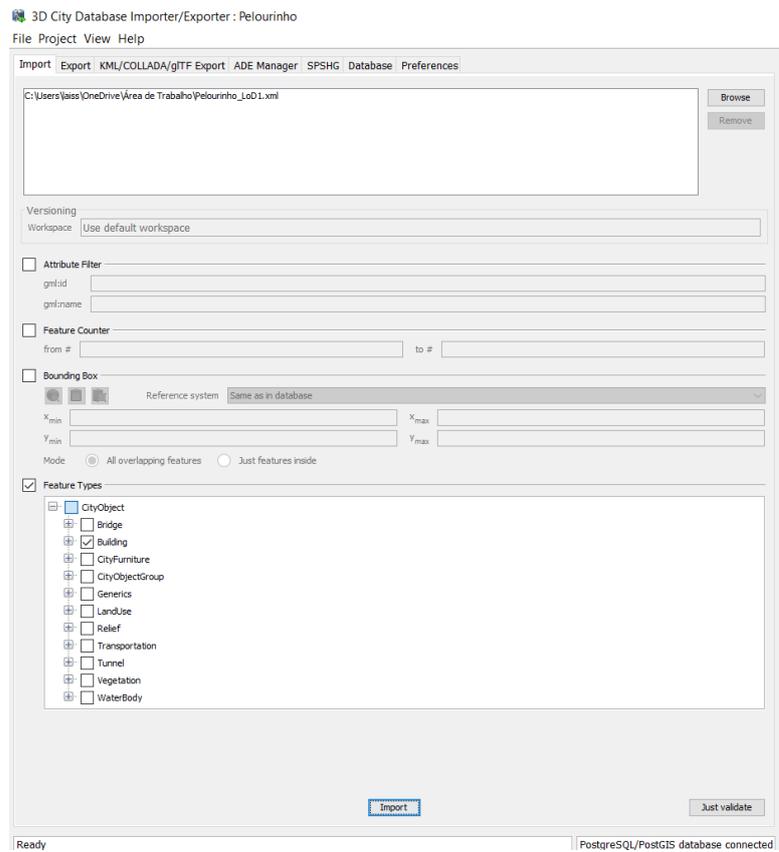
4.3.2 3DCityDB Importer/Exporter

O 3DCityDB Importer/Exporter é uma das ferramentas incluída no pacote. Sua função é permitir que os arquivos CityGML sejam lidos e gravados no banco de dados. Ele é baseado na linguagem Java e está disponível ao usuário na interface gráfica da ferramenta (Figura 9). Criadores de *software* podem desenvolver produtos para serem associados ao 3DCityDB, assim sendo, para leitura e gravação dos arquivos CityGML é utilizada uma *Application Programming Interface* (API)⁶⁰ denominada *citygml4j*⁶¹, a qual permite que os conjuntos de dados CityGML sejam satisfatoriamente processados e verificados em relação a sua consistência (YAO *et al.*, 2018).

⁶⁰ Em tradução livre, Interface de Programação de Aplicativos.

⁶¹ É uma biblioteca Java e API criada para facilitar o trabalho com o CityGML. Além disso, simplifica a leitura, processamento e gravação de conjuntos de dados, bem como o desenvolvimento de *software* compatíveis com o CityGML (3DCityDB, 2020).

Figura 9 - Interface gráfica do 3DCityDB Importer/Exporter



Fonte: capturado da interface do 3DCityDB.

A verificação dos arquivos que se pretende importar para o 3DCityDB é uma etapa para o processo de importação. Ela consiste em analisar os *Xlinks*⁶² do conjunto de dados CityGML. Ou seja, é útil para analisar os relacionamentos entre dois ou mais objetos (ou partes de objetos) na linguagem XML. A análise é focada apenas na sintaxe empregada para declarar a existência do *link* e descrever suas características. Em razão de objetos presentes na parte inicial de um arquivo CityGML poderem se relacionar com objetos contidos no final do arquivo, o processo de verificação implica na leitura do conjunto de dados por completo, o que por sua vez pode demandar o uso de toda memória da máquina utilizada quando arquivos CityGML muito ‘pesados’ são utilizados. Por arquivos ‘pesados’, entende-se aqueles que possuem mais que quatro gigabytes (GB) (3DCityDB, 2020).

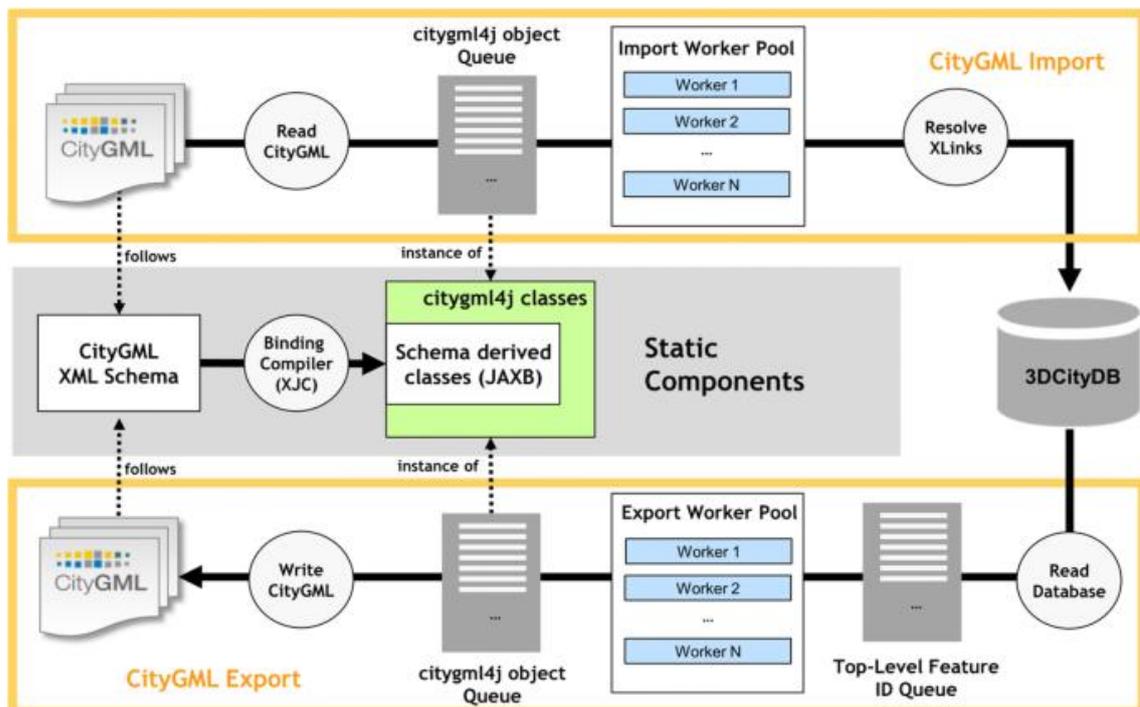
⁶² Xlink é um conceito do GML 3.1.1 usado para evitar redundâncias na implementação de geometrias. Por meio dele, as geometrias das partes de um edifício são referenciadas ao invés de serem declaradas explicitamente. Por exemplo, uma superfície compartilhada entre duas edificações próximas é declarada no arquivo XML uma única vez, no entanto, será referenciada usando o conceito de Xlink pelas duas edificações (CITYGML, 2012).

Para exemplificar, o modelo de Nova Iorque, composto por cerca de um milhão de edificações, possui 32 GB. Para resolver esse problema de importação no 3DCityDB, os dados dos arquivos CityGML podem ser importados em etapas. Assim sendo, isso pode ser explorado quando o usuário está trabalhando com arquivos muito ‘pesados’, ou está interessado em importar para o banco de dados apenas parte do seu conjunto de dados. No caso do modelo de Nova Iorque, o problema pode ser solucionado pela importação em duas etapas. Primeiramente, o arquivo pode ser lido para importação da geometria e armazenamento temporário de todos os *links* entre objetos ou partes de objetos no banco. Depois disso, os *links* podem ser definitivamente armazenados no banco para conclusão do processo de importação. É importante destacar que na importação, cada objeto (edificação, corpo d’água, via etc.) é automaticamente convertido em um objeto em linguagem Java de acordo com a API citygml4jNote10 (YAO *et al.*, 2018).

O 3DCityDB Importer/Exporter não verifica a validação do conjunto de dados CityGML em relação a geometria e semântica. Sua análise permite verificar a validade dos dados apenas em relação ao esquema XML (3DCityDB, 2020).

A Figura 10 ilustra os processos de importação e exportação do modelo.

Figura 10 – Representação esquemática dos processos de importação e exportação de conjuntos de dados CityGML no 3DCityDB



Fonte: Yao *et al.* (2020).

No processo de importação do arquivo CityGML, formato que está estruturado de acordo com o esquema XML (*CityGML XML Schema*), o arquivo é lido (*Read CityGML*) e os objetos de interesse, os quais são informados na interface do usuário por meio de filtro, são enfileirados (*citygml4j object Queue*) para serem adequadamente lidos e gravados no banco de dados através do 3DCityDB (Figura 10). Por sua vez, no processo de exportação, também contido na Figura 10, o usuário também deverá identificar por meio da interface do 3DCityDB os módulos que pretende exportar. Após o usuário selecionar os filtros, ao iniciar a exportação, os dados serão enfileirados e os objetos *citygml4jNote10* (*citygml4j object Queue*) encontrados serão escritos como um arquivo CityGML, concretizando a exportação.

4.3.3 Recursos para web

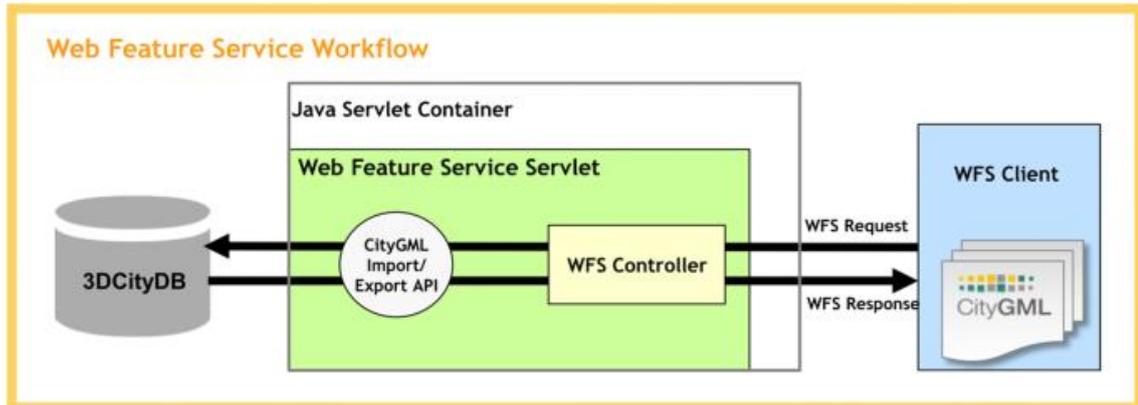
O 3DCityDB também possui recursos para *web*. Inicialmente, deve-se compreender que a ferramenta 3DCityDB Importer/Exporter é considerada mais adequada para computadores de mesa. Com o intuito de estender as possibilidades de importação e exportação dos modelos CityGML, o banco de dados possui recursos da *web*. Desse modo, via *web*, além de importar e exportar modelos, é possível acessar os objetos contidos no banco. Pode-se afirmar então que os usuários da ferramenta 3DCityDB Importer/Exporter não estão mais restritos ao seu uso. Isso ocorre porque podem contar agora com a interface OGC *Web Function Service 2.0* (WFS 2.0), que possui código aberto e é padronizada para recursos geográficos de chamadas *HyperText Transfer Protocol*⁶³ (HTTP) simples e de solicitações independentes de plataforma. A interface WFS 2.0 está disponível diretamente por meio de navegadores *web* ou outra ferramenta qualquer compatível com ela. Nesta interface, tal como no 3DCityDB Importer/Exporter, os objetos são recuperados através da aplicação de filtros que requerem informações sobre o(s) módulo(s) que se pretende exportar e a região geográfica de interesse (3DCityDB, 2020).

A Figura 11 mostra o fluxo de trabalho envolvido na utilização do WFS 2.0. Primeiramente, é necessário enviar uma solicitação ao servidor WFS com o objetivo de recuperar os módulos do CityGML que sejam de interesse. Por sua vez, o 3DCityDB WFS Servlet interpretará a solicitação e a converterá em uma linguagem

⁶³ Em tradução livre para o português: Protocolo de Transferência de Hipertexto.

adequada para consultar o banco. A partir da consulta, os objetos encontrados que atendem aos filtros aplicados irão compor um arquivo XML. Por fim, o conjunto de dados resultante da solicitação WFS pode ser baixado e utilizado (YAO *et al.*, 2018).

Figura 11 - Representação do fluxo de trabalho do *Web Feature Service*



Fonte: Yao *et al.* (2020).

Na Figura 11, pode-se observar que o usuário dos serviços dos recursos da web (*WFS Client*) do 3DCityDB fará solicitações (*WFS Request*) e obterá respostas (*WFS Response*) com base no formato de arquivo CityGML. Para que os recursos da web operem adequadamente é necessário um controlador (*WFS Controller*), o qual permite a importação e exportação de arquivos CityGML, tal como o 3DCityDB.

4.3.4 *Plugin de exportação KML/COLLADA/gITF*

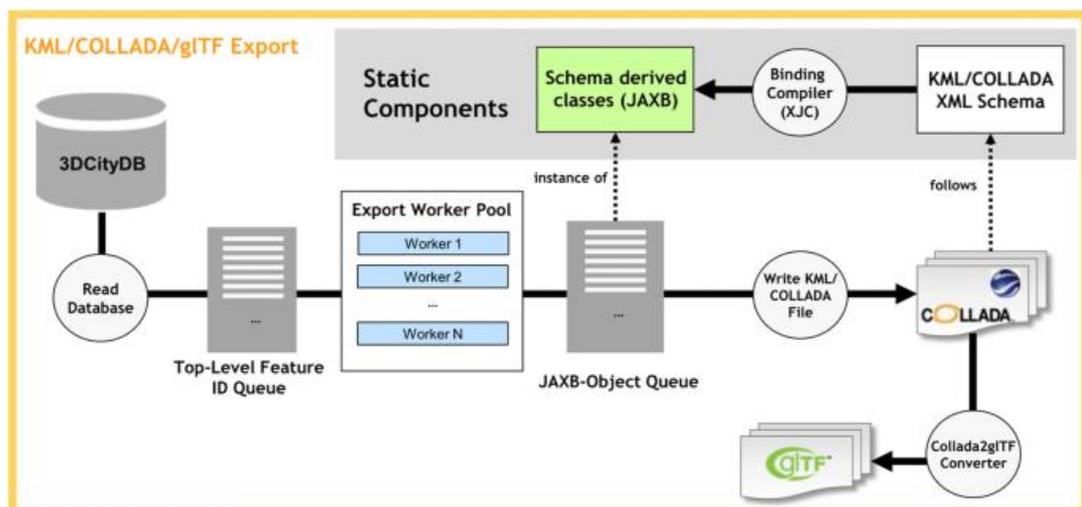
O 3DCityDB possui um *plugin* denominado KML/COLLADA/gITF Exporter. Sua utilização permite exportar o modelo geométrico em alguns formatos adequados para visualização na *web*, sendo eles, KML, COLLADA e gITF. Esses formatos têm a vantagem de poderem ser visualizados em globos terrestres virtuais, como Google Earth, CesiumJS, ESRI ArcGlobe, ArcGIS Pro e NASA Worldwind (3DCityDB, 2020).

O 3DCityDB também fornece a possibilidade de realização do ajuste da altura dos objetos durante a exportação para permitir alinhar o(s) objeto(s) com o Modelo Digital de Elevação (MDE). É importante esclarecer que esse recurso é automaticamente empregado quando se utiliza o MDE no Google Earth (YAO *et al.*, 2018).

Ainda sobre o processo de exportação, é possível que o usuário escolha o LOD e a aparência do modelo. No entanto, quando os modelos não possuem informações detalhadas para a aparência, como por exemplo as foto-texturas, o usuário do 3DCityDB pode escolher alguns estilos e cores disponibilizados pela ferramenta. Adicionalmente, é possível que no processo de exportação sejam gerados balões com informações para cada objeto do modelo geométrico. As informações semânticas disponibilizadas nos balões são aquelas armazenadas no banco de dados (3DCityDB, 2020). A Figura 12 esquematiza o processo de exportação do modelo.

Conforme mostrado na Figura 12, o processo de exportação começa com a leitura dos objetos no banco de dados, o qual ocorre de acordo com os filtros definidos pelo usuário da ferramenta. Em seguida, são formadas filas de dados espaciais (*Top Level Feature ID Queue*) com o intuito de escrever um arquivo KML ou COLLADA (*KML/COLLADA File*). Subsequentemente, o modelo em COLLADA é convertido em gITF por meio de uma ferramenta denominada Collada2gITF Converter (Figura 12). É importante ressaltar que o 3DCityDB Importer/Exporter pode ter suas funções expandidas por *plugins*. Os *plugins* podem ser criados por desenvolvedores interessados em possibilitar novas funcionalidades ao processo de importação e exportação no 3DCityDB. Um novo *plugin* é facilmente instalado copiando os arquivos criados em uma subpasta que deve ficar localizada no diretório de instalação do 3DCityDB Importer/Exporter. Os novos *plugins* são automaticamente iniciados quando a ferramenta 3DCityDB Importer/Exporter é colocada em funcionamento (YAO *et al.*, 2018).

Figura 12 - Representação esquemática do processo de exportação do modelo utilizando o Exportador KML/COLLADA/gITF

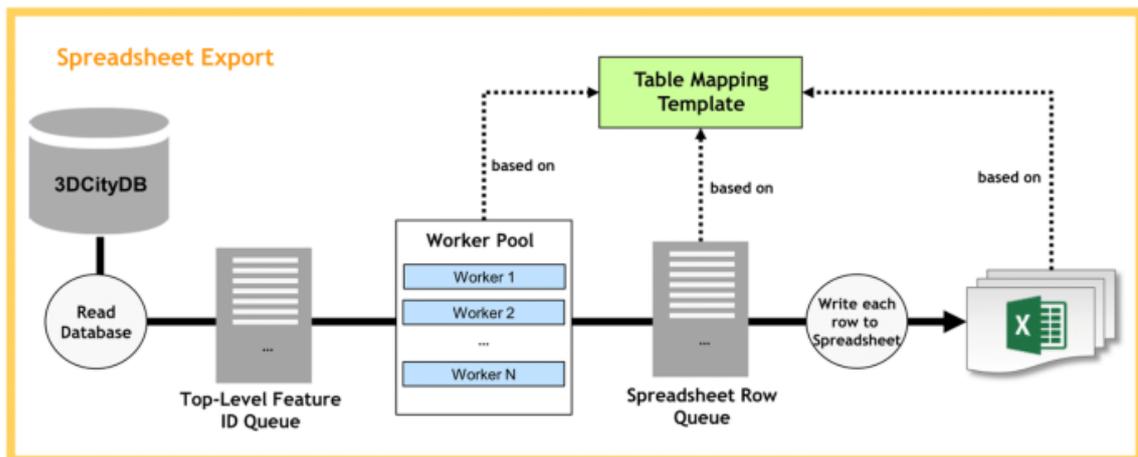


Fonte: Yao *et al.* (2020).

4.3.5 Plugin para geração de planilhas

Um outro interessante recurso encontrado no 3DCityDB, que pode ser instalado opcionalmente, é um *plugin* gerador de planilhas. Por meio dele, é possível criar relatórios que reúnam informações sobre os objetos armazenados no banco de dados. As planilhas geradas podem ter formato de arquivo CSV ou XLS. Assim sendo, podem ser abertas em Microsoft Excel, LibreOffice, Google Spreadsheets, Microsoft OneDrive, entre outros. Normalmente, a primeira coluna da planilha possui um código denominado como GMLID⁶⁴, que é um identificador individual de cada objeto do modelo. As demais colunas da planilha dependem da escolha do usuário (3DCityDB, 2020). A Figura 13 mostra o processo de geração das planilhas.

Figura 13 - Representação esquemática do processo de exportação de planilhas



Fonte: Yao *et al.* (2020).

Tal como acontece na exportação em KML/COLLADA/gIFT, o processo é iniciado com a leitura dos objetos no banco de dados, obedecendo aos filtros definidos pelo usuário da ferramenta (Figura 13). Em seguida, são formadas filas (*Top-Level Feature ID Queue*) de dados espaciais com o objetivo de gerar a planilha com as informações desejadas, conforme mostra a Figura 13. Após obter a planilha, o usuário pode realizar diferentes consultas que sejam de seu interesse (YAO *et al.*, 2018). Além disso, utilizando serviços da *web* específicos, as planilhas devem ser transformadas em *Uniform Resource Locator* (URL) para que seja possível visualizar a semântica no 3DCityDB Web-Map-Client⁶⁵. Ou seja, a semântica só pode ser visualizada em um

⁶⁴ Código de identificação de um objeto em formato CityGML.

⁶⁵ Para a visualização do modelo no globo terrestre virtual através do Web-Map-Client é necessário separar a geometria da semântica. Enquanto a geometria do modelo é exportada do banco de dados em KML/COLLADA/gIFT, a semântica é exportada em planilha. Para uso no Web-Map-Client, a planilha deve ser transformada em URL.

globo virtual terrestre se estiver disponível em um endereço virtual de uma página da *web*.

4.3.6 3DCityDB Web-Map-Client

Uma outra ferramenta do 3DCityDB, presente em seu pacote a partir da versão 3.3.0, é o 3DCityDB Web-Map-Client, também denominado como 3D-Web-Client. Sua utilização possibilita a visualização interativa de modelos semânticos de cidades na *web* (3DCityDB, 2020).

O 3D-Web-Client é uma extensão para o CesiumJS WebGL⁶⁶. Uma de suas principais características consiste no suporte e processamento de camadas⁶⁷ de dados configuráveis. Além disso, as camadas possibilitam que os usuários adicionem e removam dados, os quais podem ser habilitados e desabilitados na visualização. As camadas podem envolver dados do modelo digital do terreno, imagens e diferentes informações semânticas. As informações podem ser visualizadas a partir da interação do usuário com o 3D-Web-Client. Desde que as camadas tenham sido adicionadas e habilitadas, o usuário pode visualizá-las apenas navegando e clicando nos objetos do modelo. Diferentes ângulos do modelo podem ser explorados utilizando serviços tais como Microsoft Bing Maps, Google Street View e DualMaps (3DCityDB, 2020).

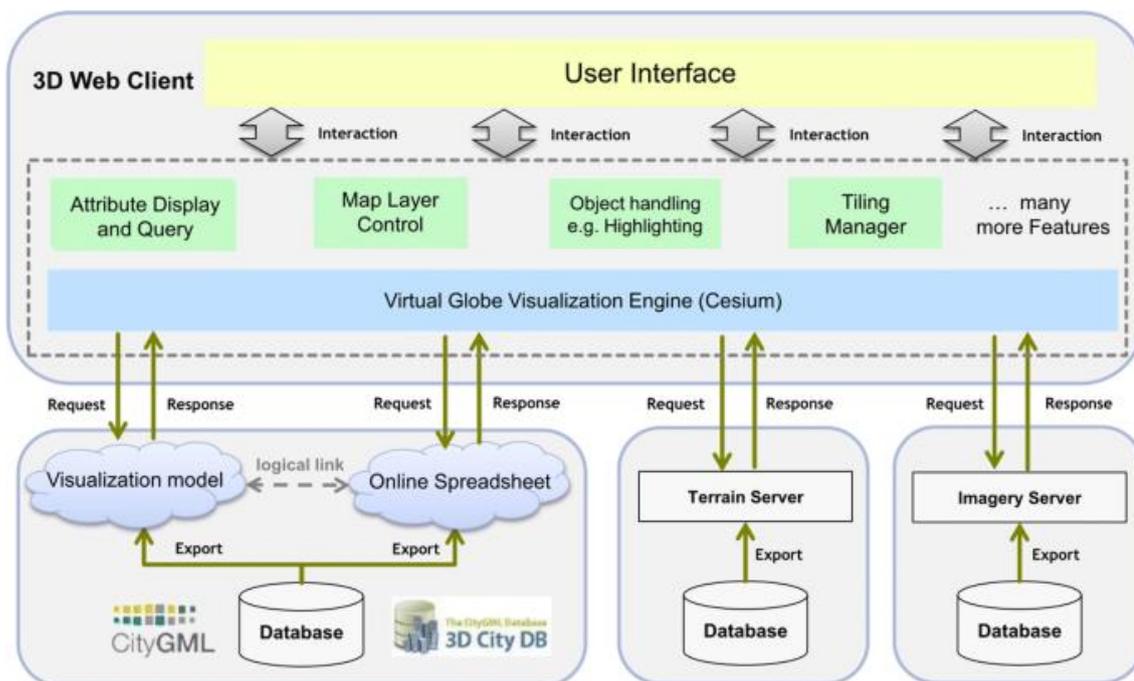
Para a visualização no globo virtual terrestre, a semântica em planilha podia ser transformada facilmente em URL usando o Fusion Table⁶⁸, no entanto, essa ferramenta gratuita do Google foi descontinuada. Apesar disso, há outras alternativas pagas que podem ser usadas para essa finalidade, tais como Cloud SQL e Maps Platform. A Figura 14 esquematiza as funcionalidades do 3D-Web-Client (YAO *et al.*, 2018).

⁶⁶ CesiumJS WebGL é um globo terrestre virtual de código aberto criado para visualizar e explorar dados geográficos (3D) sem a necessidade de navegadores específicos para estes fins.

⁶⁷ As camadas possibilitam a visualização interativa dos modelos numéricos 3D de cidades disponibilizados no 3DCityDB Web-Map-Client. As camadas disponíveis para visualizar a geometria são *Footprint*, *Extruded*, *Geometry* e *Collada/gITF*, as quais serão explicadas e exemplificadas na seção 5.2.2.3 deste trabalho.

⁶⁸ Um sistema *online*, integrado e gratuito baseado em serviço de nuvem do Google que permitia armazenar grandes quantidades de dados em planilhas e fornecia ferramentas para transformar e visualizar as informações em uma URL.

Figura 14 - Representação esquemática do 3D-Web-Client



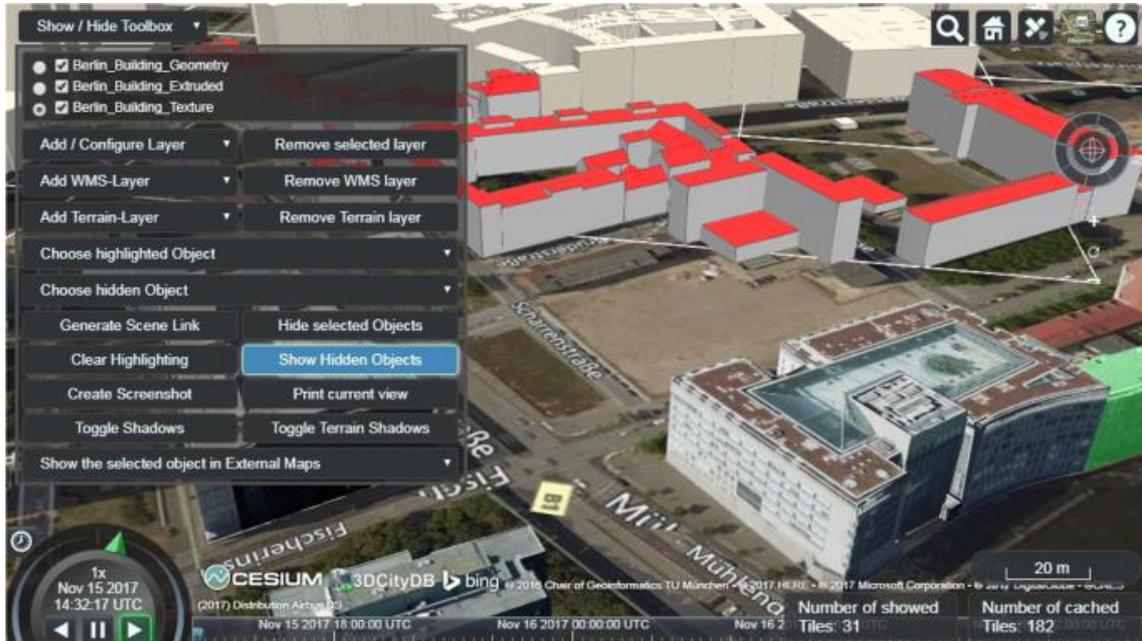
Fonte: Yao *et al.* (2020).

Conforme a Figura 14, a interface do 3D-Web-Client dá suporte para que o usuário utilize diferentes recursos desta ferramenta. Entre os recursos, destacam-se o controle de camadas do mapa, o manuseio de objetos, consulta e exibição dos atributos. Com esses e outros recursos, é possível visualizar o modelo semântico em um globo virtual. É necessário destacar que o 3D-Web-Client interage fazendo solicitações e obtendo respostas de servidores de imagens e terrenos, bem como, de dados exportados do banco de dados para visualização dos modelos, os quais podem estar relacionados a uma URL.

A Figura 15 mostra a interface do 3D-Web-Client. Nela, é possível observar que foram carregadas na ferramenta três camadas diferentes (*Building_Geometry*, *Building_Extruded* e *Building_Texture*). As camadas podem ser habilitadas ou desabilitadas para visualização marcando ou desmarcando a caixa de seleção. Além disso, também é possível excluir cada uma das camadas adicionadas ao 3D-Web-Client. Um detalhe interessante diz respeito ao fato do 3D-Web-Client poder detectar se está sendo colocado em funcionamento em dispositivos móveis. Quando isso ocorre, as dimensões de textos e ícones são ajustadas automaticamente. Por fim, o 3D-Web-Client permite a obtenção de uma URL para compartilhamento do modelo adicionado ao globo virtual terrestre. A URL pode ser copiada e enviada para terceiros.

Ao acessarem, será possível visualizar o modelo em navegadores comuns (3DCityDB, 2020).

Figura 15 - Interface gráfica do 3D-Web-Client



Fonte: Yao *et al.* (2020).

4.4 MODELOS URBANOS NA WEB

O compartilhamento aberto de modelos urbanos na *web* está sendo realizado por várias cidades ao redor do mundo nos últimos anos. Esse compartilhamento favorece que os modelos sejam empregados por muitos profissionais, estudantes e gestores em diferentes finalidades, tais como simulações ambientais, planejamento urbano, análise de mudanças climáticas, entre outras aplicações.

O grupo de pesquisa em Geoinformação da Universidade de Tecnologia de Delft reuniu em um *website* os modelos urbanos abertos de várias cidades (3D Geoinformation, 2021). A maior parte desses modelos utiliza o armazenamento no formato padrão CityGML. No entanto, alguns modelos estão disponíveis em KML, Shapefile e OBJ. Há modelos disponibilizados em LOD1, LOD2 e, até mesmo, LOD3. O modelo urbano de Singapura pode ser visualizado em LOD1. Por sua vez, para Nova York, Boston, Berlim, Austin, Filadélfia, Haia, Helsinque e Frederick são encontrados modelos em LOD2. Para Finlândia e Espoo também são encontrados modelos em LOD3.

Além dos modelos que serão apresentados nas seções que vão de 4.4.1 a 4.4.6, outras cidades também empregam o CityGML como padrão para dados urbanos. Para exemplificar, podem ser citadas Viena, Zurique, Salzburgo, Haia, Helsinque e Roterdã. Tendo em vista a ampla utilização do padrão CityGML na Europa, a União Europeia o adotou no INSPIRE⁶⁹, que é um programa de infraestrutura de dados geográficos. A seguir são dadas informações sobre alguns modelos.

4.4.1 Amsterdã

O modelo de Amsterdã (Figura 16) possui vias (*Road*), corpos d'água (*WaterBody*), vegetação (*PlantCover*), pontes (*Bridge*), uso da terra (*LandUse*), edifícios (*Buildings*) e outros objetos da cidade (*GenericCityObject*). A construção deste modelo ocorreu por meio do uso de dados geo-espaciais abertos, disponibilizados pelo governo holandês, e dados de nuvem de pontos (abertos) obtidos a partir de sensores de varredura a laser, para criação automática de um modelo urbano em LOD1 automaticamente. Além de estar disponível em CityGML, o modelo é também encontrado no formato holandês IMGeo e em OBJ. A ferramenta 3Dfier⁷⁰, foi usada para que um modelo numérico 3D CityGML em LOD1 pudesse rapidamente ser construído com dados abertos (GeoBIM benchmark, 2021).

A construção do modelo de Amsterdã é liderada pelo grupo de pesquisa em geoinformação 3D da Universidade de Delft, e o financiamento é realizado pela International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) e pela European Spatial Data Research Association (EuroSDR) (GeoBIM benchmark, 2021).

⁶⁹ Disponível em: <https://inspire.ec.europa.eu/about-inspire/563>. Acesso em: 8 jan. 2021.

⁷⁰ Disponível em: <https://github.com/tudelft3d/3dfier>. Acesso em: 10 jan. 2020.

Figura 16 - Trecho do modelo de Amsterdã disponível na *web*



Fonte: <https://3d.bk.tudelft.nl/projects/geobim-benchmark/amsterdamgml.html#technical-details>. Acesso em: 10 nov. 2021.

4.4.2 Berlim

A imagem do modelo de Berlim pode ser vista na Figura 17. O mesmo está disponível na *web* gratuitamente desde 2015 para os diferentes interessados (arquitetos, urbanistas, planejadores urbanos, desenvolvedores de jogos e, pelo público em geral). O formato escolhido para sua construção foi o CityGML. Seu armazenamento e atualização ocorre por meio do SGBDOR aberto 3DCityDB. Além da visualização tridimensional, o modelo de Berlim já foi aplicado no planejamento urbano, simulação de propagação de ruído, análise de demanda energética, entre outros (OGC, 2021).

O modelo foi implementado pela Virtual City Systems, sendo financiado pelo European Regional Development Fund (ERDF) em nome do Department for Economic Affairs, Energy and Public Enterprises (OGC, 2021; SHAN; LI; ZHANG, 2019).

Figura 17 - Trecho do modelo de Berlim disponível na *web*



Fonte: <https://www.businesslocationcenter.de/berlin3d-downloadportal/?lang=en#/export>. Acesso em: 10 nov. 2021.

Com mais de dez anos sendo construído, o modelo de Berlim possui cerca de 550.000 edificações em LOD2 com a textura, e o relevo do terreno. O modelo engloba toda área urbana de Berlim, que compreende 890 km², e possui mais de 200 construções em LOD3 e LOD4. Para realizar modelagem em larga escala foram utilizados dados obtidos por fotogrametria e varredura a laser.

4.4.3 Hong Kong

O modelo de Hong Kong, financiado por um projeto lançado pelo Departamento de Terras e desenvolvido pelo Departamento de Planejamento de Hong Kong, possui aproximadamente 210.000 construções em LOD1, 2.000 itens relacionados com a infraestrutura, aproximadamente 9.000 construções em LOD2 e LOD3 e 90 vias principais⁷¹ da cidade. O modelo foi construído a partir da combinação de dados de diferentes fontes: varredura a laser, fotogrametria aérea, fotogrametria terrestre, dados de SIG adicionados voluntariamente, entre outros (SHAN; LI; ZHANG, 2019).

⁷¹ As vias que não foram consideradas importantes não foram adicionadas ao modelo.

A Figura 18 apresenta o modelo de Hong Kong. O mesmo está disponibilizado nos formatos CityGML, OBJ, entre outros.

Figura 18 - Trecho do modelo de Hong Kong disponível na *web*⁷²



Fonte: adaptado de Shan, Li e Zhang (2019).

4.4.4 Singapura

O modelo de Singapura, também denominado de Singapura Virtual (*Virtual Singapore*) surgiu como uma plataforma de dados colaborativos que constitui um modelo numérico 3D de cidade, desenvolvido pela Universidade Nacional de Singapura com apoio financeiro da Autoridade de Desenvolvimento da Informação e Comunicação (Information and Communications Development Authority), para uso da Autoridade da Terra de Singapura (Singapore Land Authority).

O modelo cobre mais de 700 km² e possui mais de 50 gigabytes de informações de vários formatos, oriundas de varredura a laser aérea, varredura a laser terrestre, fotogrametria aérea, entre outras técnicas (SHAN; LI; ZHANG, 2019). Além das edificações, são encontrados vegetação, corpos d'água, instalações de transporte e textura no modelo. O modelo no padrão CityGML pode ser visualizado na Figura 19.

⁷² O modelo de Hong Kong está disponível para *download* em: https://www.pland.gov.hk/pland_en/info_serv/3D_models/download.htm. Acesso em: 10 nov. 2021.

Figura 19 - Trecho do modelo de Singapura disponível na *web*⁷³

Fonte: adaptado de Shan, Li e Zhang (2019).

A plataforma do modelo de Singapura tem a vantagem de proporcionar a integração de dados urbanos de diferentes naturezas, tais como informações climáticas e demográficas, em tempo real. Esses e outros tipos de dados podem ser utilizados para o planejamento urbano, análise de demandas como, por exemplo, energética, entre outras aplicações.

4.4.5 Wuhan

Na China, Wuhan é uma das primeiras cidades a desenvolver projetos ligados à construção de modelos numéricos e cidades inteligentes.

O modelo numérico 3D de Wuhan cobre uma área de mais de 8.569 km². Uma imagem do modelo é apresentada na Figura 20.

O modelo de Wuhan é periodicamente atualizado. Sua utilização é frequente em projetos e planos relacionados ao transporte, turismo, gerenciamento e controle de espaços subterrâneos, registro de imóveis, entre outros.

⁷³ O modelo de Singapura está disponível para *download* em: <https://3d.bk.tudelft.nl/opendata/opencities/>. Acesso em: 10 nov. 2021.

Wuhan, por meio do Departamento Municipal de Recursos Terrestres e Planejamento, lidera o desenvolvimento de especificações técnicas para modelagem numérica 3D de cidades. As especificações visam unificar a coleta, processamento, gerenciamento e manutenção de dados urbanos utilizados na construção de modelos numéricos de cidades.

Figura 20 - Trecho do modelo de Wuhan⁷⁴



Fonte: Adaptado de Zhu *et al.* (2009).

4.4.6 Nova York

O modelo de Nova York (Figura 21) foi construído a partir de dados disponibilizados pelo NYC Open Data Portal, por meio de pesquisas custeadas pela Universidade Técnica de Munique. Este foi o primeiro modelo geométrico e semântico construído em CityGML em LOD0, LOD1 e LOD2, de uma área dos EUA, tendo sido disponibilizado para o público na *web*. Além disso, também estão disponibilizados para *download* os arquivos obtidos nos formatos KML, COLLADA e glTF. O modelo contém a representação digital do terreno, edificações, corpos d'água, vias e parques (TUM, 2021).

⁷⁴ O modelo de Wuhan em CityGML não está disponível na *web*.

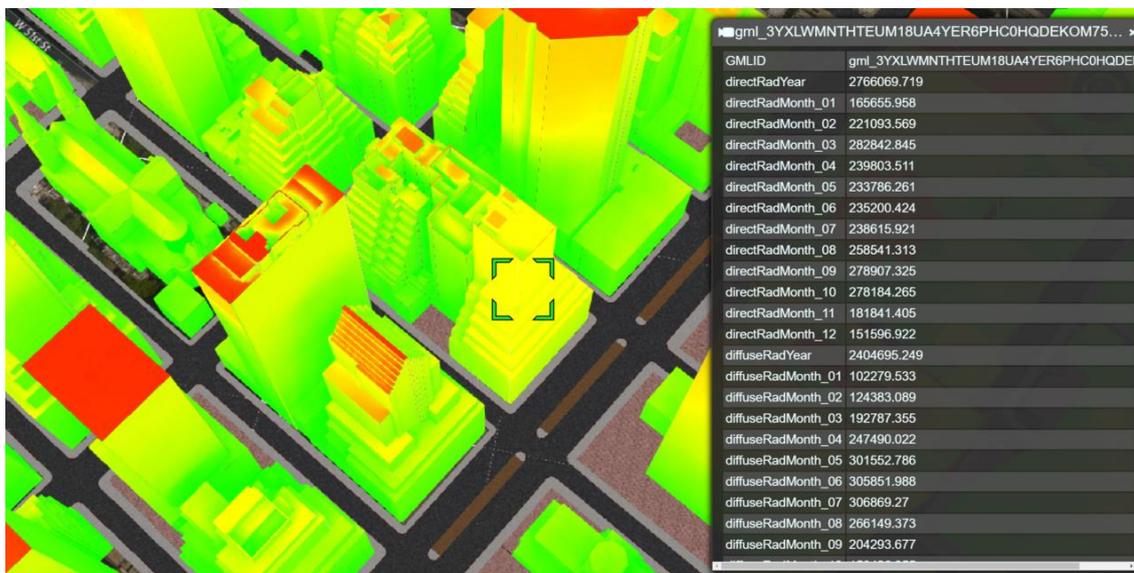
Figura 21 - Trecho do modelo de Nova York disponível na web



Fonte: <https://demos.cesium.com/NewYork/?view=-74.01881302800248%2C40.69114333714821%2C753.2406554180401%2C21.27879878293835%2C-21.343905508724625%2C0.0716951918898415>. Acesso em: 10 nov. 2021.

A ferramenta 3DCityDB Importer/Exporter possibilitou a exportação do modelo em CityGML para o formato KML e a visualização foi realizada no 3D Web-Client (3DCityDB-Web Map-Client). A área de Manhattan contida no modelo de Nova York já foi empregada em um estudo de estimativa de radiação solar, como mostra a Figura 22 (TUM, 2021).

Figura 22 - Estudo de estimativa de radiação solar



Fonte: TUM (2021).

4.5 APLICAÇÕES DOS MODELOS NÚMERICOS 3D DE CIDADES

Para Batty *et al.* (2000), as aplicações dos modelos numéricos 3D de cidades podem ser divididas em: telecomunicações, planejamento urbano, arquitetura, serviços de emergência, turismo e entretenimento, gestão de instalações e serviços públicos, análise de propriedades, desenvolvimento econômico e marketing, meio ambiente, portais da cidade, comércio eletrônico, educação e aprendizagem. Já para Ross (2010), há três tipos de aplicações: as que são baseadas na geometria⁷⁵; na geometria e semântica⁷⁶; e as que estão baseadas em extensões específicas de domínio e dados externos⁷⁷.

Biljecki *et al.* (2015) criticam as divisões propostas por Batty *et al.* (2000) e por Ross (2010) afirmando que as segmentações propostas por cada autor não são excludentes entre si, uma vez que é possível encontrar aplicações que podem se enquadrar em mais de uma delas.

Assim sendo, estes autores defendem que cada aplicação deve pertencer a uma única categoria e que precisa abranger todos os casos que a ela possam se enquadrar. Eles ainda propõem que a segmentação para as aplicações seja baseada em visualização.

Segundo Biljecki *et al.* (2015), há situações em que não é necessário ver o modelo geométrico e os resultados das operações espaciais podem ser armazenados em um banco de dados (por exemplo, potencial solar de superfícies de telhados). Por outro lado, existem casos que a visualização é indispensável (navegação, jogos, realidade virtual, planejamento urbano etc.).

Nesta seção 4.5 são apresentadas diferentes aplicações dos modelos numéricos 3D de cidades. As aplicações podem ser elencadas em dois grandes grupos. Seguindo o que foi proposto por Biljecki *et al.* (2015), em um grupo são mostradas as utilizações relacionadas com a visualização dos modelos. Por sua vez, no segundo grupo de aplicações são mencionadas as situações que não dependem

⁷⁵ Um exemplo de aplicação baseada apenas na geometria é a estimativa de sombra (ROSS, 2010).

⁷⁶ Estes modelos podem ser consultados para avaliação de aspectos funcionais e quantitativos de objetos tridimensionais. Um exemplo de aplicação baseada na geometria e na semântica é a estimativa do potencial solar (ROSS, 2010).

⁷⁷ Um exemplo de aplicação baseada em dados externos e extensões específicas de domínio é o cálculo da emissão de ruídos. Neste caso, modelos geométricos em LOD1 podem ser combinados com dados de relevo e de tráfego para essa finalidade (ROSS, 2010).

da visualização (quantitativas). No total, são citadas e comentadas 29 aplicações distintas dos modelos numéricos 3D de cidades.

As aplicações que demandam visualização são: geovisualização, análise de visibilidade, estimativa de sombras projetadas, estimativa da propagação de ruídos, cadastro 3D, visualização para navegação⁷⁸, planejamento urbano, visualização para comunicar informações ao cidadão, reconstrução da direção da luz solar, compreensão de imagens de radar, gestão de instalações, montagem de andaimes, resposta a emergências, simulações de iluminação, propagação de ondas de rádio, dinâmica de fluidos computacional, estimativa de população, definição de rota e acessibilidade, previsão de dano sísmico, estudo de inundações, detecção de oportunidades de melhorias, gestão florestal e arqueologia.

As aplicações que não demandam visualização são a estimativa da irradiação solar, a estimativa de demanda de energia, a escolha do local de implantação de novas edificações, a estimativa de áreas ocupadas e a classificação das construções. A seguir, serão dadas algumas informações com o intuito de esclarecer cada uma das aplicações.

Um dos principais objetivos da utilização dos modelos numéricos 3D de cidades é a visualização, uma vez que a mesma permite conhecer a forma e avaliar complexidades espaciais. A visualização desses modelos pode ser entendida como um aprimoramento de mapas (bidimensionais). Ela permite, por exemplo, realidade aumentada (MORENO *et al.*, 2012), jogos (RÜPPEL; SCHATZ, 2011) e visualização na *web* (COORS, 2003).

A geometria e aparência dos modelos numéricos 3D de cidades colaboram para a melhoria na apresentação de resultados de análises de atividades econômicas, da qualidade do ar, correntes de vento, parques eólicos, *tsunamis*, e simuladores de voo e de tráfego (BILJECKI *et al.*, 2015).

Os modelos numéricos urbanos em 3D também são muito úteis em análises de visibilidade. Nesse caso, eles podem ser aplicados para determinar uma boa localização para câmeras de vigilância, avaliação da visibilidade a partir de um apartamento, análise da melhoria da segurança rodoviária, determinação da linha de visão entre dois pontos e estimativa do volume de visão, visibilidade de um ponto de

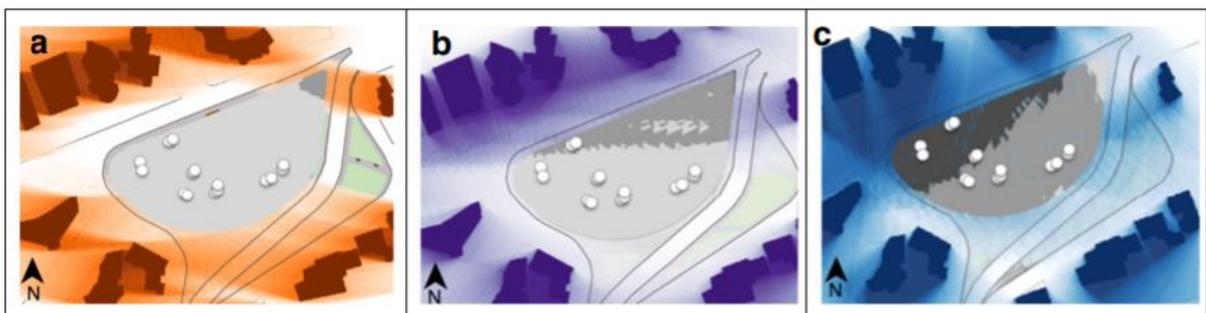
⁷⁸ A navegação diz respeito ao uso do modelo para a orientação do usuário no espaço.

referência, avaliação da cobertura de sensores, estudos sobre a percepção humana do espaço, estimativa do fator de visibilidade do céu, que pode ser obscurecido por edifícios próximos, bem como determinar o fator de visibilidade do céu para outros fins, como análises de conforto térmico e de estudos do clima nas cidades (HÄMMERLE *et al.*, 2011; MUÑOZ *et al.*, 2015).

No caso da análise da visibilidade, a vista que se tem a partir de uma edificação pode influenciar o seu preço ou, até mesmo, ser levada em conta na cobrança de impostos municipais (BILJECKI *et al.*, 2015).

As sombras projetadas por construções podem ser estimadas para avaliar os impactos das mesmas na sua vizinhança. Atualmente, esse tipo de análise é exigida em Mississauga, no Canadá (CITY OF MISSISSAUGA, 2015), e Haia, na Holanda (DEN HAAG, 2015). A estimativa de sombras também é importante na avaliação do potencial de geração de energia solar em construções (EICKER *et al.*, 2015), avaliação do conforto térmico de construções (YEZIORO; SHAVIV, 1994), determinação de envelopes solares⁷⁹ (KNOWLES, 2003) e na agricultura (COORS *et al.*, 2013), para prever a área do terreno mais suscetível à sombra e, portanto, menores rendimentos agrícolas para o cultivo de certas espécies. É importante ressaltar, que no caso da estimativa do potencial solar nas construções, as sombras podem reduzir o rendimento energético de painéis solares. A Figura 23 mostra uma análise de sombra.

Figura 23 - Uso do modelo numérico 3D de uma praça do Japão na análise de sombras no (a) verão, (b) primavera e (c) inverno



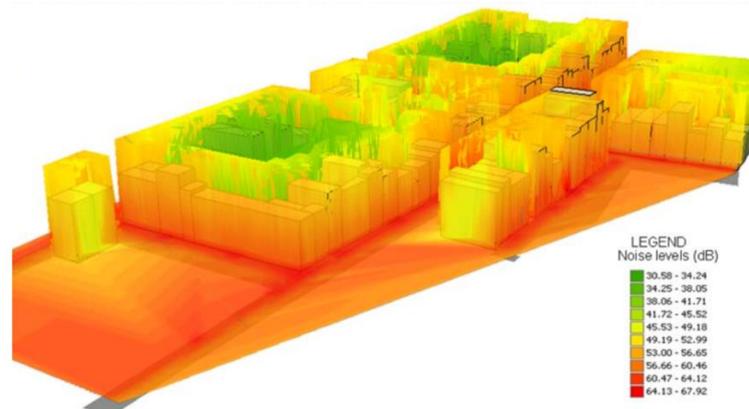
Fonte: adaptado de Moro, Krüger e Camboim (2020).

⁷⁹ O envelope solar é uma superfície imaginária que faz a cobertura de um local de modo análogo a um telhado de um perímetro de área utilizada. O conceito de envelope solar foi concebido para garantir às edificações de áreas urbanas o acesso à luz solar, evitando-se que haja a ocorrência de sombras provocadas pelo entorno durante um certo período do dia. Edifícios localizados na região limítrofe do envelope não provocarão sombras indesejadas na vizinhança em períodos críticos de acesso à luz solar como, por exemplo, no inverno. À medida que aumenta o intervalo de tempo desejado de disponibilidade de luz solar, menor será o envelope de insolação (KNOWLES, 2003).

Os modelos urbanos também podem ser usados para estimar a propagação de ruídos. Nesse caso, estuda-se a poluição sonora e as formas de mitigá-la, utilizando, por exemplo, barreiras acústicas (BILJECKI *et al.*, 2015). Atualmente, na União Europeia, os países são obrigados pela norma 2002/49/CE (EC, 2002), que trata de ruídos ambientais, a criarem mapas de ruídos para a população. O mapa informa sobre a exposição ao ruído e seus possíveis efeitos. Apesar desse tipo de análise poder ser realizada com dados 2D, o uso de informações 3D produz resultados mais realistas, por facilitar que se leve em conta a refração do som.

A semântica não é obrigatória nesse tipo de análise. No entanto, seu conhecimento também pode levar a resultados mais realistas nas análises. Isso ocorre porque o conhecimento dos tipos de materiais envolvidos (paredes e barreiras acústicas) influenciam os níveis de ruídos, quando levados em consideração (BILJECKI *et al.*, 2015). Na Figura 24 é possível visualizar como os níveis de ruídos podem variar das áreas internas para as externas de construções.

Figura 24 - Imagem em falsa cor mostrando a variação dos níveis de ruídos em construções



Fonte: Biljecki *et al.* (2015, p. 2856).

O cadastro 3D também é uma aplicação dos modelos numéricos urbanos em 3D. Esses registros podem ser úteis na análise de propriedades complexas como, por exemplo, construções subterrâneas. As principais vantagens desse tipo de cadastro são o armazenamento, consulta e gerenciamento dos dados, que facilitam as atividades de gestão urbana (BILJECKI *et al.*, 2015).

Modelos numéricos 3D de cidades também podem ser empregados em navegação. Eles são considerados 'mais intuitivos' que as representações em 2D, uma vez que os primeiros podem ser ditos mais realistas. No entanto, é necessário

destacar que as vistas superiores 2D são mais adequadas para estimar distâncias, pois têm escala mais consistente. Bernasocchi, Çöltekin e Gruber (2012) afirmam que misturar as visualizações em 2D e 3D é útil para unir as vantagens das duas formas de navegação. Nos modelos para navegação, o uso da semântica é muito interessante, uma vez que servirá para fornecer referenciais, tal como um ponto de referência, para orientar o usuário.

No planejamento urbano, os dados 3D são muito úteis na visualização da morfologia da cidade. Os modelos podem ser aplicados na análise da paisagem, simulação de tráfego, projeto de parques (LU; WANG, 2014), análise do horizonte urbano e planejamento de linha de metrô (MOSER; ALBRECHT; KOSAR, 2010).

Os modelos numéricos 3D de cidades podem ser usados para disseminar informações aos cidadãos. Na Austrália, o modelo de Adelaide fornece aos cidadãos informações sobre o transporte, planejamento e configuração urbana. É importante esclarecer que os modelos para visualização do público devem ser cuidadosamente projetados para serem facilmente compreendidos, pois neste caso, não se trata do uso por profissionais ligados ao planejamento urbano. Quando utilizados pelo público, os modelos urbanos em 3D podem também ser úteis para o turismo, que pode ocorrer por meio de passeios virtuais (BILJECKI *et al.*, 2015).

No sensoriamento remoto, os modelos numéricos 3D de cidades são úteis na interpretação de imagens SAR⁸⁰ de alta resolução. Além disso, podem ser aplicados para prever a refletividade de imagens SAR. Para essas análises, sensores virtuais incorporados ao modelo são usados para simulação da aquisição de imagens. Complementarmente, é necessário analisar os efeitos de espalhamento SAR com as construções em diferentes configurações (BILJECKI *et al.*, 2015).

Na gestão de instalações, os modelos virtuais podem ser aplicados na gestão de aeroportos, portos e redes de utilidades (BILJECKI *et al.*, 2015).

Em razão dos edifícios poderem ser bem diferentes uns dos outros, nas atividades ligadas à manutenção, eles podem requerer andaimes montados com configurações distintas (BILJECKI *et al.*, 2015). Considerando a topografia do local na qual o edifício está localizado, bem como as devidas regulamentações de segurança,

⁸⁰ Imagens criadas por radar do tipo *Synthetic Aperture Radar* (SAR) para representar objetos bidimensionais ou tridimensionais.

Løvset *et al.* (2013) utilizaram modelos numéricos 3D para o projeto de montagem de andaimes para diferentes edificações estudadas.

Os modelos numéricos 3D de cidades também são úteis na resposta de emergência a desastres. Nesse caso, o modelo pode ser empregado para obter informações importantes, tal como a entrada da construção. No caso de incêndio, esse tipo de informação é útil na definição da posição do caminhão dos bombeiros antes de chegarem ao local, poupando tempo (BILJECKI *et al.*, 2015).

As simulações de iluminação artificial interna e externa de ambientes também podem ser realizadas com modelos numéricos 3D de cidades. Isso possibilita que cenários distintos sejam estudados e possibilitem a seleção de uma boa estratégia de iluminação. As simulações têm a vantagem de não demandarem testes físicos e de não requererem a ida ao local, diminuindo custos (BILJECKI *et al.*, 2015).

Modelos numéricos 3D de cidades podem ser utilizados no estudo da propagação de ondas de rádio. Adicionalmente, a previsão da cobertura de *wi-fi* foi mostrada por Lee (2015) utilizando modelos numéricos urbanos.

Modelos numéricos 3D de cidades também podem ser aplicados em estudos de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD). Nesse caso, eles são úteis para estimar o fluxo de vento, na previsão da qualidade do ar, na previsão da temperatura da superfície do solo, na estimativa dos efeitos de explosões nas pessoas e nas estruturas, na compreensão do ambiente térmico urbano por meio da estimativa de variáveis ambientais através do CFD e na análise de sistemas que gerenciam o calor liberado em aparelhos de ar condicionado em edificações residenciais (BILJECKI *et al.*, 2015).

A estimativa da população de uma dada área pode ser realizada com o uso de modelos numéricos 3D de cidades. Uma das premissas usadas neste tipo de análise é que o tipo e tamanho da construção possuem uma relação com o número de pessoas que as habitam. Na literatura, há vários trabalhos que tratam deste tópico. Para exemplificar, uma aplicação seria a avaliação do número de pessoas e edifícios que podem ser afetados pelos ruídos oriundos de um parque eólico (BILJECKI *et al.*, 2015).

Os modelos urbanos em 3D podem ser aplicados na determinação de rotas ideais. Neste caso, deve-se compreender que os modelos contendo interiores podem

ser empregados para localizar caminhos mais curtos, determinar rotas para pessoas com necessidades especiais, determinar rotas para evacuações de ambientes, deslocamento em grandes estações de trem e, assim sendo, localizar rotas de melhor acessibilidade (BILJECKI *et al.*, 2015). A pesquisa de Tashakkori, Rajabifard e Kalantari (2015) foi realizada com o intuito de integrar rotas internas e externas às construções para melhorar as respostas a emergências internas.

Os danos provocados por terremotos podem ser previstos e visualizados utilizando modelos numéricos 3D de cidades. A avaliação da vulnerabilidade sísmica é fundamental para dar respostas otimizadas a situações de emergência, tais como terremotos (BILJECKI *et al.*, 2015).

O uso de modelos numéricos de terrenos para estimar inundações é comum em SIG. Porém, os modelos numéricos de cidades em 3D também são muito interessantes para esse fim. Nesse contexto, Varduhn, Mundani e Rank (2015) avaliaram o risco de inundação e os possíveis danos utilizando esses modelos. Esse tipo de avaliação é fundamental para gerenciar riscos e evacuar espaços que podem sofrer grandes inundações.

Modelos numéricos 3D de cidades são úteis para identificar mudanças no espaço urbano. Isso é importante para atualizar os cadastros realizados em uma cidade (BILJECKI *et al.*, 2015). Um exemplo disso seria identificar que uma dada edificação foi ampliada.

Os modelos numéricos 3D de cidades, por apresentarem a altura das construções, podem ser aplicados em análises volumétricas. Nessas análises, a densidade do ambiente construído pode ser determinada. Um exemplo disso seria a modelagem da dispersão de poluentes urbanos utilizando informações sobre a densidade volumétrica (BILJECKI *et al.*, 2015).

Os modelos também podem ser aplicados para navegação em áreas florestais com o intuito de serem desenvolvidas estratégias de manejo sustentável para, por exemplo, a previsão do crescimento de árvores.

Na arqueologia, a modelagem 3D de cidades pode ser usada na reconstrução de cidades antigas. Além disso, pode dizer respeito à modelagem de sítios arqueológicos, bem como ser útil na análise do desenvolvimento de locais ao longo

do tempo, testes de hipóteses de reconstruções e gestão de escavações (BILJECKI *et al.*, 2015).

A análise da exposição solar de uma construção utilizando modelos geométricos é um dos casos mais comuns na literatura. Quando modelos numéricos 3D de cidades são empregados para essa finalidade são avaliadas informações geométricas importantes na instalação de painéis solares em construções, tais como a orientação e a área do telhado. De acordo com Biljecki *et al.* (2015), essas são as principais informações necessárias para estimar a irradiação solar em modelos empíricos. Algumas pesquisas têm ampliado essa aplicação para as fachadas das edificações. Os trabalhos de Catita *et al.* (2014) e Liang *et al.* (2014) fazem isso considerando o material da superfície receptora. Com os estudos de exposição solar é possível analisar o conforto térmico de construções. Neste caso, deve-se identificar as edificações que estão sujeitas a um elevado aquecimento no verão devido à alta exposição solar.

As informações sobre exposição solar também são úteis para estimar os preços de imóveis, planejar o espaço urbano para minimizar ou maximizar a insolação e, no caso de modelos com janelas, fazer previsões sobre a iluminação natural interna das edificações. Apesar dos modelos numéricos 3D de cidades serem úteis na realização destas análises, alguns trabalhos, tais como Jochem *et al.* (2009) e Yu *et al.* (2009) utilizam nuvem de pontos densas na análise da insolação.

Modelos numéricos 3D de cidades também podem ser empregados para estimar a demanda energética residencial. Nesse tipo de aplicação, a partir do conhecimento do tipo da edificação, número de pavimentos, volume e outras características, é possível prever o consumo de energia associado ao resfriamento ou aquecimento das edificações (BILJECKI *et al.*, 2015).

O posicionamento das edificações nas cidades pode ser definido com o auxílio de modelos geométricos (BILJECKI *et al.*, 2015). Isso pode, por exemplo, favorecer atividades ligadas ao turismo.

Modelos numéricos 3D também podem ser empregados como forma de registrar e consultar as medidas geométricas de edificações. A área, por exemplo, pode ser aplicada pelos municípios na cobrança de Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana (IPTU) (BILJECKI *et al.*, 2015). Na Holanda, por exemplo,

espaços cujo pé direito seja inferior a 1,50 m não são levados em consideração no cálculo da área da construção, o que por sua vez interfere no preço e cobrança de impostos das edificações.

A classificação do tipo de edifício (casa, apartamento, entre outros) pode ser realizada com base no modelo geométrico. Henn *et al.* (2012) elaboraram um método para essa classificação. O conhecimento do tipo de edificação é útil para atividades ligadas a administração e ao marketing imobiliário.

4.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS NUMÉRICOS 3D DE CIDADES

Ao longo do Capítulo 4, dois padrões de dados foram abordados: o IFC e o CityGML. Uma comparação entre esses e outros formatos possibilitou constatar que o CityGML dá suporte a aparência, geometria, semântica e topologia, mostrando-se indicado para armazenamento e troca de dados urbanos.

Esta revisão mostrou também que os modelos em formato CityGML podem ser armazenados em um sistema gerenciador de base de dados objeto-relacional, o 3DCityDB. Além disso, esse pacote de *software* torna possível a visualização interativa dos dados em navegadores na *web*.

Várias cidades, principalmente da Europa, estão construindo e armazenando modelos geométricos e semânticos em formato CityGML, em bancos de dados. Os esforços relacionados a essa tarefa são justificados em virtude da quantidade de aplicações que continua crescendo para esses modelos.

5 MODELO GEOMÉTRICO E SEMÂNTICO DO PELOURINHO

Este capítulo descreve a construção do modelo geométrico e semântico de um conjunto de edificações localizadas no Pelourinho, em Salvador na Bahia. Além de apresentar o *framework* são discutidos os resultados alcançados em cada etapa do processo.

O objetivo das atividades experimentais deste capítulo é verificar se o modelo para o Pelourinho, construído a partir de imagens de satélite e fotogrametria (terrestre e aérea), satisfaz às exigências de qualidade geométrica e semântica imposta pela norma ISO 19107 para o padrão CityGML. A qualidade dos dados é verificada nesta pesquisa por meio da ferramenta gratuita denominada Val3dity, que proporciona a análise automática da geometria e da semântica do modelo.

Após a etapa de obtenção de um modelo em CityGML válido, o 3DCityDB foi utilizado para o armazenamento do arquivo em um banco de dados objeto-relacional. Além disso, o 3DCityDB também fez uma análise do esquema XML⁸¹ do arquivo.

Ao longo deste capítulo também é apresentado o uso do GEORES, um *plugin* gratuito para SketchUp, na construção de modelos CityGML. Apesar do SketchUp ser um *software* comercial, o mesmo é muito difundido como ferramenta de modelagem geométrica, sendo sua utilização muito comum em várias instituições de ensino brasileiras.

O GEORES foi escolhido tanto por ser uma ferramenta gratuita para SketchUp, quanto por não terem sido encontrados trabalhos científicos dedicados ao seu uso. Assim sendo, com este capítulo, foi estudado se os modelos CityGML gerados no SketchUp com o uso do *plugin* GEORES são válidos e adequados para serem armazenados em bancos de dados.

O armazenamento em bancos de dados é fundamental para que uma série de aplicações possam ser realizadas. Uma aplicação muito comum, e que foi realizada neste trabalho, diz respeito ao uso do banco de dados na realização de consultas do conjunto de informações armazenadas.

As edificações contidas no modelo são apresentadas parte em LOD1 e parte em LOD2. Enquanto as edificações em LOD1 foram obtidas a partir de mapeamento

⁸¹ Não é recomendável a importação para o banco de dados de esquemas XML com problemas de sintaxe.

em imagem de satélite, as que estão em LOD2 foram construídas a partir de fotogrametria (terrestre e aérea) no projeto "Estabelecendo requisitos para a Modelagem da Informação da Cidade⁸²".

Para melhor compreensão deste capítulo, o mesmo foi organizado em três seções. Na seção 5.1 é fornecida uma visão geral do *framework*; na seção 5.2, são detalhadas as etapas e os resultados da pesquisa e, por sua vez, na seção 5.3 é avaliada a construção do modelo do Pelourinho.

5.1 FRAMEWORK

Esta seção apresenta uma visão geral do método utilizado para construir e armazenar o modelo geométrico e semântico do Pelourinho em um banco de dados. O detalhamento do método empregado e os resultados alcançados são apresentados ao longo da próxima seção (5.2).

O *framework* empregado nesta pesquisa foi dividido em duas grandes etapas:

Primeira etapa: construção do modelo geométrico em LOD1 e conversão para o padrão CityGML;

Segunda etapa: armazenamento do modelo geométrico e da semântica em um banco de dados, seguido da visualização no Google Earth e no 3D Web Client (3DCityDB-Web-Map-Client).

A primeira etapa é apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Construção do modelo geométrico em LOD1 e conversão para o padrão CityGML



Fonte: elaboração da autora.

⁸² Projeto financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e desenvolvido na Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia em conjunto com o Karlsruhe Institute of Technology (KIT), na Alemanha.

Conforme mostra a Figura 25, para construir o modelo foi necessário realizar a inserção de dados no OpenStreetMap (OSM), a obtenção do volume das edificações no CadMapper e a preparação do modelo para conversão em CityGML no SketchUp.

A imagem de satélite do OpenStreetMap foi empregada para definir os *footprints* das edificações de interesse e adicionar os correspondentes dados de altura. Por sua vez, o CadMapper foi empregado para extrudar os *footprints* e obter o modelo digital do terreno da área estudada. O modelo geométrico com a topografia e as edificações em LOD1 foi ajustado no SketchUp e convertido para CityGML através do GEORES. A segunda etapa do fluxo de trabalho é apresentada na Figura 26.

Figura 26 - Armazenamento em um banco de dados e visualização dos dados geométricos e semânticos



Fonte: elaboração da autora.

Conforme a Figura 26, a validação do modelo ocorreu por meio do uso do Val3dity. Depois de verificada a validação, os dados geométricos e semânticos das edificações foram armazenados através do SGBDR PostgreSQL/PostGIS. Para viabilizar esse armazenamento foi necessário fazer uso do 3DCityDB. Esta ferramenta também permitiu a visualização dos dados geométricos e semânticos armazenados, uma vez que possibilitou a exportação dos mesmos para os formatos KML, COLLADA e glTF. A visualização final envolveu a utilização do Google Earth e do 3DWebClient (3DCityDB-Web-Map-Client), os quais também são detalhados na seção 5.2.

Para armazenamento da geometria no SGBDR PostgreSQL/PostGIS através do 3DCityDB é fundamental que o modelo esteja em formato CityGML. Independentemente do número de etapas utilizadas na construção do modelo é essencial que após sua conversão para CityGML estejam presentes todas as

informações geométricas em seus respectivos módulos que se deseja armazenar e compartilhar sem perdas.

O compartilhamento de arquivos de modelos numéricos 3D de cidades entre usuários sem que ocorra perdas de dados e, até mesmo, a garantia da interoperabilidade entre ferramentas, dependem da obtenção de um arquivo em formato CityGML com os dados geométricos e semânticos de interesse.

5.2 DETALHAMENTO DAS ETAPAS

Esta seção fornece o detalhamento das etapas supracitadas e dos resultados alcançados com os experimentos desta pesquisa.

5.2.1 Construção do modelo em CityGML

A obtenção de modelos no formato padrão CityGML tem a vantagem de reunir além dos aspectos geométricos e gráficos, a semântica dos objetos da cidade. Além disso, modelos em CityGML permitem o compartilhamento de informações geográficas 3D sem perdas. É importante ressaltar que apenas os modelos no padrão CityGML podem ser armazenados no PostgreSQL/PostGIS ou no Oracle por meio do 3DCityDB. Assim sendo, deve ser reforçado o entendimento de que o 3DCityDB pode proceder apenas o armazenamento de arquivos no formato CityGML.

5.2.1.1 Apresentação da área de estudo

O Pelourinho foi escolhido para este estudo em virtude de seu valor histórico e arquitetônico. Ele compõe a lista do patrimônio cultural da humanidade, elaborada pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO). É um bairro composto por igrejas barrocas, restaurantes, museus, bares, teatros etc. (BONFIM; SILVA, 1995). A Figura 27 mostra no OSM a área escolhida. A região estudada possui latitude de -12,97412 a -12,97061 e longitude de -38,51116 a -38,50727. No total, foram consideradas 248 edificações desta área.

Figura 28 – Planta da área de estudo sem informação (à esquerda) e mapeada (à direita)



Fonte: elaboração da autora.

5.2.1.3 Obtenção do volume das edificações

O CadMapper foi utilizado para obtenção dos modelos geométricos das edificações do Pelourinho em LOD1. Uma vez que os *footprints* e as alturas das edificações de interesse estejam no OSM, é possível obter automaticamente no CadMapper os blocos prismáticos que representam as edificações sobre o modelo do terreno. Isso ocorre em razão do OSM estar diretamente conectado a este recurso.

O CadMapper é uma ferramenta gratuita quando se deseja obter modelos com área de até 1 km². Para áreas maiores que esta existe custo para os usuários. O conjunto de edificações considerado neste estudo ocupa uma área de 0,191 km². Assim sendo, o uso dessa ferramenta nesta pesquisa não implicou em maiores custos.

Conforme mostra a Figura 29 (à esquerda), para construir o modelo geométrico no CadMapper basta selecionar a área desejada. Depois disso, é necessário fazer o *download* do arquivo no formato de interesse, que pode ser SKP, AI, DWG, entre outros. Neste trabalho, o modelo (Figura 29, à direita) foi gerado no formato SKP.

Figura 29 - Seleção da área de interesse no CadMapper (à esquerda) e modelo geométrico obtido (à direita)

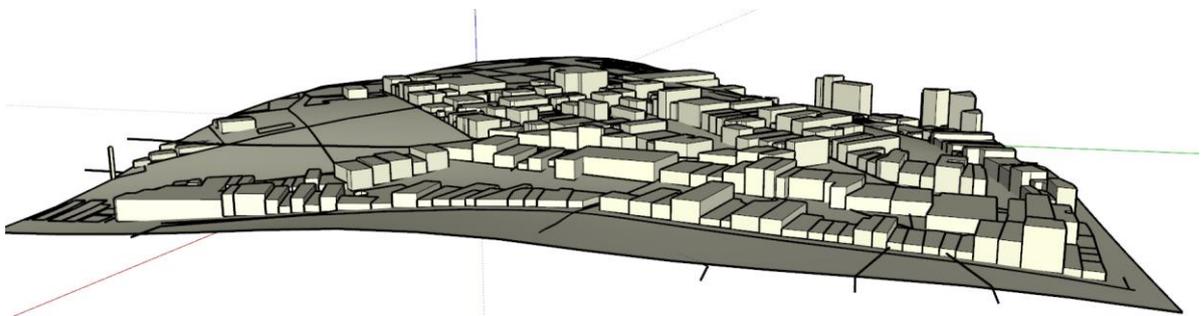


Fonte: elaboração da autora.

5.2.1.4 Preparação do modelo e conversão para CityGML

O modelo em LOD1 no formato SketchUp com a topografia é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Modelo SketchUp compatível com o LOD1 do CityGML



Fonte: elaboração da autora.

O GEORES foi utilizado para preparar o modelo de interesse em formato CityGML. Essa ferramenta é uma iniciativa de Wolfgang Sach⁸³, que a partir de 2019 a disponibilizou gratuitamente para os interessados utilizarem e colaborarem entre si no seu aprimoramento. Isso ocorreu após o Senhor Sach suspender o desenvolvimento comercial do GEORES, em 2018.

⁸³ Wolfgang Sach é um empresário com formação na área de informática que idealizou e desenvolveu o GEORES.

Ao utilizar o *plugin* GEORES é possível selecionar uma edificação de interesse e colocá-la no nível de detalhe desejado do CityGML. É importante destacar que foi necessário realizar essa tarefa de identificação do nível de detalhe para todas as edificações. Embora a etapa de identificação seja simples, pode ser demorada, exaustiva e inviável dependendo do número de edificações que se deseja trabalhar.

Do modelo em LOD1 (Figura 30), foram substituídas três quadras (55 edificações) para o LOD2. Assim sendo, 193 edificações foram classificadas como LOD1 do CityGML e 55 edificações foram identificadas como LOD2, conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 - Modelo SketchUp com edificações em LOD1 e LOD2 do CityGML



Fonte: elaboração da autora.

O processo de construção das edificações em LOD2 englobou as etapas de tomada fotográfica, geração das nuvens de pontos e ortofotos, edição das ortofotos, modelagem geométrica e mapeamento de texturas (ortofotos) no modelo geométrico, conforme esquematizado na Figura 32, e descrito na seção 5.2.1.4.

Um detalhamento maior do processo de construção das edificações em LOD2 que foram adicionadas ao modelo pode ser encontrado em Groetelaars, Nascimento e Amorim (2020).

Figura 32 - Etapas de construção das edificações em LOD2



Fonte: Groetelaars, Nascimento e Amorim (2020, p. 118).

Conforme pode ser observado na Figura 33, além das edificações em LOD1 e LOD2, também foram adicionadas vias, árvores e mobiliário urbano no SketchUp. Os postes (módulo *CityFurniture*) e a vegetação (módulo *Vegetation*) não foram adicionados em toda extensão da área estudada.

Os postes e a vegetação foram inseridos apenas em alguns locais com o intuito de testar a conversão para o formato CityGML e a importação para o banco de dados.

Figura 33 - Modelo SketchUp com edificações em LOD1 e LOD2, vias, vegetação e postes



Fonte: elaboração da autora.

Por fim, a preparação do modelo é encerrada com sua conversão de SketchUp para o formato CityGML através do *plugin* GEORES.

5.2.1.5 Validação do modelo CityGML no Val3dity

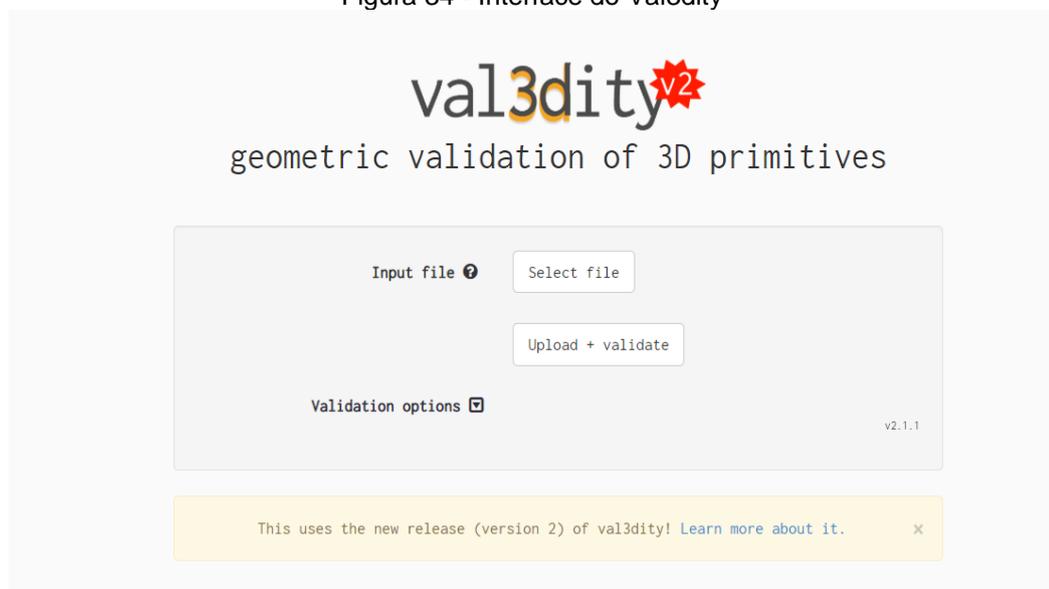
É crescente o número de modelos de cidades desenvolvidos no padrão CityGML. No entanto, muitos conjuntos de dados que parecem visualmente corretos apresentam geometria inválida, o que dificulta a realização de aplicações futuras do modelo (ZHAO; STOTER; LEDOUX, 2014).

O Val3dity é um *software* de código aberto e uma iniciativa de Technische Universiteit Delft (TU Delft), na Holanda. Essa ferramenta possibilita a validação de primitivas 3D com base na norma internacional ISO19107.

Sendo assim, o *software* possibilita a importação do arquivo, neste caso, em formato XML, e permite que os erros possam ser descritos por meio de um relatório, facilitando a identificação das imperfeições para a realização de correções quando necessário (LEDOUX, 2018).

O Val3dity realiza a verificação da adequação semântica, geométrica ou consistência geométrico-topológica dos modelos em CityGML (FLOROS; PISPIDIKIS; DIMOPOULOU, 2017). Na Figura 34, é apresentada a interface do Val3dity para importação do arquivo XML.

Figura 34 - Interface do Val3dity

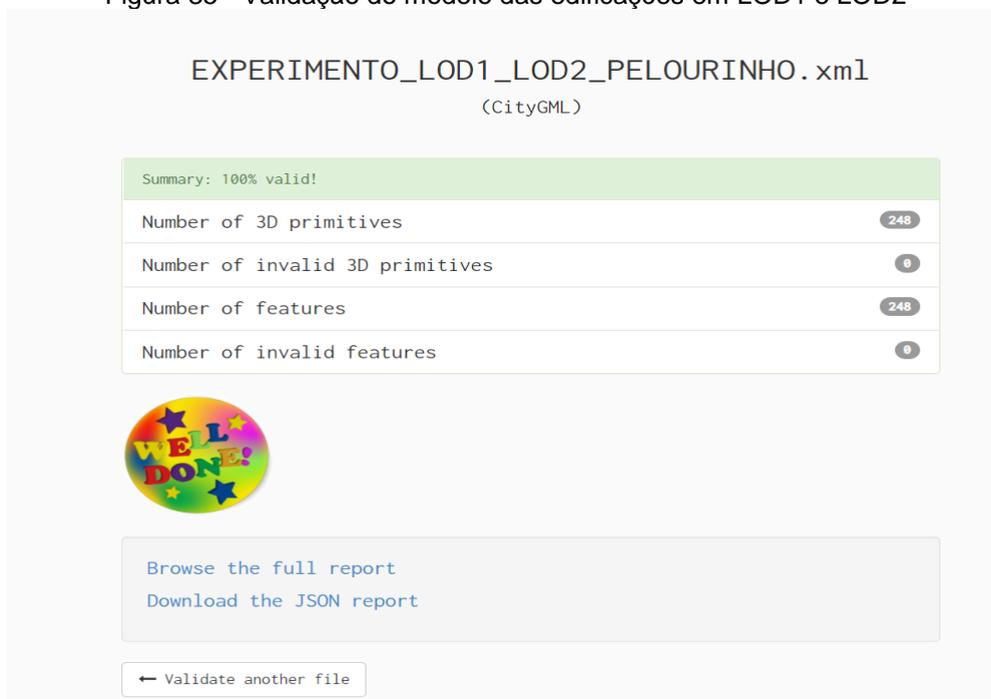


Fonte: elaboração da autora.

Na Figura 35, é possível observar o resultado da validação das edificações em LOD1 e LOD2. Todas as edificações foram validadas. Isso pode ser constatado pela

mensagem “Summary: 100% valid!⁸⁴” que aparece na tarja verde da interface da ferramenta.

Figura 35 - Validação do modelo das edificações em LOD1 e LOD2



Fonte: elaboração da autora.

Na Figura 36 é apresentada a verificação da validade da topografia. Conforme o resultado, a topografia não foi considerada válida pelo Val3dity. Isso pode ser observado na mensagem “*Summary: there are errors*” (“Resumo: há erros”) que aparece na tarja vermelha da interface da ferramenta.

⁸⁴ Em tradução livre para o português: Resumo: 100% válido!

Figura 36 - Validação do Modelo Digital do Terreno

Modelo_Digital_Terreno.xml
(CityGML)

Summary: there are errors	
Number of 3D primitives	9
Number of invalid 3D primitives	0
Number of features	1
Number of invalid features	1

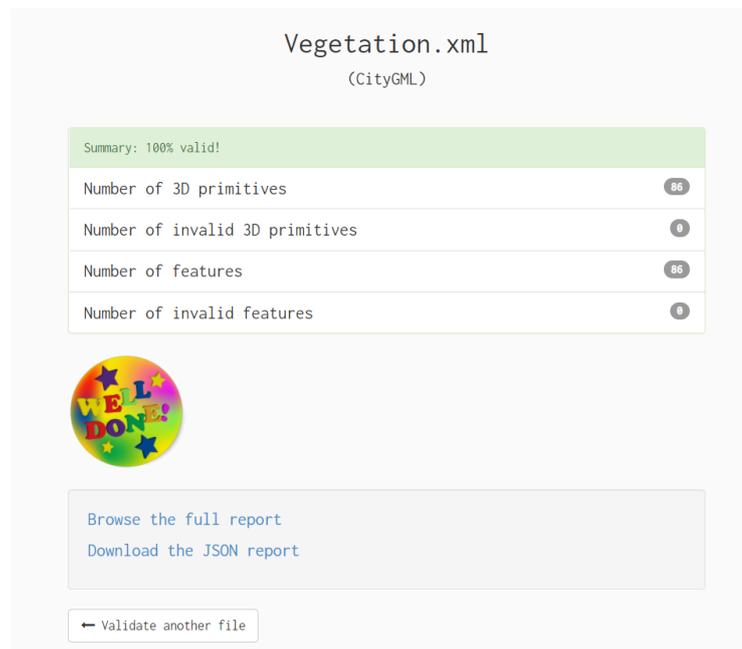
[Browse the full report](#)
[Download the JSON report](#)

Fonte: elaboração da autora.

Ao consultar o relatório do Val3dity foi possível constatar que a topografia é válida semanticamente, no entanto, não possui geometria declarada. O fato do GEORES converter a topografia para CityGML sem uma geometria declarada torna ela inválida e, portanto, inadequada para importação para o banco de dados.

Na Figura 37, é apresentada a verificação da validade de 86 árvores (*SolitaryVegetationObject*), que foram representadas no módulo vegetação do CityGML. O resultado foi favorável e isso pode ser identificado por meio das mensagens “*Well Done*” (“Muito bem!”) e “Resumo: 100% válido”.

Figura 37 - Verificação da validade do módulo *Vegetation*



Fonte: elaboração da autora.

Nesta pesquisa, também foi realizada a análise da validade das vias representadas na área de estudo (Figura 38). Por meio do Val3dity foi possível constatar que as mesmas atenderam com êxito aos requisitos do CityGML. Assim sendo, puderam ser importadas para o banco de dados.

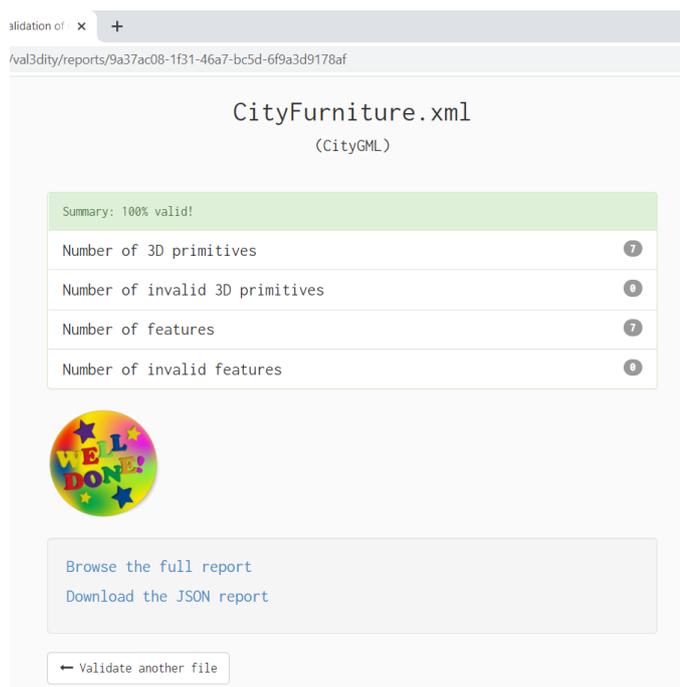
Figura 38 – Verificação da validade do módulo *Transportation*



Fonte: elaboração da autora.

A Figura 39 mostra o resultado da validação do módulo *CityFurniture* no Val3dity. Um total de sete objetos (postes de iluminação) armazenados no arquivo CityGML foram validados. Em razão disso, os postes também puderam ser importados para o banco de dados.

Figura 39 - Verificação da validade do módulo *CityFurniture*



Fonte: elaboração da autora.

Nesta pesquisa, as análises realizadas no Val3dity mostraram que as edificações, vias, os postes de iluminação pública e a vegetação inserida são válidos em CityGML. No entanto, a topografia foi considerada inválida, revelando assim uma possível limitação do GEORES para gerar arquivos CityGML com o módulo relevo (*Relief*) válido. Em razão desse resultado, a topografia foi retirada do modelo e as vias foram inseridas numa superfície plana horizontal.

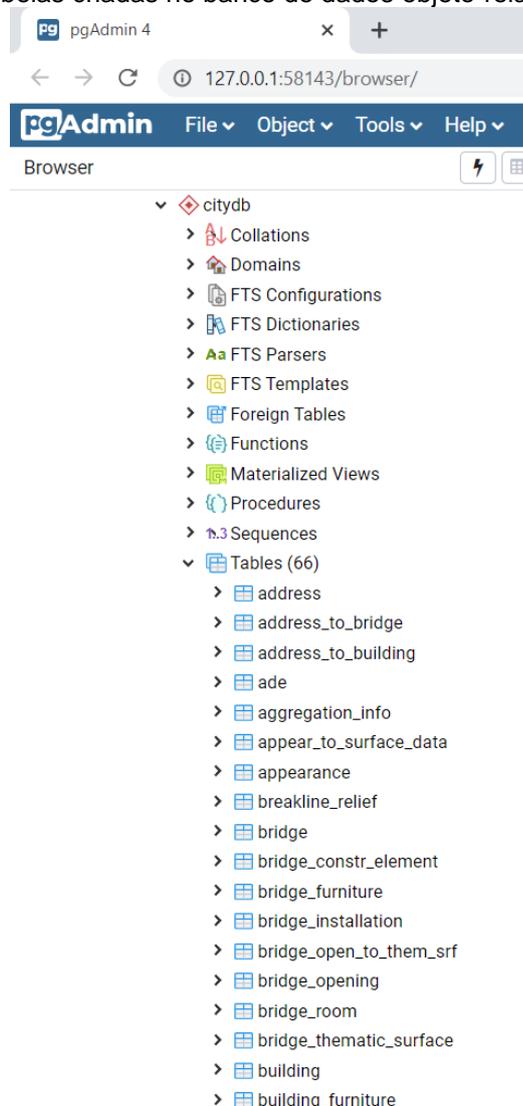
5.2.2 Armazenamento do modelo do Pelourinho no banco de dados

Com o modelo do Pelourinho em formato XML válido, foi possível considerar a possibilidade de armazenamento do mesmo em um banco de dados objeto-relacional. Nesta pesquisa, foi escolhido o PostgreSQL/PostGIS.

5.2.2.1 PostgreSQL/PostGIS

O PostgreSQL e sua extensão PostGIS foi utilizado para o armazenamento dos dados geométricos e semânticos do modelo do Pelourinho no formato CityGML. Para que fosse possível inserir adequadamente os dados do modelo CityGML no PostgreSQL/PostGIS foi utilizado o 3DCityDB. Inicialmente, o 3DCityDB permitiu a geração de um conjunto de 66 tabelas adequadas para o armazenamento do modelo CityGML, conforme mostra a Figura 40.

Figura 40 - Conjunto de tabelas criadas no banco de dados objeto-relacional através do 3DCityDB



Fonte: elaboração da autora.

O 3DCityDB, além de permitir a criação de um conjunto adequado de tabelas para armazenamento do modelo, possibilita a importação dos dados do arquivo XML para o PostgreSQL/PostGIS. Uma vez que o modelo tenha sido importado para o

banco, ele pode ser enriquecido com informações semânticas sobre os objetos geométricos.

Neste trabalho, o modelo importado para o PostgreSQL/PostGIS possui as edificações, vias, árvores e postes da rede de iluminação pública, os quais estão identificados em seus respectivos módulos CityGML: *Building*, *Transportation*, *Vegetation* e *CityFurniture*. Sobre as edificações, deve-se esclarecer que seus respectivos níveis de detalhe (LOD1 e LOD2) estavam especificados no arquivo XML importado para o banco de dados relacional.

Com o objetivo de enriquecer semanticamente o modelo do Pelourinho, outras informações foram inseridas manualmente no banco de dados para as 248 edificações. Os principais dados acrescentados para as edificações foram:

- Endereço (rua, número, cidade, estado, país, código postal);
- Número de pavimentos e altura das edificações em LoD1 e LoD2;
- Fotografias para algumas edificações; e
- Ano registrado na fachada de algumas edificações.

O ano registrado na fachada de algumas edificações foi identificado por inspeção visual utilizando o Google Maps (*Street view*). As fotografias foram inseridas apenas para algumas igrejas, conforme será mostrado na seção 5.2.2.3.

A Figura 41 mostra parte da 'tabela' obtida no PostgreSQL/PostGIS após inserção manual dos endereços das edificações. A tabela de endereços no banco de dados é identificada como "*address*".

Figura 41 – ‘Tabela’ resultante da adição manual dos endereços no banco de dados

id	gmlid	gmlid_c	street	house_number	po_box	zip_code	city	state	country
1	1	[null]	Rua das Laranjeiras	4	[null]	40026-230	Salvador	Bahia	Brasil
2	2	[null]	Avenida Jose Joaquim Seabra	160; 839	[null]	40301-110	Salvador	Bahia	Brasil
3	3	[null]	Rua das Laranjeiras	3	[null]	-	Salvador	Bahia	Brasil
4	4	[null]	Largo Terreiro de Jesus	-	[null]	40026-010	Salvador	Bahia	Brasil
5	5	[null]	Avenida Jose Joaquim Seabra	-	[null]	-	Salvador	Bahia	Brasil
6	6	[null]	Largo do Pelourinho	-	[null]	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil
7	7	[null]	Rua Joao de Deus	7; 5	[null]	40026-250	Salvador	Bahia	Brasil
8	8	[null]	Largo do Pelourinho	-	[null]	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil
9	9	[null]	Rua das Laranjeiras	1	[null]	40026-230	Salvador	Bahia	Brasil
10	10	[null]	Largo do Pelourinho	4	[null]	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil
11	11	[null]	Largo do Cruzeiro de Sao Franc...	10	[null]	40020-280	Salvador	Bahia	Brasil
12	12	[null]	Rua Joao de Deus	9	[null]	-	Salvador	Bahia	Brasil
13	13	[null]	Largo do Pelourinho	-	[null]	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil
14	14	[null]	Avenida Jose Joaquim Seabra	-	[null]	40025-000	Salvador	Bahia	Brasil
15	15	[null]	Rua Pe Agostinho Gomes	-	[null]	-	Salvador	Bahia	Brasil
16	16	[null]	Rua das Portas do Carmo	7	[null]	40026-290	Salvador	Bahia	Brasil
17	17	[null]	Rua Maciel de Baixo	5	[null]	40026-260	Salvador	Bahia	Brasil
18	18	[null]	Avenida Jose Joaquim Seabra	-	[null]	40040-001	Salvador	Bahia	Brasil
19	19	[null]	Largo do Pelourinho	28	[null]	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil
20	20	[null]	Rua do Tabua	-	[null]	-	Salvador	Bahia	Brasil
21	21	[null]	Rua do Tabua	-	[null]	-	Salvador	Bahia	Brasil

Fonte: elaboração da autora.

A Figura 42 mostra parte da tabela visualizada no banco de dados objeto-relacional após inserção manual do uso e da função das edificações presentes no modelo. A tabela que contém o uso das edificações no banco de dados é identificada como “*building*”.

Figura 42 – ‘Tabela’ resultante da inserção do uso das edificações no PostgreSQL/PostGIS

id	objectclass_id	building	building_root_id	class	class_cc	function	function_c	usage	usage_codes
1	79	26	[null]	79	[null]	Teatro Sesc Senac Pelourinho e Restaurante	[null]	Misto	[null]
2	48	26	[null]	48	[null]	Largo Tereza Batista	[null]	Comercial	[null]
3	55	26	[null]	55	[null]	Pao Pelo e Consulado Del Uruguay	[null]	Misto	[null]
4	199	26	[null]	199	[null]	Axego Bar e Restaurante	[null]	Comercial	[null]
5	143	26	[null]	143	[null]	Estrela do Mar e Companhia das Cangas	[null]	Comercial	[null]
6	14	26	[null]	14	[null]	-	[null]	Vazio	[null]
7	94	26	[null]	94	[null]	-	[null]	Residencial	[null]
8	232	26	[null]	232	[null]	Restaurante XV de Novembro	[null]	Misto	[null]
9	8	26	[null]	8	[null]	Afoxe	[null]	Residencial	[null]
10	176	26	[null]	176	[null]	Loja	[null]	Misto	[null]
11	128	26	[null]	128	[null]	-	[null]	Residencial	[null]
12	242	26	[null]	242	[null]	Botica Rhol	[null]	Misto	[null]
13	18	26	[null]	18	[null]	O Salvador Arts	[null]	Comercial	[null]
14	11	26	[null]	11	[null]	Loja	[null]	Misto	[null]
15	124	26	[null]	124	[null]	-	[null]	Nao ocupado	[null]
16	51	26	[null]	51	[null]	Restaurante sorriso da Dada	[null]	Comercial	[null]
17	165	26	[null]	165	[null]	-	[null]	Misto	[null]
18	221	26	[null]	221	[null]	Restaurante uaua	[null]	Misto	[null]
19	96	26	[null]	96	[null]	Depozito das camisetas	[null]	Misto	[null]
20	40	26	[null]	40	[null]	Cuco Bistro	[null]	Misto	[null]

Fonte: elaboração da autora.

o comando “*FROM*” foi informada a tabela que deveria ser inspecionada para recuperação das informações. Por fim, o comando “*WHERE*” foi usado para especificar para qual rua os dados deveriam ser consultados. Neste caso, Rua João de Deus.

Por meio da consulta foi possível identificar a quantidade de edificações localizadas na Rua João de Deus, bem como, o nome da cidade, do estado e do país das edificações. Conforme mostra a Figura 45, há vinte e duas edificações localizadas na Rua João de Deus.

Figura 45 – Resultado da consulta realizada no banco de dados para a Rua João de Deus

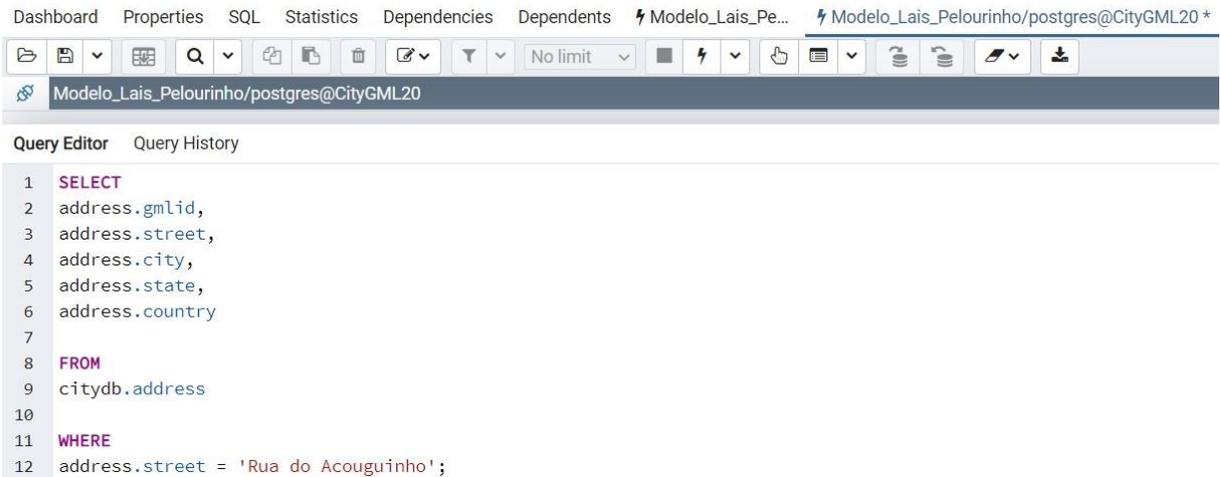
The screenshot shows a database interface with a query result table. The table has five columns: gmlid, street, city, state, and country. The data is as follows:

gmlid	street	city	state	country
1	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
2	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
3	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
4	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
5	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
6	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
7	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
8	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
9	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
10	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
11	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
12	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
13	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
14	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
15	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
16	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
17	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
18	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
19	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
20	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
21	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil
22	Rua Joao de Deus	Salvador	Bahia	Brasil

Fonte: elaboração da autora.

Uma outra consulta foi realizada para conhecer o número de edificações localizadas na Rua do Açouguinho, conforme mostra a Figura 46.

Figura 46 - Consulta realizada no banco de dados PostgreSQL para a Rua Açouginho



```

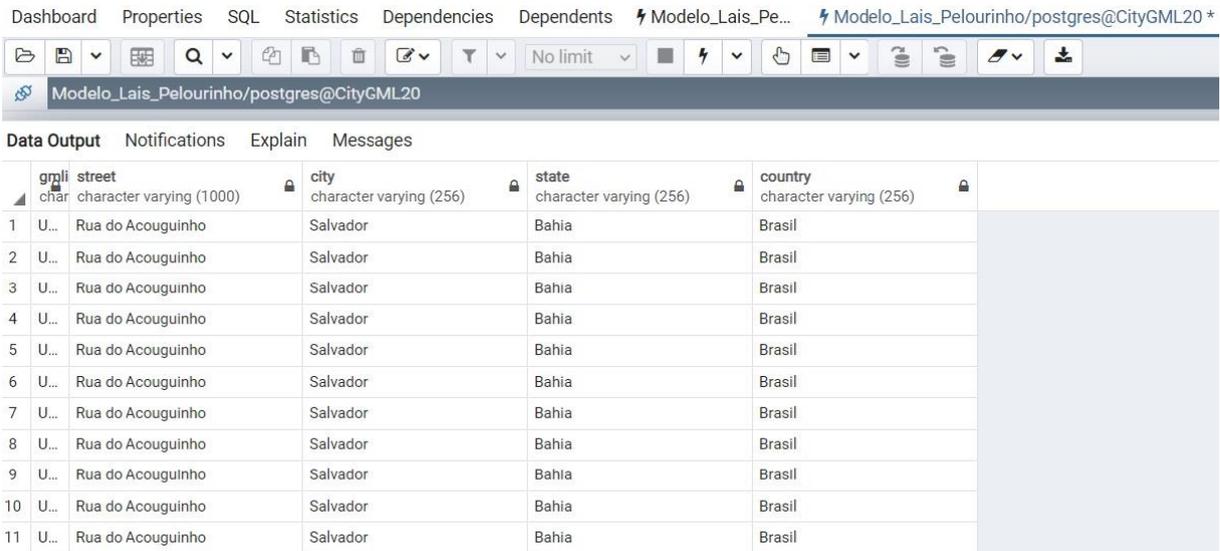
Dashboard Properties SQL Statistics Dependencies Dependents ⚡ Modelo_Lais_Pe... ⚡ Modelo_Lais_Pelourinho/postgres@CityGML20 *
Modelo_Lais_Pelourinho/postgres@CityGML20
Query Editor Query History
1 SELECT
2 address.gmlid,
3 address.street,
4 address.city,
5 address.state,
6 address.country
7
8 FROM
9 citydb.address
10
11 WHERE
12 address.street = 'Rua do Açouginho';

```

Fonte: elaboração da autora.

Tal como mostrado anteriormente, também foi possível obter a cidade, o estado e país das edificações. Neste caso, conforme mostra a Figura 47, a busca possibilitou encontrar onze edificações localizadas na Rua do Açouginho.

Figura 47 – Resultado da consulta realizada no banco de dados para a Rua Açouginho



	gmlid	street	city	state	country
	char	character varying (1000)	character varying (256)	character varying (256)	character varying (256)
1	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
2	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
3	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
4	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
5	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
6	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
7	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
8	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
9	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
10	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil
11	U...	Rua do Açouginho	Salvador	Bahia	Brasil

Fonte: elaboração da autora.

5.2.2.2 Importação e exportação do modelo no 3DCityDB

O 3DCityDB é uma ferramenta adequada quando se deseja armazenar um modelo geométrico e semântico com formato padrão CityGML. Neste trabalho, o 3DCityDB possibilitou a importação do modelo geométrico e semântico de uma área do Pelourinho, no SGBDR PostgreSQL/PostGIS.

Nesta pesquisa, a modelagem do banco de dados no PostgreSQL/PostGIS foi realizada através do 3DCityDB. A modelagem do banco de dados pode ser desenvolvida através de *scripts* que são executados a partir do *prompt*⁸⁶ de comando de sistemas operacionais tais como Windows e Linux. Neste trabalho, optou-se pela execução dos *scripts* através do *prompt* de comando do sistema operacional Windows. No entanto, isso também pode ser feito através de *scripts* em SQL que podem ser executados através de um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD), como por exemplo, no pgAdmin ou Oracle.

A Figura 48 apresenta as informações necessárias para preenchimento em CONNECTION_DETAILS para a conexão do 3DCityDB com o banco de dados (PostgreSQL/PostGIS).

Figura 48 - Conexão do 3DCityDB com o banco de dados

```

1  :: Provide your database details here -----
2  set PGBIN=C:\Program Files\PostgreSQL\12\bin
3  set PGHOST=127.0.0.1
4  set PGPORT=5432
5  set CITYDB=Modelo_Lais_Pelourinho
6  set PGUSER=postgres
7  ::-----

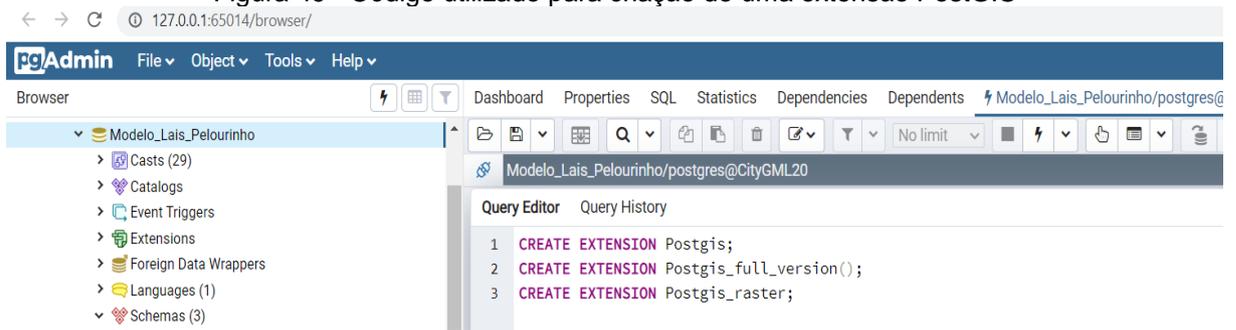
```

Fonte: elaboração da autora.

Após a conexão do 3DCityDB com o PostgreSQL/PostGIS foi necessário gerar uma extensão PostGIS, como mostrado na Figura 49. Esta extensão possibilita que operações, tais como extrusão ou cálculo de volume, possam ser realizadas através da ferramenta.

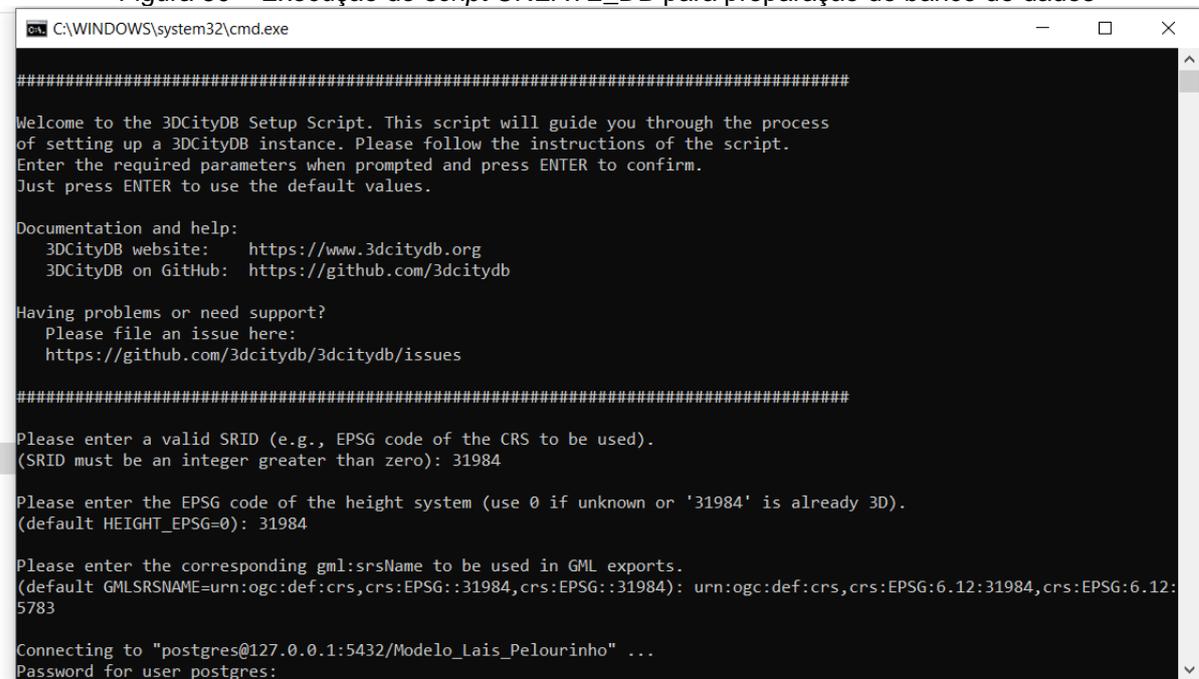
⁸⁶ Apesar de poder ter alguns significados distintos, no contexto desta pesquisa, *prompt* é um programa de interface de linha de comando usado para executar comando em um sistema operacional. Nesta pesquisa, o Windows.

Figura 49 - Código utilizado para criação de uma extensão PostGIS



Fonte: elaboração da autora.

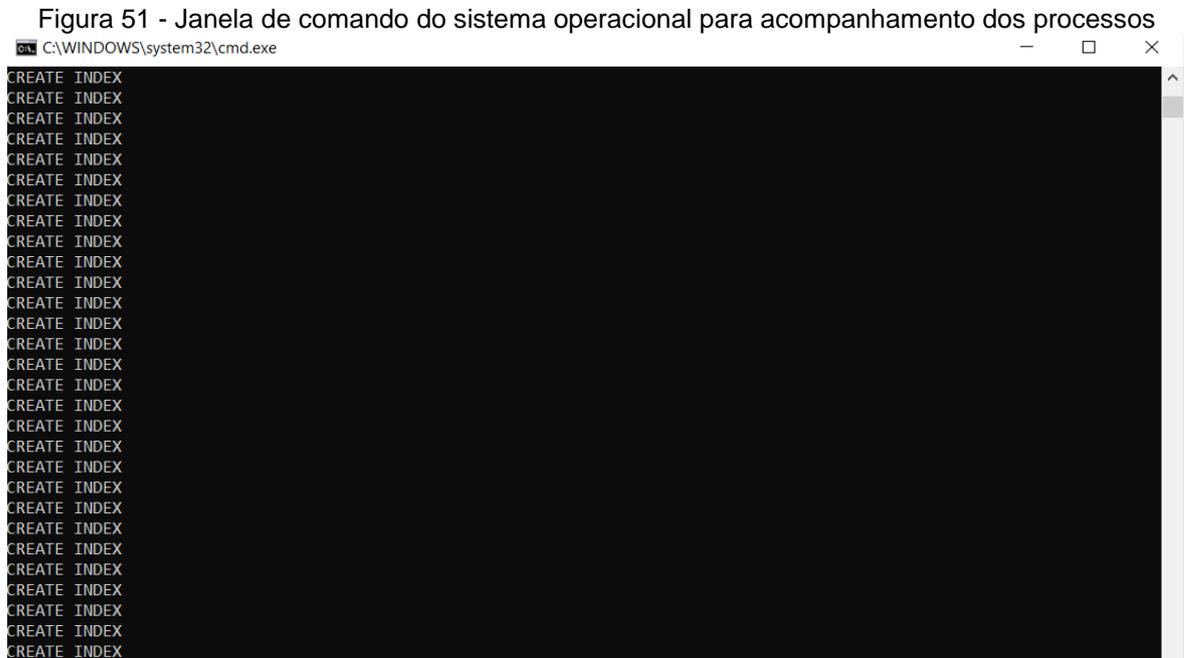
Após as etapas mostradas anteriormente foi necessário fazer a execução do *script* CREATE_DB. Durante a execução do *script* é importante fornecer as seguintes informações: identificador do sistema de referência (*Spatial Reference Identifier - SRID*), nome do sistema de referência espacial (*Spatial Reference System Name - srs Name*) e a senha do banco de dados⁸⁷. Deve-se destacar que também é possível inserir um SRID para a altitude. A Figura 50 apresenta as informações preenchidas durante a execução do *script*.

Figura 50 – Execução do *script* CREATE_DB para preparação do banco de dados

Fonte: capturada da janela de Prompt de Comando.

⁸⁷ Durante a instalação do PostgreSQL/PostGIS é necessário a criação de uma senha. Esta senha é utilizada todas as vezes que o usuário precisar fazer *login* no *software*.

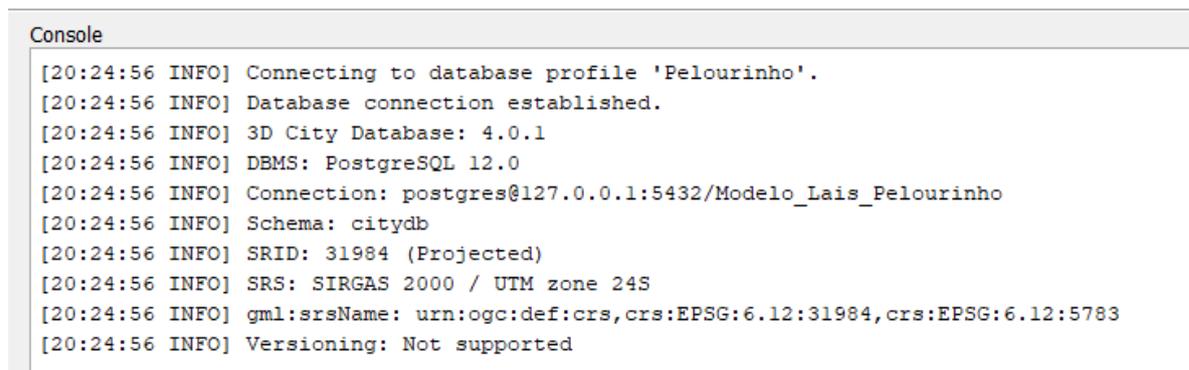
Após a inserção das informações solicitadas são criadas as tabelas, os esquemas, as funções e as sequências. Todo esse processo pode ser acompanhado pela janela de comando do sistema operacional, conforme mostra a Figura 51.



Fonte: capturada da janela de Prompt de Comando.

Em seguida, foi realizada a importação do arquivo CityGML do Pelourinho no banco de dados. Para isso, utilizou-se a ferramenta 3DCityDB. Como mostra a Figura 52, antes da importação do modelo é necessário realizar uma conexão com o banco de dados.

Figura 52 - Conexão realizada com o banco de dados



Fonte: elaboração da autora.

Quando um usuário do 3DCityDB pretende realizar a importação de um modelo geométrico e semântico no padrão CityGML para o banco de dados, sua primeira ação

no 3DCityDB deve ser a verificação da validade do arquivo XML do modelo que se pretende importar. Essa etapa é importante pois permite identificar erros antes de importar o modelo definitivamente para o banco de dados. Conforme mostra a Figura 53, o arquivo XML obtido para o modelo geométrico e semântico do Pelourinho foi considerado válido pelo 3DCityDB.

Figura 53 - Tela do 3DCityDB resultante da validação do arquivo XML do modelo do Pelourinho importado para o PostgreSQL/PostGIS

```

Console
[20:41:13 INFO] Initializing XML validation...
[20:41:13 INFO] Creating list of CityGML files to be validated...
[20:41:14 INFO] List of files to be validated successfully created.
[20:41:14 INFO] 1 file(s) will be validated.
[20:41:14 INFO] Validating file: D:\EXPERIMENTO_LAIS_PELOURINHO\EXPERIMENTO_LAIS_PELOURINHO.xml
[20:42:04 INFO] The CityGML file is valid.
[20:42:04 INFO] Total validation time: 50 s.
[20:42:04 INFO] XML validation finished.

```

Fonte: elaboração da autora.

O 3DCityDB analisa se os códigos que compõem o arquivo XML que se pretende importar para o banco de dados respeitam as regras de programação da linguagem XML. Após a verificação da validade do arquivo XML, a próxima etapa foi a realização da importação dos objetos para o banco de dados.

Sobre o processo de importação dos objetos, deve-se esclarecer que o 3DCityDB não verifica a validade do arquivo XML em relação à adequação semântica, geométrica ou consistência geométrico-topológica do modelo em CityGML. Assim sendo, para essas verificações são requeridas outras ferramentas adicionais, como *CityDoctor* ou *Val3dity* (YAO *et al.*, 2018).

Como detalhado previamente na seção 5.2.1.5, neste trabalho, foi utilizada a ferramenta gratuita *Val3dity*, a qual permitiu constatar que o arquivo XML obtido para o modelo geométrico e semântico do Pelourinho é válido em relação a geometria, semântica e consistência geométrico-topológica.

Durante o processo de importação do modelo geométrico e semântico em formato XML, as informações presentes no modelo são armazenadas de forma automática nas tabelas do PostgreSQL/PostGIS. Além da importação de dados, a interface do 3DCityDB com o usuário também permite a exportação de dados semânticos que tenham sido armazenados no PostgreSQL / PostGIS. Uma das

maneiras de exportar esses dados consiste em gerar planilhas com formato compatível com o Excel.

Assim sendo, além de permitir a exportação da geometria, o 3DCityDB Importer/Exporter também possibilita a exportação da semântica. Para essa finalidade, o usuário pode ‘filtrar’ os atributos, optando pelas informações que julgar necessário para a visualização. Após a seleção das informações desejadas é possível a exportação dos atributos nos formatos XLS ou CSV. Neste trabalho, os atributos foram exportados no formato XLS, como mostrado na Figura 54.

O uso do 3DCityDB também possibilitou a exportação do modelo do Pelourinho para a visualização 3D nos formatos KML, COLLADA e gITF. Isso permitiu a análise interativa do modelo geométrico e semântico no Google Earth e no 3DWebClient (3DCityDB-Web-Map-Client), baseado no Cesium.

Figura 54 - Parte das informações exportadas pela ferramenta 3DCityDB Importer/Exporter

GMLID	ADDRESS_ID	ADDRESS_STREET	ADDRESS_HOUSE	ADDRESS_ZIP_CODE	ADDRESS_CITY	ADDRESS	BUILDING_FUNCTION	BUILDING_USAGE
2	125	Rua Joao de Deus	18	-	Salvador	Bahia	Brasil	Orgao Publico
3	59	Rua Alfredo de Brito	28	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
4	205	Rua Alfredo de Brito	16	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
5	127	Rua Joao de Deus	20	40026-250	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
6	48	Rua Alfredo de Brito	18	-	Salvador	Bahia	Brasil	Vazio
7	51	Largo do Pelourinho	-	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil	Residencial
8	10	Largo do Pelourinho	4	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
9	161	Largo do Pelourinho	20	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
10	30	Rua Alfredo de Brito	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
11	72	Largo do Pelourinho	-	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
12	114	Rua Maciel de Baixo	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
13	95	Rua Maciel de Baixo	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
14	28	Nome da rua nao identificado	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Institucional
15	43	Rua Frei Vicente	20	40026-240	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
16	61	Rua Frei Vicente	-	40026-030	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
17	224	Rua Maciel de Baixo	28	40026-240	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
18	90	Rua Leovigildo de Carvalho	3	40026-070	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
19	79	Rua Frei Vicente	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Residencial
20	244	Largo do Pelourinho	-	40026-280	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
21	182	Rua Alfredo de Brito	2	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
22	204	Rua Alfredo de Brito	24	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
23	68	Rua Alfredo de Brito	14	40026-290	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
24	227	Rua Alfredo de Brito	6	40026-290	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
25	148	Rua Alfredo de Brito	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Misto
26	3	Rua das Laranjeiras	3	-	Salvador	Bahia	Brasil	Residencial
27	199	Rua Maciel de Baixo	-	-	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
28	203	Praca Ramos de Queiros	-	40026-055	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial
29	70	Rua das Laranjeiras	8; 10	-	Salvador	Bahia	Brasil	Comercial

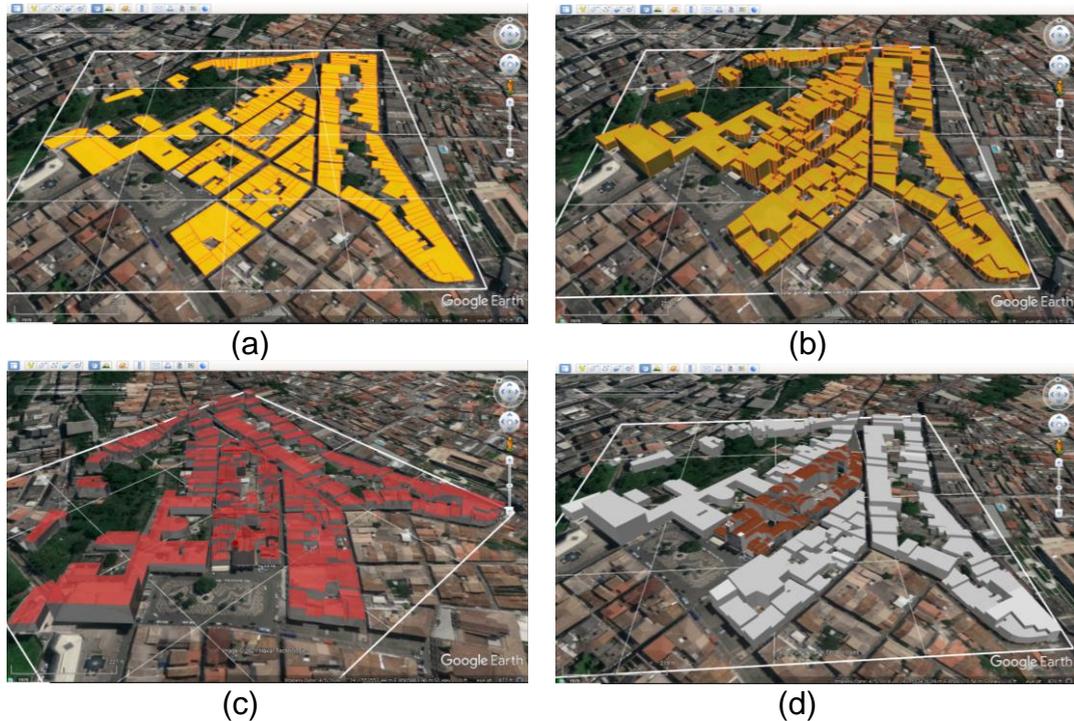
Fonte: elaboração da autora.

5.2.2.3 Visualização

Com a proposição e a implementação do *framework* apresentado foi possível construir um modelo geométrico e semântico. O modelo foi visualizado no Google Earth e no 3DCityDB-Web-Map-Client.

Como mostra a Figura 55, o 3DCityDB possibilita exportar os modelos de quatro maneiras distintas para visualização no Google Earth: *Footprint*, *Extruded*, *Geometry* e *Collada/gITF*.

Figura 55 - Formas distintas de exportação do 3DCityDB e visualização no Google Earth



Fonte: elaboração da autora.

Os arquivos exportados como *Footprint* (Figura 55 (a)) possibilitam a visualização da pegada das edificações no solo. Essa opção é compatível com o LOD0 do CityGML.

A opção de exportação do arquivo como *Extruded* (Figura 55 (b)), permite a visualização das edificações, no entanto, compatível com o LOD1 do CityGML. O modelo exportado como *Geometry* (Figura 55 (c)) possibilita que os objetos sejam representados com geometria totalmente detalhadas em relação ao seu nível de detalhe, que pode ser LOD1, LOD2, LOD3 ou LOD4. Essa opção pode mostrar explicitamente as diferentes superfícies temáticas (paredes, telhado, entre outros) em

coloração configurada pelo usuário do 3DCityDB, no entanto, texturas não são suportadas.

Por fim, na visualização como *Collada/gITF* (Figura 55 (d)) é possível a visualização da geometria detalhada dos modelos em LOD1, LOD2, LOD3 ou LOD4 nos formatos COLLADA e gITF, que incluem o suporte para texturas.

Além da visualização no Google Earth, o modelo também pode ser apresentado em aplicativos como ESRI ArcGIS Explorer e Cesium WebGL Virtual Globe. O ESRI ArcGIS Explorer é totalmente integrado com o ArcGIS, e pode ser utilizado em Android, iOS e Windows para proporcionar o acesso a mapas digitais, tendo a vantagem de funcionar em qualquer lugar, inclusive em ambientes sem acesso à internet.

Por sua vez, Cesium WebGL Virtual Globe é um globo virtual de código aberto desenvolvido pela Analytical Graphics Inc. (AGI). Ele utiliza HTML5⁸⁸ e a Web Graphics Library⁸⁹ (WebGL) para representação e visualização 3D de dados espaciais.

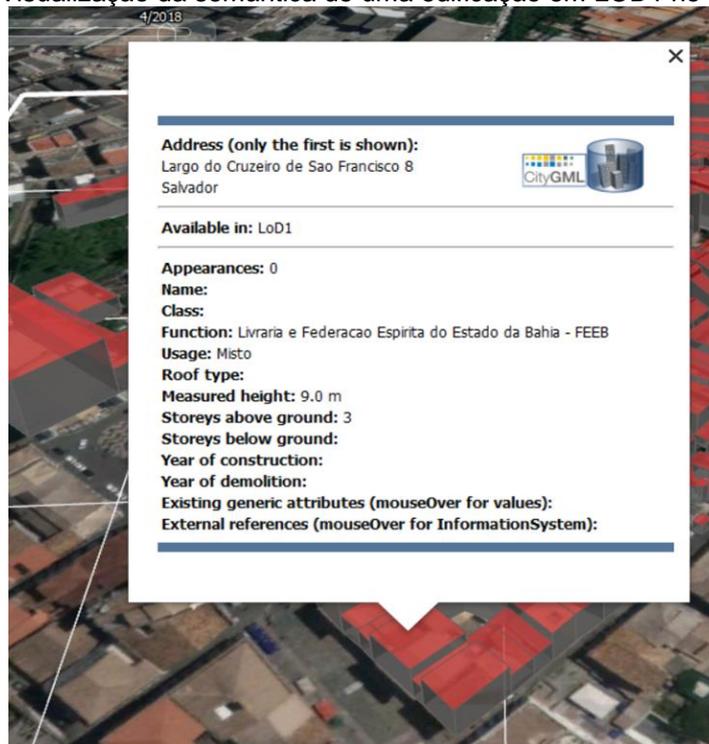
Além da visualização da geometria, o Google Earth também permitiu a visualização da semântica das edificações. As Figuras 56 e 57 exemplificam que a cada edificação selecionada no modelo, surge um *pop-up* com a semântica inserida no banco de dados para a construção.

Na Figura 55 é apresentado um *pop-up* para uma edificação de nove metros (três pavimentos) representada em LOD1, localizada no Largo do Cruzeiro de São Francisco. É possível identificar no *pop-up* que a edificação possui uso misto.

⁸⁸ Linguagem usada para estruturar e apresentar conteúdo na *web*.

⁸⁹ Ferramenta de interface de programação de aplicativos para a construção de representações 3D em um navegador da *web*. Útil para desenvolvedores evitarem o uso de *plugins*.

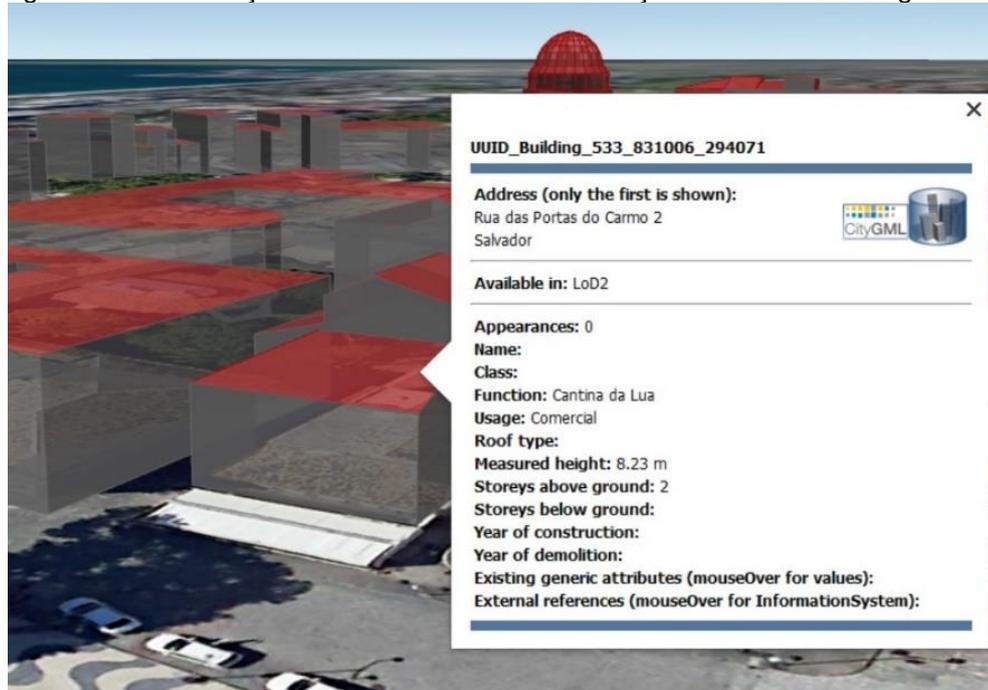
Figura 56 - Visualização da semântica de uma edificação em LOD1 no Google Earth



Fonte: elaboração da autora.

A Figura 57 mostra o *pop-up* para uma edificação em LOD2 de 8,23 metros (dois pavimentos), localizada na Rua das Portas do Carmo. É possível identificar no *pop-up* que a edificação possui uso comercial.

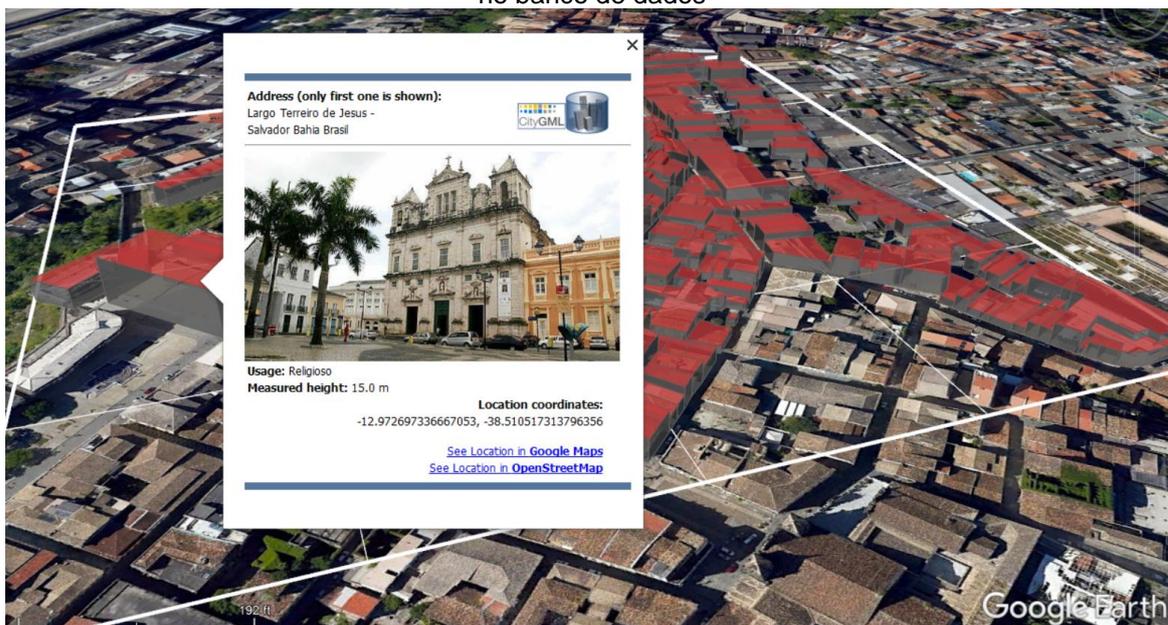
Figura 57 - Visualização da semântica de uma edificação em LOD2 no Google Earth



Fonte: elaboração da autora.

Por sua vez, a Figura 58 mostra um edifício de uso religioso localizado no Largo Terreiro de Jesus. Além do endereço, o *pop-up* apresenta as coordenadas geográficas da área de estudo e a imagem da edificação correspondente. Deve-se ressaltar que, nesta pesquisa, foram inseridas no banco de dados apenas as imagens das edificações de uso religioso.

Figura 58 - Visualização no Google Earth da semântica de uma construção com imagem armazenada no banco de dados



Fonte: elaboração da autora.

Além do Google Earth, uma outra alternativa para a visualização na *web* é o 3DCityDB-Web-Map-Client, que faz parte do pacote do 3DCityDB. A visualização do modelo nessa ferramenta requer necessariamente a utilização do *software* Node.JS⁹⁰. A Figura 59 mostra o servidor local conectado.

Figura 59 - Configuração do servidor *web* local

```

C:\> Prompt de Comando - node server.js
Microsoft Windows [versão 10.0.17763.1039]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\laiss>cd C:\Users\laiss\OneDrive\Área de Trabalho\Visualização\Extrair\3dcitydb-web-map-1.6.0
C:\Users\laiss\OneDrive\Área de Trabalho\Visualização\Extrair\3dcitydb-web-map-1.6.0>node server.js
Cesium development server running publicly. Connect to localhost:8000/
  
```

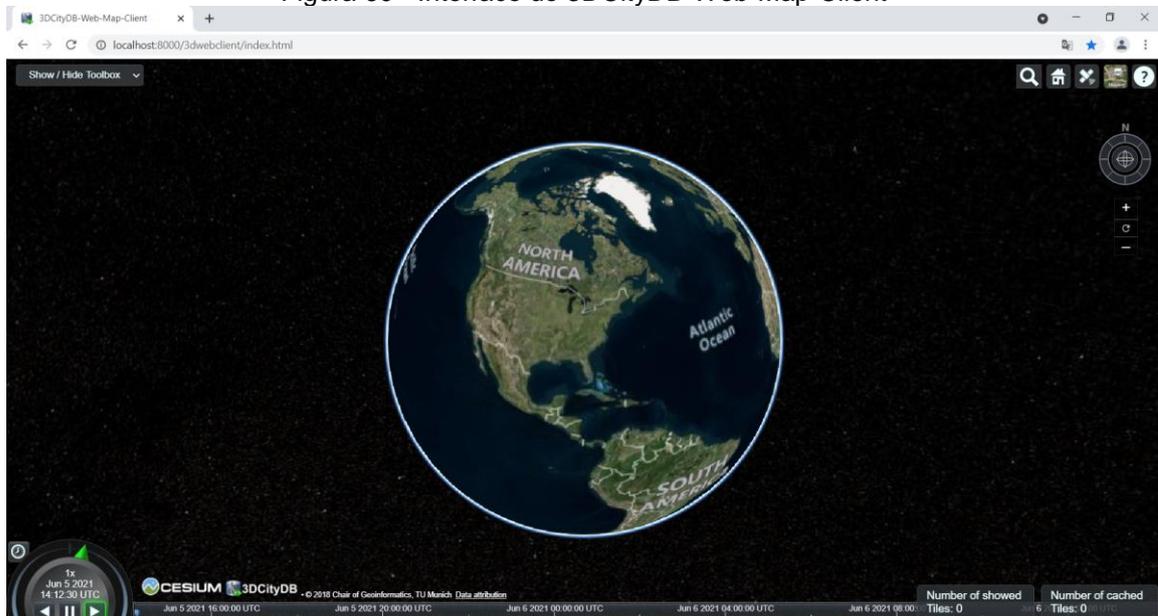
Fonte: adequado do Node.JS.

⁹⁰ Node.js é um ambiente de código aberto para execução de código JavaScript fora de um navegador da *web*.

Após a conexão do servidor local foi utilizado o *link* <http://localhost:8000/3dwebclient/index.html>, para que fosse possível a visualização do modelo a partir de um navegador da *web*. Nesta pesquisa, foi empregado o navegador Google Chrome.

O *link* supracitado só irá funcionar adequadamente caso o usuário tenha instalado em sua máquina o *software* 3DCityDB-Web-Map-Client, juntamente com o Node.JS, e todas as outras ferramentas necessárias para o funcionamento dele, as quais já foram apresentadas no Capítulo 4. O uso do 3DCityDB possibilita a exportação do modelo para a visualização na interface apresentada na Figura 60.

Figura 60 - Interface do 3DCityDB-Web-Map-Client

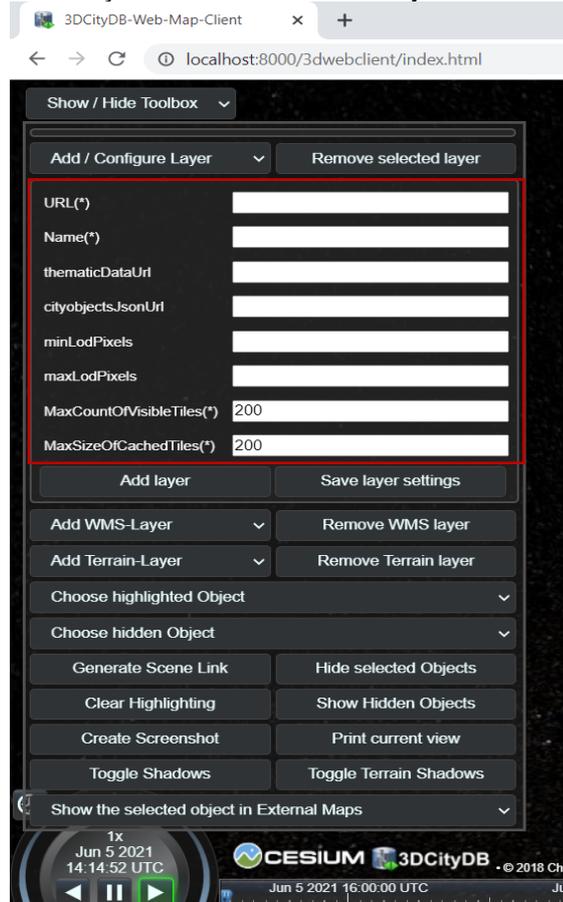


Fonte: capturado do 3DCityDB-Web-Map-Client.

Caso o usuário deseje, pode utilizar o 3DCityDB-Web-Map-Client para visualização interativa do modelo. Neste contexto, a visualização interativa diz respeito especialmente à possibilidade do usuário ativar ou desativar a visualização de algumas camadas de objetos no Cesium. Para que isso seja possível, os objetos que fazem parte do modelo precisarão ser exportados e distribuídos por meio do 3DCityDB Importer/Exporter em blocos diferentes. Cada bloco estará em um arquivo JSON diferente e será uma camada distinta do modelo. Para a visualização de cada uma das camadas no 3DCityDB-Web-Map-Client é importante preencher os seguintes

dados apresentados na Figura 61: URL⁹¹, Name⁹², thematicDataUrl⁹³, cityobjectsJsonUrl⁹⁴, minLODPixels e maxLODPixels⁹⁵. Essas informações devem ser preenchidas corretamente para que uma camada possa ser adicionada e o modelo visualizado.

Figura 61 – Adição de camadas no 3DCityDB-Web-Map-Client



Fonte: capturado do 3DCityDB-Web-Map-Client.

⁹¹ Local para adicionar o *link* do arquivo JSON que contém as informações da camada de dados (3DCityDB, 2020).

⁹² Espaço para que seja atribuído um nome à camada. Esse nome ficará visível para o usuário no topo do painel de entrada após a camada de dados ser carregada adequadamente (3DCityDB, 2020).

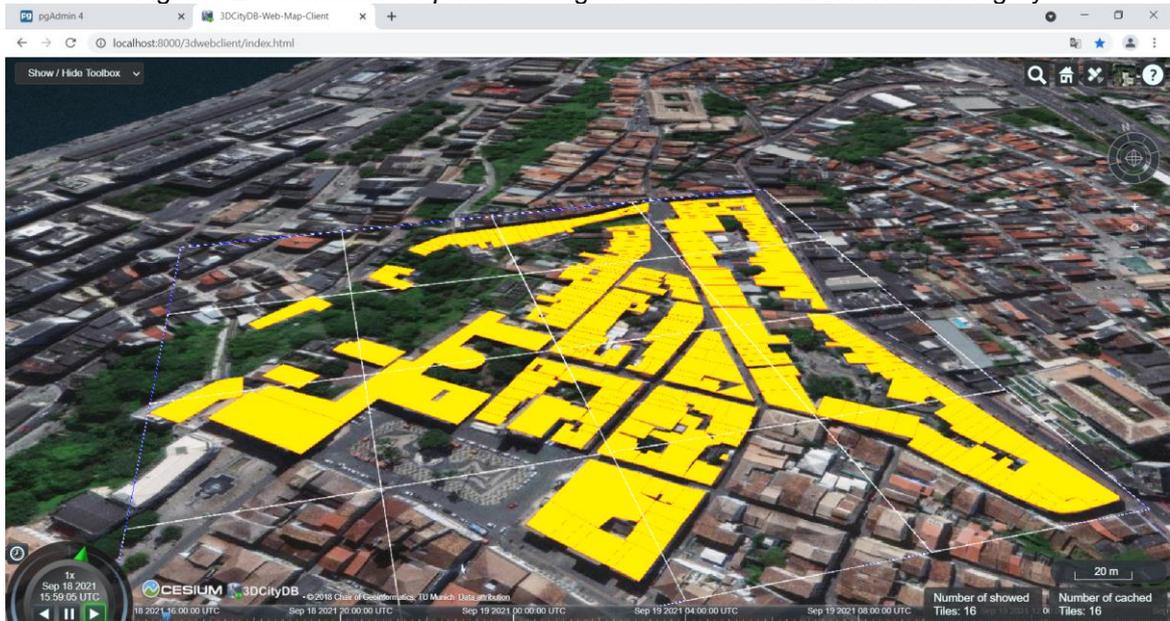
⁹³ Local para adicionar a URL de uma planilha *online* que armazene dados temáticos do modelo. A adição desta URL é opcional (3DCityDB, 2020).

⁹⁴ Espaço para adicionar a URL de um arquivo JSON, o qual é gerado automaticamente através do Exportador KML, COLLADA e glTF do 3DCityDB. O arquivo JSON possui uma lista de códigos identificadores (GMLID) dos objetos 3D exportados (3DCityDB, 2020).

⁹⁵ minLODPixels e maxLODPixels servem para definir o limite mínimo e máximo da faixa de visibilidade da camada de dados. São úteis para controlar o carregamento dinâmico dos blocos de dados. Os valores desses parâmetros podem ser manualmente especificados pelo usuário ou obtidos a partir do arquivo JSON, o qual contém os valores de antes da exportação do KML, COLLADA e glTF (3DCityDB, 2020).

Nesta pesquisa, para o modelo do Pelourinho, as Figuras 62, 63, 64 e 65 mostram as camadas *Footprint*, *Extruded*, *Geometry* e Collada visualizadas no 3DCityDB-Web-Map-Client. A Figura 61 mostra a opção de visualização do modelo *Footprint* utilizando como fundo a imagem de satélite do ESRI World Imagery.

Figura 62 - Camada *Footprint* na imagem de satélite do ESRI World Imagery

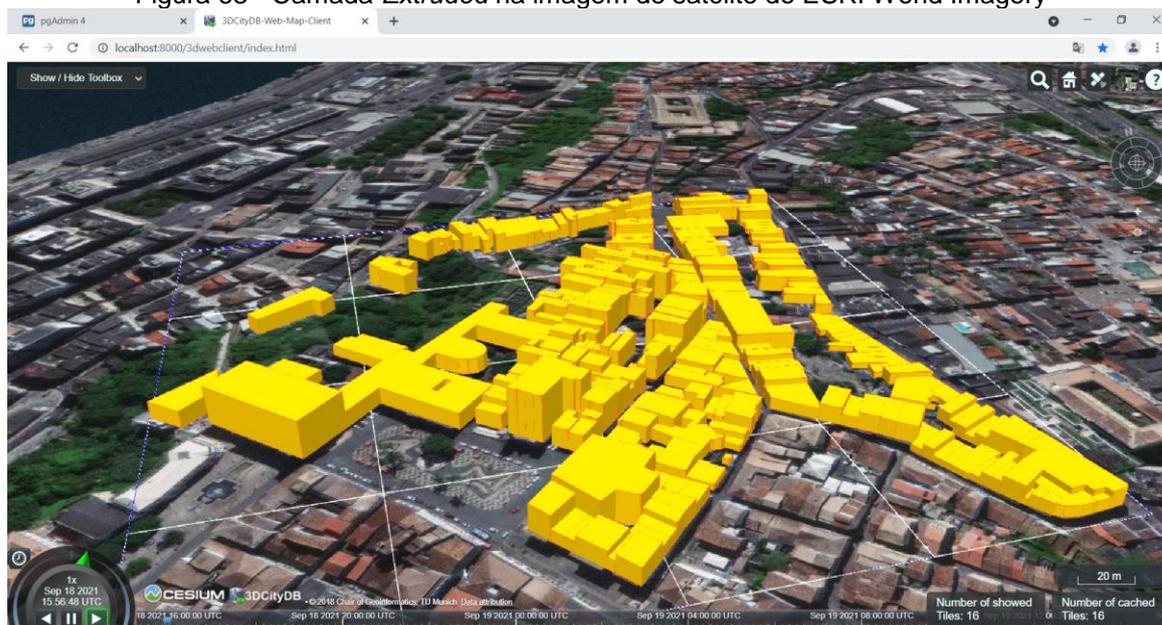


Fonte: elaboração da autora.

Na Figura 63, o modelo *Extruded* é visualizado utilizando como fundo a imagem de satélite do ESRI World Imagery⁹⁶.

⁹⁶ ESRI World Imagery fornece imagens de satélite e aéreas com resolução de aproximadamente um metro para muitas partes do mundo. Imagens de satélite de baixa resolução estão disponíveis para qualquer parte do mundo.

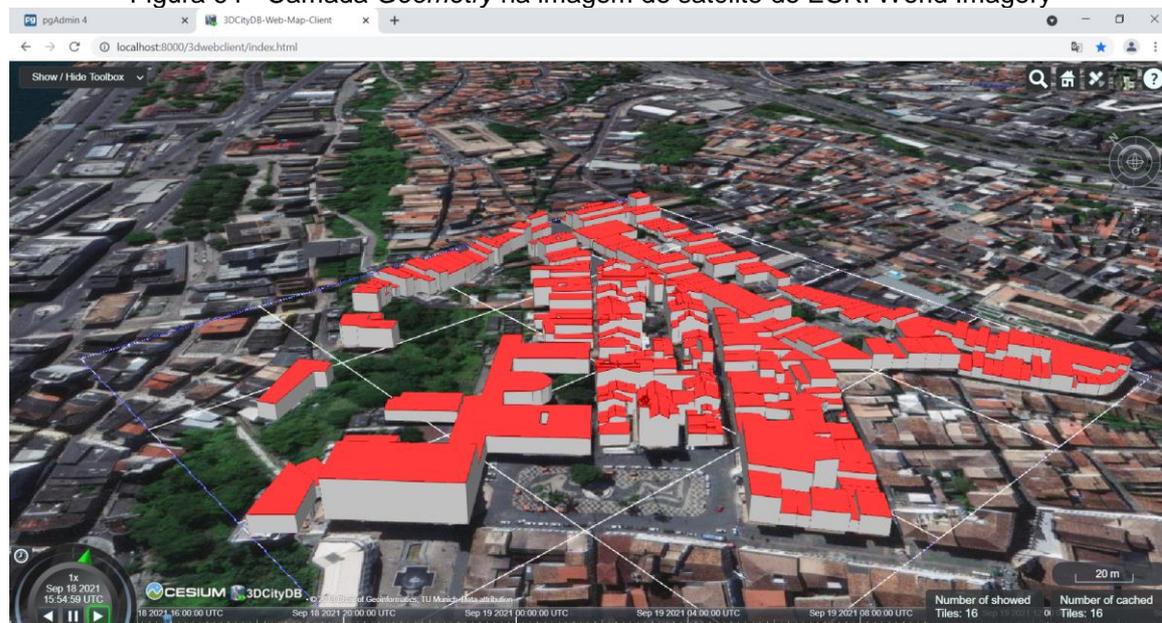
Figura 63 - Camada *Extruded* na imagem de satélite do ESRI World Imagery



Fonte: elaboração da autora.

Como mostrado anteriormente, o 3DCityDB-Web-Map-Client possibilita a visualização de diferentes camadas. Sendo assim, conforme é mostrado na Figura 64, também foi possível a visualização do modelo *Geometry* utilizando a imagem de fundo do ESRI World Imagery.

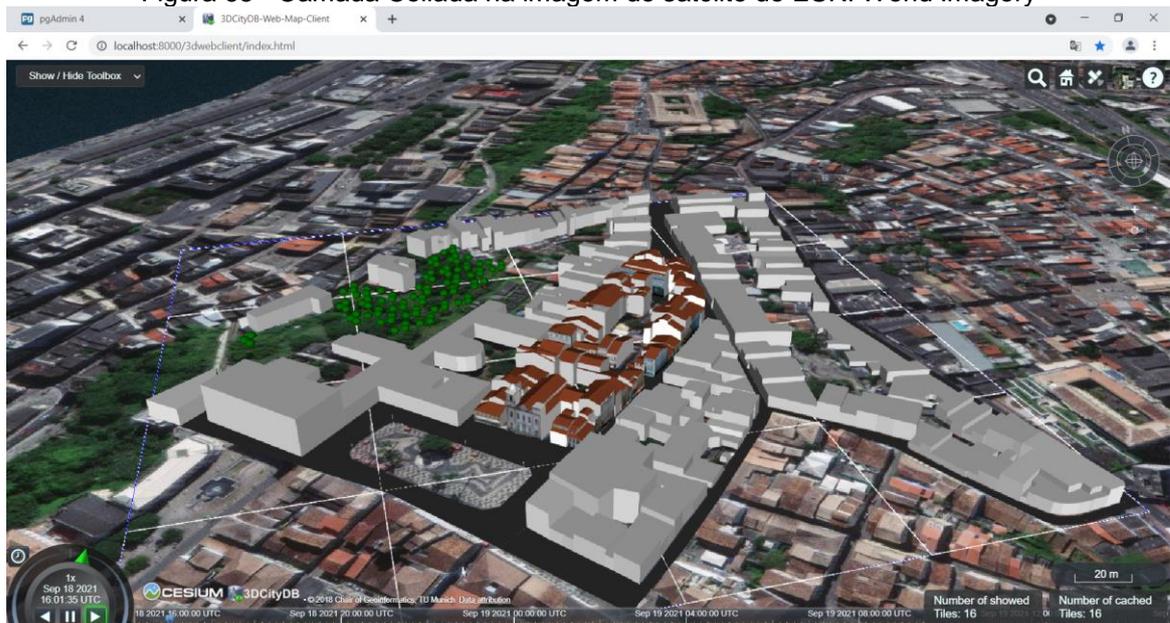
Figura 64 - Camada *Geometry* na imagem de satélite do ESRI World Imagery



Fonte: elaboração da autora.

Na Figura 65 o modelo Collada é visualizado utilizando como fundo a imagem de satélite do ESRI World Imagery.

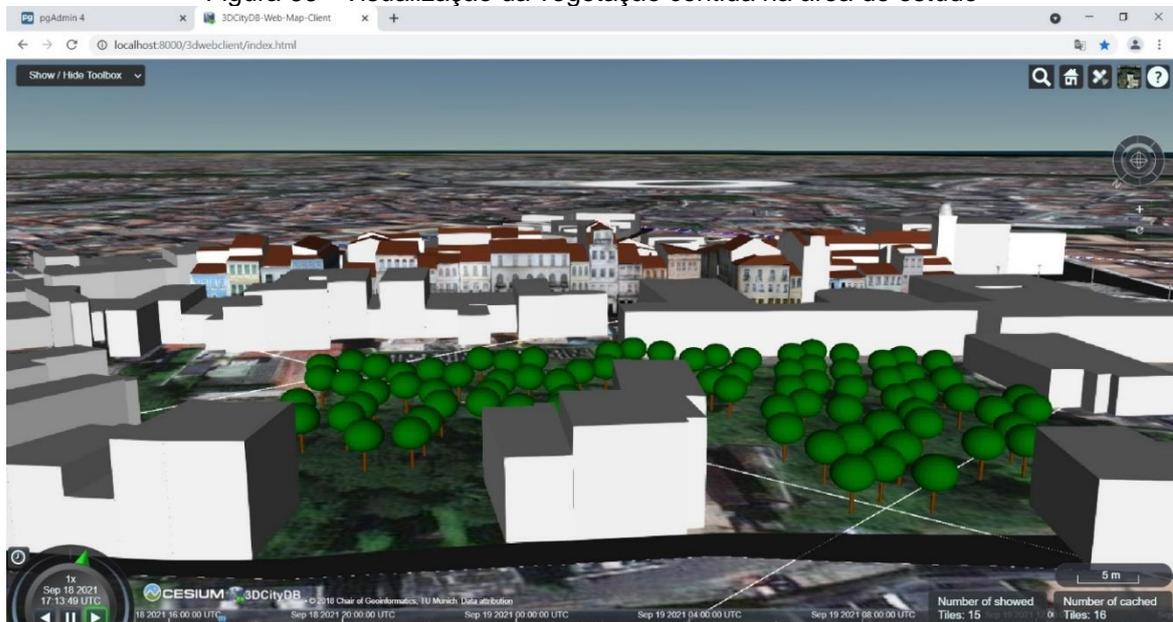
Figura 65 - Camada Collada na imagem de satélite do ESRI World Imagery



Fonte: elaboração da autora.

A Figura 66 mostra a visualização no 3DCityDB-Web-Map-Client da vegetação adicionada ao modelo do Pelourinho.

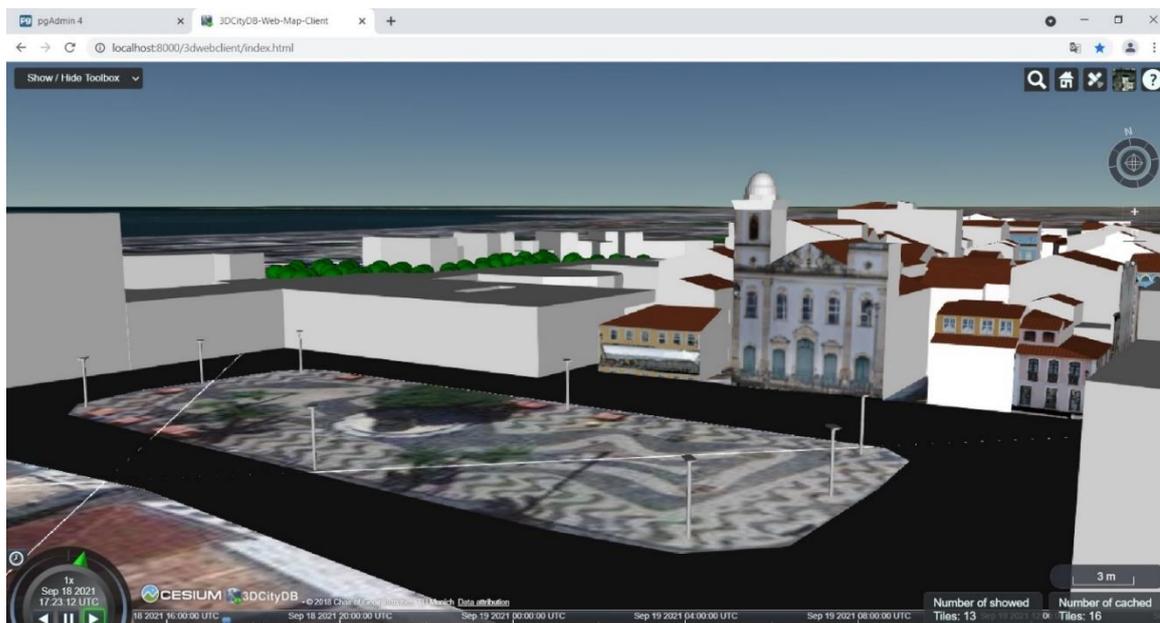
Figura 66 - Visualização da vegetação contida na área de estudo



Fonte: elaboração da autora.

Na Figura 67, podem ser observados no 3DCityDB-Web-Map-Client, parte das vias e postes de iluminação pública adicionados ao modelo da área de estudo.

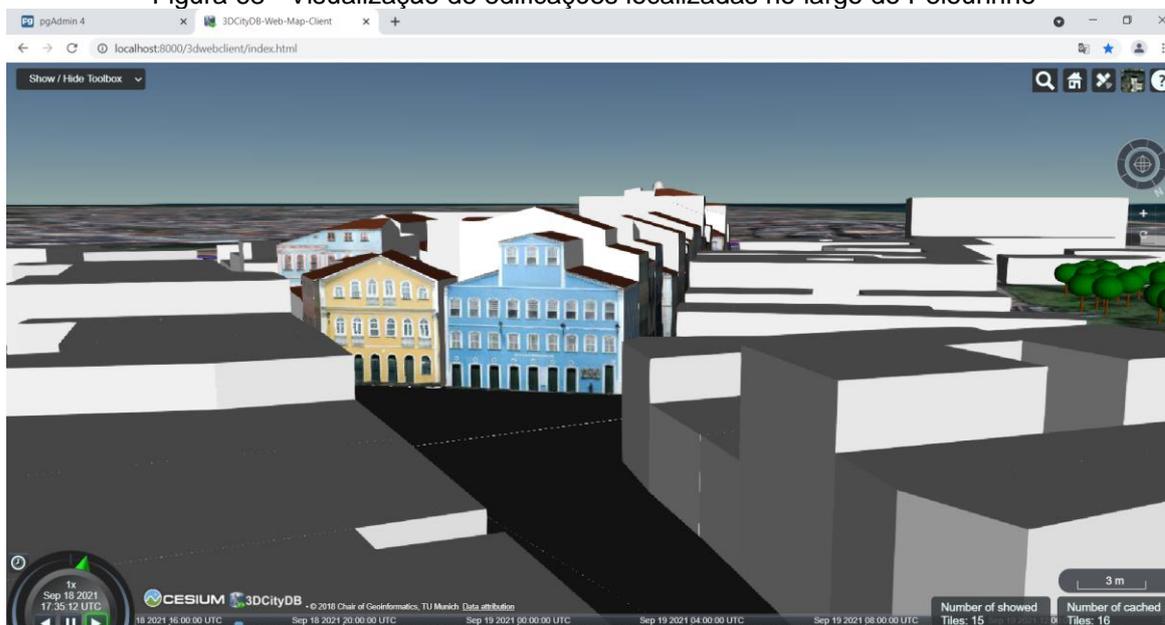
Figura 67 - Visualização dos postes de iluminação e das vias contidos na área de estudo



Fonte: elaboração da autora.

A Figura 68 apresenta a visualização no 3DCityDB-Web-Map-Client de algumas edificações localizadas no Largo do Pelourinho. As edificações estão em LOD2 e texturizadas.

Figura 68 - Visualização de edificações localizadas no largo do Pelourinho



Fonte: elaboração da autora.

5.3 DISCUSSÃO

Esta seção foi elaborada com o objetivo de apresentar a avaliação do *framework* proposto. A avaliação foi realizada através dos critérios indicados por March e Smith (1995), que são a operacionalidade, a generalidade e a facilidade de uso.

5.3.1 Operacionalidade

Sobre a operacionalidade, o funcionamento do artefato atendeu às necessidades. Não foram encontradas falhas comprometedoras durante o uso. Assim sendo, é possível afirmar que o *framework* contempla as etapas necessárias para a construção de um modelo numérico 3D de cidade, baseado no padrão CityGML.

O artefato funcionou para a construção de edificações em LOD1 e LOD2. Muitos modelos numéricos 3D de cidades são construídos até o nível de detalhe 2 (LOD2), os quais englobam as edificações representadas como bloco prismático, ou com a cobertura mais generalizada, sem beiral.

Isso acontece porque modelos em LOD3 e LOD4 requerem maior riqueza de detalhes, tais como, aberturas, portas, janelas e mobiliário. São modelos mais complexos que demandam alta carga de trabalho manual para a modelagem, e normalmente, requerem o uso de várias ferramentas digitais para a obtenção de dados (DONKERS *et al.*, 2016). Além disso, os modelos em LOD3 e LOD4 são muito mais ‘pesados’, o que por sua vez implica na necessidade de utilização de *hardware* mais robusto.

5.3.2 Generalidade

Em relação à generalidade, é questionável o uso do artefato na construção de modelos numéricos 3D de cidades para áreas urbanas extensas. Essa limitação pode ser justificada pelos trabalhos manuais realizados na demonstração de uso do *framework*.

Em razão da semântica ter sido adicionada ao banco de dados manualmente, essa etapa foi muito trabalhosa. Um primeiro motivo que justifica isso, foi a obtenção da semântica por meio de inspeção visual das edificações da área de estudo, através

do Google Maps para conseguir informações tais como código postal, número, ano (quando identificado na fachada), função etc. Para as 248 edificações foram adicionadas manualmente 1500 informações ao banco de dados PostgreSQL/PostGIS. Apesar disso, o banco de dados possibilita a realização de consultas cadastrais.

O uso do GEORES na construção de modelos numéricos 3D de cidades requer trabalho manual na identificação de cada parte do modelo de acordo com os módulos do CityGML. Em razão disso, o uso deste *plugin* é inviável quando se trabalha com grandes áreas urbanas. Desse modo, o uso do GEORES compromete a generalidade do *framework* proposto. Além disso, a transformação no GEORES vai ficando mais lenta quando a quantidade de elementos e/ou módulos a serem convertidos para CityGML aumenta.

A utilização do GEORES é parcialmente intuitiva, uma vez que apesar de ser fácil compreender sua dinâmica de funcionamento em relação à identificação dos módulos dos objetos contidos no modelo, é complexo converter o arquivo no formato SKP para CityGML sem um manual que explique o processo de exportação de dados. O *plugin* está em alemão e não foi encontrado manual gratuito disponível. Após várias buscas pela internet apenas alguns *websites* com orientações genéricas foram identificados.

O GEORES também se mostrou limitado por poder ser utilizado apenas na versão 2019 do SketchUp. Embora isso limite o uso do *plugin*, deve-se observar que seu código fonte é aberto. Isso possibilita que os usuários da ferramenta façam atualizações colaborativas visando, por exemplo, o atendimento das novas versões do CityGML.

Nesta pesquisa, foi observado que apesar do GEORES ter o módulo “*Relief*”, o modelo digital do terreno convertido para CityGML não foi válido e, portanto, não pôde ser armazenado no banco de dados por meio do pacote de *software* 3DCityDB.

O *plugin* declara a topografia semanticamente, mas não atribui a ela uma declaração geométrica, conforme observado no Val3dity (seção 5.2.1.5). Apesar dessa constatação, não é possível afirmar com certeza que o GEORES não é capaz de converter corretamente o modelo digital do terreno, uma vez que não foi encontrado um manual sobre o seu uso.

O modelo do Pelourinho não foi implementado para o público na *web* em razão disso requerer custos de hospedagem e conhecimentos avançados em programação. Assim sendo, a visualização dos dados ocorreu localmente por meio do navegador Google Chrome.

5.3.3 Facilidade de uso

Sobre a facilidade de uso, o *framework* possui uma sequência de etapas que foram ordenadas de modo claro, e a sua utilização foi detalhada ao longo deste Capítulo 5. No entanto, por se tratar de um artefato novo, uma avaliação mais profunda deste critério poderá ser realizada em trabalhos futuros, quando forem coletadas informações sobre as percepções de outros usuários do *framework*. Isso possibilitará o aperfeiçoamento do artefato, trazendo melhorias no âmbito da modelagem numérica 3D de cidades baseada no padrão CityGML.

O artefato proposto foi testado para um contexto real, uma vez que foi aplicado à construção de um modelo para o Pelourinho, no entanto, dada a complexidade das tarefas envolvidas na aprendizagem de uma série de ferramentas diferentes, não foi possível avaliar sua adoção por outros usuários, dada a limitação de tempo para o encerramento deste estudo.

Uma facilidade de uso do *framework* proposto diz respeito ao GEORES, pois nesta ferramenta gratuita não é necessário que o usuário programe para transformar o modelo para CityGML. O *plugin* mostra-se mais adequado para profissionais que não possuem ou não estão interessados em adquirir conhecimentos específicos de programação. Ter conhecimentos sobre programação é indispensável quando o FME⁹⁷ é utilizado.

O FME não é disponibilizado gratuitamente para uso comercial. Além disso, a conversão de arquivos no FME exige tempo e o teste de diferentes transformadores⁹⁸ para processar todos os dados e convertê-los para o formato CityGML (FLOROS;

⁹⁷ O FME pode ser utilizado para a conversão, integração, validação e conversão de dados de diferentes tipos, tais como de 3D, realidade aumentada, Big Data, sensores, *Building Information Modeling* (BIM), *Computer Aided Design* (CAD), *Geographic Information System* (GIS), *Light Detection and Ranging* (LiDAR), imagens de satélite, serviços Web, *Not Only Structured Query Language* (NoSQL), *raster* e imagens (FME, 2019).

⁹⁸ Um transformador é um objeto do FME Workbench que realiza a transformação de recursos. Existem muitos transformadores no FME, cada um realiza uma operação diferente (FME, 2019).

DIMOPOULOU, 2016). A escolha e a conexão dos operadores não é uma tarefa simples; e é por este motivo que os trabalhos que costumam utilizar essa ferramenta são de profissionais com uma base sólida de programação, como por exemplo, engenheiros da computação ou de geomática.

Apesar do uso do FME ser mais complexo devido a programação requerida, alguns códigos são disponibilizados na *web*. No entanto, nem sempre é possível encontrar um *script* que atenda perfeitamente à necessidade do interessado. Desse modo, será preciso adaptar o esquema de transformação encontrado e, para isso, serão demandados conhecimentos mais profundos sobre o *software*.

Ao dispensar a necessidade de programação para obter o formato padrão, o GEORES facilita a construção de modelos CityGML por profissionais que geralmente não são familiarizados com programação, como por exemplo, arquitetos, urbanistas e geógrafos, que normalmente participam do planejamento das cidades.

Uma outra alternativa que permite converter modelos para CityGML é o CityEditor⁹⁹, que apesar de já ter sido gratuito, atualmente só pode ser encontrado na versão comercial. Pelas pesquisas realizadas foi observado que esta ferramenta funciona de modo bem parecido com o GEORES. No entanto, possui um manual (em inglês) disponível que torna possível explorar todas as suas funcionalidades com instruções dos desenvolvedores.

O uso do OSM também confere facilidade de aplicação do artefato apresentado. A vantagem no uso do OSM é que o mapeamento pode ser colaborativo, o que é fundamental quando se trata de grandes áreas. Apesar disso, há um problema em relação à confiabilidade dos dados, a qual precisa ser verificada quando se utilizam informações adicionadas por outros usuários.

Quando o PostgreSQL/PostGIS foi utilizado, conforme mostrado na seção 5.2.2.1, ficou facilitado o uso do modelo na realização de consultas para recuperação de informações.

Nesta pesquisa, para verificar a validade do modelo CityGML foi empregada a versão do Val3dity que opera *online*. Esta ferramenta facilita a verificação dos

⁹⁹ Informações mais detalhadas sobre este *plugin* para SketchUp podem ser encontradas em: <https://www.3dis.de/cityeditor/>.

arquivos, pois não demanda a instalação do Val3dity no computador, apesar de existir essa possibilidade.

Além disso, o Val3dity faz a verificação da validade geométrica e semântica das edificações de acordo com a norma internacional ISO 19107. Isso é indispensável, uma vez que modelos inválidos não podem ser utilizados para várias aplicações. Caso seja detectado algum erro, é possível identificar e corrigir antes de importar os objetos para o banco de dados (FLOROS; PISPIDIKIS; DIMOPOULOU, 2017).

No Quadro 5 é apresentada uma síntese dos principais aspectos levantados ao longo do processo de avaliação do modelo geométrico e semântico do Pelourinho.

Quadro 5 - Listagem das vantagens e limitações do *framework*

Vantagens	Limitações
- OSM é aberto e colaborativo.	- Mapeamento manual da área de interesse no OSM. Não é possível exportar dados de grandes áreas no OSM.
- CADMAPPER possibilitou obter o volume das edificações sobre o modelo digital do terreno.	- CADMAPPER exporta gratuitamente modelos de cidades com área de até 1 km ² apenas.
- O uso do SketchUp possibilitou a preparação do modelo para a conversão.	- Identificação manual dos módulos dos objetos presentes no modelo. Além disso, o SketchUp não é uma ferramenta gratuita.
- O GEORES permitiu a conversão de edificações, vias, árvores e mobiliário urbano para o padrão CityGML.	- A conversão realizada no GEORES não possibilitou obter um modelo digital do terreno válido.
- O GEORES é um <i>plugin</i> gratuito e parcialmente intuitivo.	- O <i>plugin</i> está em alemão e não possui manual disponível gratuitamente. Além disso, funciona apenas na versão do SketchUp 2019.
- PostgreSQL/PostGIS é uma ferramenta gratuita e possibilitou o armazenamento do modelo, a inserção de informações e a realização de consultas.	- Foram registradas aproximadamente 1500 informações manualmente no banco de dados.
- O Val3dity é gratuito e possibilitou a validação do modelo numérico 3D construído.	- A versão <i>online</i> do Val3dity é limitada. Não suportou a validação de diferentes módulos em um único arquivo, sendo necessário realizar a validação por módulos/etapas.
- Construção de um modelo geométrico e semântico com edificações em LOD1 e LOD2.	- Por limitação do <i>framework</i> , as edificações representadas em LOD1 não foram texturizadas.
- O 3DCityDB possibilitou importar e exportar dados (CityGML, KML/COLLADA) e planilhas.	- A utilização do pacote de <i>software</i> do 3DCityDB demanda a utilização de um conjunto de ferramentas (Google Earth, PostgreSQL/PostGIS, Node.js).
- 3DCityDB Importer/Exporter, Google Earth, 3DCityDB-Web-Map-Client, PostgreSQL/PostGIS e Val3dity são gratuitos.	
- O modelo CityGML é adequado para troca e armazenamento.	
- Modelo adequado para visualização no Google Earth com atributos e no 3DCityDB-Web-Map-Client através do navegador Google Chrome.	

Fonte: elaboração da autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento bibliográfico realizado ao longo desta pesquisa permitiu a identificação de diferentes questões que ainda precisam ser respondidas em relação à modelagem da informação da cidade.

Foi possível observar que há conceituações distintas para o CIM na literatura. Desse modo, a pesquisa foi direcionada inicialmente para a revisão de conceitos existentes e a apresentação da concepção de modelagem da informação da cidade que norteou este trabalho.

Além de responder no contexto desta pesquisa “o que é o CIM?”, foram abordados alguns problemas científicos de ordem prática. O primeiro deles diz respeito à geração de modelos geométricos e semânticos, que pode ocorrer com o uso de diferentes ferramentas e formatos de arquivos, ocasionando dificuldades relacionadas, por exemplo, à troca e compartilhamento de dados.

Tendo em vista esses desafios, foi considerada a necessidade de construir modelos geométricos e semânticos de cidades em um formato padrão. O formato padrão adotado para a parte experimental desta pesquisa foi o CityGML, o qual tem sido empregado na geração de vários modelos numéricos 3D de cidades, que estão disponibilizados na *web*.

Apesar de estar ficando cada vez mais difundido, o uso desse padrão é acompanhado do surgimento de questões relacionadas:

- à qualidade dos dados usados na construção dos modelos;
- ao estabelecimento de *frameworks* que reúnam ferramentas mais fáceis de usar e de baixo custo;
- à geração de modelos válidos, e
- ao uso de mais módulos do CityGML, além do módulo *Building*.

Todos os problemas elencados acima foram considerados nesta pesquisa.

6.1 CONCLUSÕES

O *Design Science Research* foi escolhido como método de realização deste estudo. Em razão disso, foram utilizadas suas principais etapas, as quais são a identificação do problema, a definição dos objetivos para a solução, a construção do artefato, a demonstração do uso, a avaliação e a comunicação. A etapa de avaliação foi conduzida considerando-se a operacionalidade, a facilidade de utilização e a generalidade do *framework*.

A partir dos problemas científicos escolhidos para o desenvolvimento desta pesquisa foram dadas algumas contribuições à modelagem da informação da cidade. A primeira contribuição diz respeito à proposição de uma conceituação para o CIM. O conceito elaborado e apresentado levou em consideração que:

- O CIM surge de uma analogia com o BIM;
- Os atributos do paradigma CIM devem ser explicitados na conceituação (Colaboração, confiabilidade, interoperabilidade e fácil compartilhamento);
- O estabelecimento de um formato padrão é indispensável na modelagem da informação da cidade. Neste estudo, acredita-se que este padrão deva ser o CityGML.

Durante a fase de revisão bibliográfica foi possível perceber que há poucos trabalhos dedicados à construção de modelos geométricos e semânticos de áreas urbanas brasileiras.

Isso ocorre certamente porque a construção de modelos numéricos 3D de cidades em CityGML apresenta elevada complexidade em diferentes etapas, tais como aquisição, processamento, modelagem geométrica, conversões de formatos de arquivos e verificação da qualidade dos dados, entre outros.

Foram encontradas para o Brasil, duas pesquisas deste tipo (MAIERON, 2021; SILVA *et al.*, 2020), de modo que o modelo do Pelourinho, construído neste trabalho, é o primeiro em formato CityGML que engloba um bairro com edificações de valor histórico com a textura.

Esta pesquisa se diferenciou dos trabalhos de Silva *et al.* (2020) e de Maieron (2021) em virtude do estudo da utilização do *plugin* GEORES na geração do modelo numérico 3D de cidade em CityGML.

Em razão da existência de poucos trabalhos sobre a geração de modelos geométricos e semânticos no país, esta pesquisa também contribui ao apresentar de forma sistematizada conhecimentos sobre formatos padrões, 3DCityDB e aplicações de modelos numéricos 3D de cidades em formato CityGML.

Assim sendo, o levantamento bibliográfico contido nos Capítulos 2, 3 e 4 contribuem para a divulgação das ferramentas e métodos de construção de modelos numéricos 3D de cidades em CityGML, servindo para auxiliar pesquisadores e profissionais ligados à indústria AECO.

Alguns formatos padrões foram comparados no Capítulo 4, de modo que pôde-se observar que o CityGML se destaca por dar suporte a geometria, semântica, topologia, aparência, escalabilidade, níveis diferentes de detalhes, coordenadas geográficas e aplicações.

A construção do modelo do Pelourinho também contribui por ter sido realizada com um novo *framework*. Apesar do OpenStreetMap e do SketchUp já serem bastante conhecidos, esta pesquisa se destaca pelo uso do GEORES na transformação dos dados no formato SKP para o formato CityGML.

O GEORES, tal como o CityEditor, é um *plugin* para SketchUp, no entanto, tem a vantagem de ser aberto e livre. Apesar dessas características vantajosas, a ferramenta não possui um manual gratuito para auxiliar o usuário.

Esta pesquisa também contribui ao considerar no modelo diferentes módulos do CityGML, uma vez que na maioria dos trabalhos encontrados está contido apenas o módulo de *Building*.

O modelo do Pelourinho contém edificações, árvores, vias e postes de iluminação pública, os quais pertencem aos módulos *Building*, *Vegetation*, *Transportation* e *CityFurniture*, do padrão CityGML.

O *framework* mostrou-se limitado em relação à geração do modelo digital do terreno da área de estudo em CityGML, e dificuldades encontradas durante o uso do GEORES. Apesar disto ter parecido uma limitação do *plugin*, não é possível fazer tal

afirmação com certeza porque não foi encontrado um manual que esclarecesse o uso da ferramenta.

O modelo em CityGML do Pelourinho tem a vantagem de ter sido validado em relação a geometria e semântica de acordo com a norma ISO19107. Isso pode ser destacado como algo vantajoso, uma vez que de acordo com Maieron (2021), muitos modelos de cidades disponibilizados na *web* não são válidos.

O modelo do Pelourinho, construído a partir da combinação de edificações em LOD1 e LOD2, tem a vantagem de poder ser utilizado em diferentes aplicações em razão de ter sido gerado em CityGML. São listadas abaixo algumas possibilidades de aplicações para modelos construídos neste formato (ÁLVAREZ *et al.*, 2018; BILJECKI *et al.*, 2015):

- Gestão e previsão de desastres;
- Planejamento do espaço urbano;
- Simulações para análises e previsões relacionadas a inundações, incidência solar, incêndios, entre outros;
- Uso em realidade virtual aumentada;
- Simulações de eficiência energética;
- Acompanhamento da propagação de ruídos, poluição atmosférica;
- Utilização em turismo;
- Construção de maquetes utilizando impressão em 3D;
- Visualização para comunicar informações ao cidadão;
- Estudo da propagação de ondas de rádio; e
- Aplicações em fluidodinâmica computacional.

Por fim, destaca-se que os fornecedores de *software* têm expandido cada vez mais as opções de ferramentas para a construção de modelos numéricos 3D de cidades. Como exemplos, podem ser citados o InfraWorks (da Autodesk), o InRoads (da Bentley), o CityEngine (da Esri) e o Revit (da Autodesk).

Para fornecerem resultados adequados, os programas mencionados precisam ser constantemente analisados, avaliados e aprimorados. A adoção pelos usuários, principalmente descobrindo as suas vantagens e limitações, é um dos aspectos chave para o sucesso no desenvolvimento de ferramentas cada vez melhores para a geração de modelos urbanos.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O artefato desenvolvido nesta pesquisa possibilitou a construção de um modelo numérico 3D de cidade com base no padrão CityGML, no entanto, através de sua adoção por parte de outros usuários, ele poderá ser aprimorado.

Para trabalhos futuros, sugere-se aos pesquisadores:

- O desenvolvimento de ferramentas gratuitas ou de baixo custo para a conversão de modelos para o formato CityGML. Para que sejam mais efetivas, estas tecnologias devem automatizar o processo de colocação dos objetos em seus respectivos módulos, viabilizando a geração de modelos para grandes áreas;
- A ampliação da área de estudo e o emprego de inteligência artificial para prever as alturas das novas edificações que forem adicionadas ao modelo;
- A proposição de *frameworks* que reúnam somente ferramentas gratuitas;
- O estudo da geração de modelos numéricos válidos para a topografia;
- O enriquecimento do modelo com a representação de sistemas subterrâneas (redes de água, esgoto, drenagem pluvial, gás, energia etc.);
- O desenvolvimento de simulações para estimativas de potencial solar, sombras projetadas, incêndios, consumo energético, propagação de ruídos, entre outros;
- A utilização do modelo em sistemas de realidade virtual e aumentada.

REFERÊNCIAS

ABAYOWA, B. O.; YILMAZ, A.; HARDIE, R. C. Automatic registration of optical aerial imagery to a LiDAR point cloud for generation of city models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 106, p. 68-81, 2015.

ADITYA, T.; LAKSONO, D. LOD 1: 3D CityModel for Implementing SmartCity Concept. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY*, 2017. **Proceedings** [...]. United States: Association for Computing Machinery, 2017. p. 136-141.

AECbytes. About AECbytes. 2021. Disponível em: <http://www.aecbytes.com/info/about.html>. Acesso em: 10 jan. 2021.

AGISOFT. Disponível em: <https://www.agisoft.com/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

AGUGIARO, G. *et al.* The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 3, n. 1, p. 2, 2018.

AGUGIARO, G.; HAUER, S.; NADLER, F. Coupling of CityGML-based semantic city models with energy simulation tools: some experiences. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN PLANNING, REGIONAL DEVELOPMENT AND INFORMATION SOCIETY*, 2015, Belgium. **Proceedings** [...]. Belgium: Ghent, 2015. p. 191-200.

AGUGIARO, G. First step towards an integrated CityGML-based 3D model of Vienna. *In: ISPRS CONGRESS*, 23., 2016, Prague, Czech Republic. **Proceedings** [...]. Prague: Czech, 2016, v. III-4, p. 139-146.

ALEXANDER, C.; SMITH-VOYSEY, S.; JARVIS, C.; TANSEY, K. Integrating building footprints and LiDAR elevation data to classify roof structures and visualize buildings. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 33, n. 4, p. 285-292, 2009.

ALMEIDA, F.; ANDRADE, M. L. V. X. D. **A integração entre BIM e GIS como ferramenta de gestão urbana**. *In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO*, 7., 2015, Recife. **Anais** [...]. Recife: ANTAC, 2015. Disponível em: <https://goo.gl/QBjn6r>. Acesso em: 15 maio 2016.

ALMEIDA, F. A. S.; ANDRADE, XAVIER, M. L. V. Considerações sobre o conceito de City Information Modeling. **InSitu**, v. 4, n. 1, p. 21-38, 2018.

ALMEIDA, F. A. S. **Modelando a informação da cidade: do estado da arte à construção de um conceito de City Information Modeling (CIM)**. 2018. 109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

- 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: 5 out. 2021.
- AMIREBRAHIMI, S.; RAJABIFARD, A.; MENDIS, P.; NGO, T. A framework for a microscale flood damage assessment and visualization for a building using BIM–GIS integration. **International Journal of Digital Earth**, v. 9, n. 4, p. 363-386, 2016.
- AMORIM, A. L. Cidades Inteligentes e City Information Modeling. *In*: CONGRESS OF THE IBEROAMERICAN SOCIETY OF DIGITAL GRAPHICS, 20., 2016, Buenos Aires. **Proceedings** [...]. São Paulo: Blucher, 2016.
- AMORIM, A. L. Discutindo city information modeling (CIM) e conceitos correlatos. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 10, n. 2, p. 87-100, 2015.
- AMORIM, A. L. Methodological aspects of architectural documentation. **Geoinformatics FCE CTU**, v. 6, p. 34-39, 2011.
- ANDERSON, J. D.; WENDT, J. **Computational fluid dynamics**. New York: McGraw-Hill, 1995.
- ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C. Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC. **Gestão & tecnologia de projetos**, v. 4, n. 2, p. 76-111, 2009.
- ARCGIS CITYENGINE. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-cityengine/overview>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- AUTODESK. Infracore. Disponível em: <http://www.autodesk.com>. Acesso: 8 set. 2021.
- BALSA-BARREIRO, J.; FRITSCH, D. Generation of visually aesthetic and detailed 3D models of historical cities by using laser scanning and digital photogrammetry. **Digital applications in archaeology and cultural heritage**, v. 8, p. 57-64, 2018.
- BATTY, M.; DODGE, M.; JIANG, B.; SMITH, A. **GIS and urban design**. CASA UCL, London, 1998.
- BATTY, M. Fifty Years of Urban Modeling: Macro-Statics to Micro-Dynamics. *In*: ALBEVERIO, S.; ANDREY, D.; GIORDANO, P., VANCHERI, A. (org.). **The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach**. Switzerland: Physica-Verlag, 2008. p. 1-20.
- BEIRÃO, J. N.; MONTENEGRO, N.; DUARTE, J. P. **Public Space Patterns: Towards a CIM standard for urban public space**. *In*: CONFERENCE ON EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 29., 2011, Ljubljana. **Proceedings** [...]. Ljubljana: eCAADe, 2011. Disponível em: <https://goo.gl/dY9ard>. Acesso em: 22 mar. 2020.

BENTLEY. **Usar nuvens de pontos**. 2021. Disponível em: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/MicroStation%20Help-v14/pt-br/GUID-582AA987-BF1C-F527-52C9-24CB41B2AA0F.html>. Acesso em: 8 jan. 2021.

BERLIN3D. Berlin 3D – Downloadportal. Disponível em: <https://www.businesslocationcenter.de/berlin3d-downloadportal/?lang=en#/export>. Acesso em: 2 fev. 2021.

BERNASOCCHI, Marco; CÖLTEKIN, Arzu; GRUBER, Stephan. An open source geovisual analytics toolbox for multivariate spatio-temporal data for environmental change modeling. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 2, n. 2, p. 123-128, 2012.

BERTOCCI, S.; ARRIGHETTI, A.; BIGONGIARI, M. Digital survey for the archaeological analysis and the enhancement of Gropina archaeological site. **Heritage**, v. 2, n. 1, p. 848-857, 2019.

BILJECKI, F.; LEDOUX, H.; STOTER, J. Generating 3D city models without elevation data. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 64, p. 1-18, 2017.

BILJECKI, Filip; LEDOUX, Hugo; STOTER, Jantien. An improved LOD specification for 3D building models. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 59, p. 25-37, 2016.

BILJECKI, F.; STOTER, J.; LEDOUX, H.; ZLATANOVA, S.; CÖLTEKIN, A. Applications of 3D city models: State of the art review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 4, p. 2842-2889, 2015.

BILJECKI, F.; HEUVELINK, G. B.; LEDOUX, H.; STOTER, J. Propagation of positional error in 3D GIS: estimation of the solar irradiation of building roofs. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 29, n. 12, p. 2269-2294, 2015.

BLENDER. Blender 2.93.4 LTS. Disponível em: <https://www.blender.org/>. Acesso em: 8 set. 2021.

BOGDAHN, J.; COORS, V. Towards an automated healing of 3D urban models. *In: INTERNATIONAL 3D GEOINFO CONFERENCE, 5., 2010, Berlin. Proceedings [...].* Berlin: ISPR, 2010. p. 13-17.

BONFIM, J. D.; SILVA, P. R. G. O caso do parque histórico do Pelourinho: investigação de originalidade numa ação do governo local. **Sitientibus**, n. 13, p. 15-33, 1995.

BROCKE, J. V.; HEVNER, A.; MAEDCHE, A. Introduction to Design Science Research. *In: VOM BROCKE, J.; HEVNER, A.; MAEDCHE, A. Design Science Research. Cases.* Switzerland: Springer, 2020. p. 1-13.

BUILDINGRECONSTRUCTION: CityGML builder. Virtual City Systems. Berlin. 2020. Disponível em: <https://vc.systems/en/products/building-reconstruction/>. Acesso em: 14 dez. 2021.

BuildingSMART. **IFC Introduction**. 2018. Disponível em: <https://www.buildingsmart.org/about/what-is-openbim/ifc-introduction/>. Acesso em: 13 jan. 2020.

BÜYÜKDEMİRCİOĞLU, M. **Implementation and web-based visualization of 3D city models**. 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Engenharia Geomática) - Universidade de Hacettepe, Ancara. 2018.

CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. 282 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

CANTZLER, H. **Improving Architectural 3D Reconstruction by Constrained Modelling**. 2003. 165 f. Thesis (PhD in Philosophy) - University of Edinburgh, Edinburgh, 2003.

CARDOSO, B. M.; SILVA, A. A.; SANTOS, A. H.; SILVA, L. A.; FRADE, P. R. Avaliação da precisão dos equipamentos GNSS, verificando a discrepância das coordenadas, utilizando a carta controle. **Revista brasileira de Geomática**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 120-140, abr./jun. 2021.

CASTRO, L. N.; FERRARI, D. G. **Introdução à mineração de dados: conceitos básicos, algoritmos e aplicações**. São Paulo: Saraiva, 2016.

CATITA, C.; REDWEIK, P.; PEREIRA, J.; BRITO, M. C. Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. **Computers & Geosciences**, v. 66, p. 1-12, 2014.

CHATURVEDI, K.; YAO, Z.; KOLBE, T. H. Integrated management and visualization of static and dynamic properties of 3D City Models. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART DATA AND SMART CITIES, 4., 2019, Kuala Lumpur. **Proceedings** [...]. Kuala Lumpur: ISPR, 2019.

CHEN, K.; LU, W.; XUE, F.; TANG, P.; LI, L. H. Automatic building information model reconstruction in high-density urban areas: Augmenting multi-source data with architectural knowledge. **Automation in Construction**, v. 93, p. 22-34, 2018.

CITYEDITOR. **3Dis**. 2021. Disponível em: <https://www.3dis.de/cityeditor/>. Acesso em: 6 set. 2021.

CityGML. **What is CityGML?** 2020. Disponível em: <https://www.citygml.org/>. Acesso em: 12 jan. 2020.

CityGML. City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard Version 2.0.0. 2012. Disponível em: <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>. Acesso em: 15 nov. 2020.

City of Mississauga. Standards for Shadow Studies. Disponível em: <https://www.mississauga.ca>. Acesso em: 10 dez. 2020.

COLMAP. Disponível em: <https://colmap.github.io/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

CONSTRUCTIBLE. **Next in BIM: City Information Modeling (CIM)**. Disponível em: <https://constructible.trimble.com/construction-industry/next-in-bim-city-information-modeling-cim>. Acesso em: 3 jan. 2020.

COHEN-STEINER, David; ALLIEZ, Pierre; DESBRUN, Mathieu. Variational shape approximation. **Hal Open Science**, v. 70632, n. 5371, p. 1-29, 2004.

COORS, Volker. 3D-GIS in networking environments. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 4, p. 345-357, 2003.

COORS, V.; HOLWEG, D.; MATTHIAS, E.; PETZOLD, B. **3D-Stadtmodelle**. 2013. Disponível em: <https://www.ingeforum.de/3d-stadtmodelle/>. Acesso em: 7 jun. 2021.

DANTAS, H. S.; SOUSA, J. M. M. S.; MELO, H. C. The Importance of City Information Modeling (CIM) for Cities' Sustainability. *In*: SBE19 BRUSSELS BAMB-CIRCPATH, 1., 2019, Bruxelas. **Proceedings** [...]. Bruxelas: IOP Publishing, 2019.

DAVE, B.; SCHMITT, G. Information systems for urban analysis and design development. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 21, n. 1, p. 83-96, 1994.

3DCityDB. **The CityGML Database**. Disponível em: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>. Acesso em: 1 jun. 2020.

3D Geoinformation. Cities/regions around the world with open datasets [EB/OL]. 2021. Disponível em: <https://3d.bk.tudelft.nl/opendata/>. Acesso em: 10 jan. 2021.

DEN HAAG. Voorstel van Het College Inzake Beleid Dakopbouwen (RIS 180461). Disponível em: <http://www.denhaag.nl/home.htm>. Acesso em: 20 dez. 2020.

DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS. Simular. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/simular/>. Acesso em: 2 jul. 2020.

DONKERS, S. *et al.* Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. **Transactions in GIS**, v. 20, n. 4, 2015, p. 547-569.

DSILVA, M. G. **A feasibility study on CityGML for cadastral purposes**. 2009. 58 f. Master's Thesis (Master in Mathematics and Computer Science) - Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009.

DUARTE, J. P.; GIL, J.; BEIRÃO, J. N.; MONTENEGRO, N. Assessing computational tools for urban design: Towards a "City Information Model". *In*: FUTURE CITIES CONFERENCE, 28., 2010, Zurich. **Proceedings** [...]. Zurich: eCAAD, 2010. Disponível em: <https://goo.gl/NxwW1Y>. Acesso em: 25 mar. 2019.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook: a Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

EASTMAN, C. **Building Product Models: computer environments supporting design and construction**. Boca Raton: CRC Press, 1999. 411 p.

- EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- EICKER, Ursula *et al.* Energy performance assessment in urban planning competitions. **Applied Energy**, v. 155, p. 323-333, 2015.
- ECHENIQUE, M. Modelos: una discusión. LESLIE, M. *In: La estructura del espacio urbano*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975, p. 235-248.
- FAN, H.; MENG, L.; JAHNKE, M. Generalization of 3D Buildings Modelled by CityGML. *In: SESTER, M.; BERNARD, L.; PAELKE, V. (org.). Advances in GIScience*. Heidelberg: Springer, 2009, p. 387-405.
- FLOROS, G.; PISPIDIKIS, I.; DIMOPOULOU, E. Investigating integration capabilities between IFC and CityGML LOD3 for 3D city modelling. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 1, 2017.
- FME. **What is FME?** Disponível em: https://docs.safe.com/fme/html/FME_Desktop_Documentation/FME_Workbench/Workbench/What_is_FME.htm. Acesso em: 1 dez. 2019.
- FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena**. 2. ed. São Paulo: Visual Books, 2001.
- GARLAND, Michael; HECKBERT, Paul S. Surface simplification using quadric error metrics. *In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES*, 24., 1997, Berkeley. **Proceedings** [...]. Berkeley: SIGGRAPH, 1997. Disponível em: <https://people.eecs.berkeley.edu/~jrs/meshpapers/GarlandHeckbert2.pdf>. Acesso em: 13 out. 2020.
- GeoBIM benchmark. Amsterdam CityGML model LOD 1. Disponível em: <https://3d.bk.tudelft.nl/projects/geobim-benchmark/amsterdamgml.html#technical-details>. Acesso em: 10 mar. 2021.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. Atlas: São Paulo, 2002.
- GIL, J.; ALMEIDA, J.; DUARTE, J. The backbone of a City Information Model (CIM): Implementing a spatial data model for urban design. *In: COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE*, 29., 2011, Ljubljana. **Proceedings** [...]. Ljubljana: University of Ljubljana, 2011. p. 87-89.
- GIL, J.; BEIRÃO, J.; MONTENEGRO, N.; DUARTE, J. Assessing Computational Tools for Urban Design: towards a city information model. *In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE*, 28., 2010, Prague. **Proceedings** [...]. Prague, Czech Technical University in Prague / Faculty of Architecture, 2010.

GOETZ, M. Towards generating highly detailed 3D CityGML models from OpenStreetMap. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 27, n. 5, p. 845-865, 2013.

GRÖGER, G.; PLÜMER, L. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 71, p. 12-33, 2012.

GRÖGER, G. *et al.* **OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard**. 2012. Disponível em: <https://www.ogc.org/standards/citygml>. Acesso em: 20 jun. 2019.

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.; AMORIM, A. L. Modelagem geométrica de cidades a partir de nuvens de pontos. **Revista Brasileira de Expressão Gráfica**, v. 8, n. 1, p. 110-129, 2020.

HAAGENRUD, S.; HYVÄRINEN, J.; BELL, H.; BJØRKHAUG, L.; LIEBICH, T. **STANDINN Deliverable D15 IFC and IFD feasibility for innovative sustainable housing**. EUROPA INNOVA, 2007, 89 p. Disponível em: http://standards.euinnova.org/Files/Report/STANDINN_D15_IFC_and_IFD_feasibility_for_innovative_sustainable_housing.pdf. Acesso em: 16 set. 2020.

HÄMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J.; MATZARAKIS, A. Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 105, n. 3, p. 521-527, 2011.

HAMILTON, Andy *et al.* Urban information model for city planning. **Journal of Information Technology in Construction (ITCon)**, v. 10, n. 6, p. 55-67, 2005.

HE, B. *et al.* An efficient parallel computing method for the steady-state analysis of electric machines using the Woodbury formula. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 56, n. 2, p. 1-4, 2020.

HENN, A.; RÖMER, C.; GRÖGER, G.; PLÜMER, L. Automatic classification of building types in 3D city models. **Geoinformatica**, v. 16, n. 2, p. 281-306, 2012.

HISHAM, A. **The new trend of CIM**. *In*: Ahmad's Findings. Disponível em: <http://ahmadsfindings.blogspot.de/2010/05/new-trend-of-cim.html>. 2010. Acesso em: 15 abr. 2020.

HORNA, S. *et al.* Combining geometry, topology and semantics for generic building description and simulations. *In*: EUROGRAPHICS WORKSHOP ON URBAN DATA MODELLING AND VISUALISATION, 1., 2015. **Proceedings [...]**. The Eurographics Association, 2015. p. 13-18.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19107:2019**: Geographic information — Spatial schema. Geneva: International Standardization Organization, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19157:2013**: Geographic information — Data quality. Geneva: International Standardization Organization, 2013.

JANCOSEK, M.; PAJDLA, T. Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces. *In*: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE & URBAN DESIGN, 1., 2011, Colorado. **Proceedings** [...]. Colorado: IEEE, p. 3121-3128, 2011.

JESUS, H. P.; OLIVEIRA, H. C. **Análise comparativa de levantamentos planialtimétricos – Topografia Convencional, GPS e Drone**. 2018. 15 p. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

JOCHEM, A.; HÖFLE, B.; RUTZINGER, M.; PFEIFER, N. Automatic roof plane detection and analysis in airborne lidar point clouds for solar potential assessment. **Sensors**, v. 9, n. 7, p. 5241-5262, 2009.

JULIN, A.; JAALAMA, K.; VIRTANEN, J. P.; POUKE, M.; YLIPULLI, J.; VAAJA, M.; HYYPPÄ, H. Characterizing 3D city modeling projects: Towards a harmonized interoperable system. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 2, p. 55, 2018.

KHEMLANI, L. **City Information Modeling**. 2016. Disponível em: <http://www.aecbytes.com/feature/2016/CityInformationModeling.html>. Acesso em: 5 jan. 2020.

KHEMLANI, L. Hurricanes and their Aftermath: How Can Technology Help? AECbytes. 2005. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20111008085537/http://aecbytes.com/buildingthefuture/2005/HurricaneTechHelp.html>. Acesso em: 20 fev. 2020.

KNAPITSCH, A.; PARK, J.; ZHOU, Q-Y.; KOLTUN, V. Tanks and temples: Benchmarking large-scale scene reconstruction. **ACM Transactions on Graphics**, v. 36, n. 78, p. 1-13, 2017.

KNOWLES, R. L. The solar envelope: its meaning for energy and buildings. **Energy and buildings**, v. 35, p. 15-25, 2003.

KOLBE, T. H.; BURGER, B.; CANTZLER, B. CityGML goes to Broadway. *In*: PHOTOGRAMMETRIC WEEK, 15., 2015, Stuttgart. **Proceedings** [...] Stuttgart: University of Stuttgart, 2015.

KOLBE, T. H. **3D City Database for CityGML: A Hands-on Tutorial for Beginners**. 2018. Disponível em: https://www.3dcitydb.de/3dcitydb/fileadmin/TUM_Workshop/RTG_Schulungskurs_2016.zip. Acesso em: 15 jan. 2020.

KOLBE, T. H. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. *In*: LEE, J.; ZLATANOVA, S. **3D Geo-Information Sciences: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**. Springer: Berlin, Heidelberg, 2009, p. 15-31.

KRAMER, H. J.; CRACKNELL, A. P. An overview of small satellites in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 15, p. 4285-4337, 2008.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans**. 2. ed. v. 1. New York: Walter de Gruyter, 2004.

LATIFFI, A. A.; MOHD, S.; KASIM, N.; FATHI, M. S. Building information modeling (BIM) application in Malaysian construction industry. **International Journal of Construction Engineering and Management**, v. 2, n. A, p. 1-6, 2013.

LAFARGE, Florent *et al.* Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 63, n. 3, p. 365-381, 2008.

LEDOUX, H. Val3dity: validation of 3D GIS primitives according to the international standards. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 3, n. 1, p. 1, 2018.

LEE, Gunhak. 3D coverage location modeling of Wi-Fi access point placement in indoor environment. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 54, p. 326-335, 2015.

LEOTTA, M. J. *et al.* Urban semantic 3D reconstruction from Multiview satellite imagery. *In*: CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION WORKSHOPS, 1., 2019, Long Beach. **Proceedings** [...]. Long Beach: IEEE, 2019.

LIANG, J.; GONG, J.; ZHOU, J.; IBRAHIM, A. N.; LI, M. An open-source 3D solar radiation model integrated with a 3D Geographic Information System. **Environmental Modelling & Software**, v. 64, p. 94-101, 2015.

LI, Y. *et al.* PCA based 3D City Model Generalization for Electricity Simulation. **Procedia Computer Science**, v. 122, p. 603-608, 2017.

LIMA, M. Q. C. Limites e possibilidades do City Information Modeling (CIM) em planejamento urbano. *In*: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, 4., 2016, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: Anparq, 2016.

LINDER, W. **Digital Photogrammetry: A Practical Course**. 4. ed. Berlin: Springer, 2006.

LØVSET, T.; ULVANG, D. M.; BEKKVIK, T. C.; VILLANGER, K.; VIOLA, I. Rule-based method for automatic scaffold assembly from 3D building models. **Computers & graphics**, v. 37, n. 4, p. 256-268, 2013.

LU, S.; WANG, F. **Computer aided design system based on 3D GIS for park design**. Computer, Intelligent Computing and Education Technology; CRC Press: London, UK, p. 413-416, 2014.

MAALEK, R.; LICHTI, D. Automated Calibration of Mobile Cameras for 3D Reconstruction of Mechanical Pipes. **The Photogrammetric Record**, v. 36, n. 174, p. 124-146, 2021.

MAGUIRE, D. J. **Improving CAD-GIS Interoperability**. ESRI: 2003. Disponível em: <https://www.esri.com/news/arcnews/winter0203articles/improving-cad.html>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MAIERON, M. A. **Integração de dados abertos na geração de modelos 3D baseados em CityGML**. 2021. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

MANZIONE, L. **Proposição de uma estrutura conceitual de gestão do processo de projeto colaborativo com o uso do BIM**. 2013. 343 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MAO, Bo; BAN, Yifang. Online visualization of 3D city model using CityGML and X3DOM. **Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization**, v. 46, n. 2, p. 109-114, 2011.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research in Information Technology. **Decision Support Systems**, v. 15, p. 251-266, 1995.

MATHWORKS. What's the meaning of "uncalibrated camera" and "calibrated camera". 2017. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/355058-what-s-the-meaning-of-uncalibrated-camera-and-calibrated-camera>. Acesso em: 5 out. 2021.

MIGNARD, Clement; NICOLLE, Christophe. Urban Information Modeling Combining BIM and GIS. *In*: KHOSROW-POUR, M. (org.). **Encyclopedia of Information Science and Technology**. United States of American: IGI Global, 2015. p. 3178-3185.

MOKROŠ, Martin *et al.* Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 104, p. 102512, 2021.

MORENO, A.; SEGURA, A.; ZLATANOVA, S.; POSADA, J.; GARCÍA-ALONSO, A. Benefit of the integration of semantic 3D models in a fire-fighting VR simulator. **Applied Geomatics**, v. 4, n. 3, p. 143-153, 2012.

MORO, J.; KRÜGER, E. L.; CAMBOIM, S. Shading analysis of urban squares using open-source software and free satellite imagery. **Applied Geomatics**, v. 12, p. 441-454, 2020.

MOSER, J.; ALBRECHT, F.; KOSAR, B. Beyond visualization – 3D GIS analyses for virtual city models. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, n. 4, p. 143-146, 2010.

MUÑOZ, D.; BECKERS, B.; BESUIEVSKY, G.; PATOW, G. Far-LOD: Level of detail for massive sky view factor calculations in large cities. *In*: EUROGRAPHICS

WORKSHOP ON URBAN DATA MODELLING AND VISUALISATION, 1., 2015, Delft. **Proceedings** [...]. Delft: The Eurographics Association, 2015.

NASCIMENTO, D. L. M. **Interoperabilidade entre sistemas de automação de projetos em tubulações industriais utilizando *Industry Foundation Classes (IFC)***. 2017. 122 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Montagem Industrial) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

NIBS. NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. National Building Information Modeling Standard. Version 1 – part 1. Overview, Principles and Methodologies. Whashington, 2007. 182 p. Disponível em: https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2011/06/nbimsv1_p1.pdf. Acesso em: 3 jan. 2020.

NOUVEL, R.; ZIRAK, M.; COORS, V.; EICKER, U. The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 64, p. 68-80, 2017.

OGC. Berlin 3D Portal provides CityGML data for 550,000 buildings. Disponível em: <https://www.ogc.org/blog/2196>. Acesso em: 20 jun. 2021.

OHORI, K. A. *et al.* **Modeling Cities and Landscapes in 3D with CityGML**. In: Borrman A., König M., Koch C., Beetz J. (eds) Building Information Modeling. Springer, Cham., 2018.

OHORI, K. A. *et al.* Modeling a 3D city model and its levels of detail as a true 4D model. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 3, p. 1055-1075, 2015.

ONIGA, E.; CHIRILĂ, C.; STĂTESCU, F. Accuracy assessment of a complex building 3D model reconstructed from images acquired with a low-cost UAS. In: 3D VIRTUAL RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF COMPLEX ARCHITECTURES, 1., 2017, Nafplio. **Proceedings** [...]. Nafplio: ISPR, 2017.

Organização das Nações Unidas (ONU). **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>. Acesso em: 8 dez. 2019.

OVER, M.; SCHILLING, A.; NEUBAUER, S.; ZIPF, A. Generating web-based 3D City Models from OpenStreetMap: The current situation in Germany. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, n. 6, p. 496-507, 2010.

PEREIRA, A. P. C. **Modelagem da informação da construção na fase de projeto: uma proposta de plano de execução BIM para a SUMAI / UFBA**. 2017. 332 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

PINHO, S. M. F. **O modelo IFC como agente de interoperabilidade: aplicação ao domínio das estruturas**. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2013.

PIX4D. Disponível em: <https://www.pix4d.com/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

PostgreSQL. **PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database**. 2020. Disponível em: <https://www.postgresql.org/>. Acesso em: 1 jun. 2020.

PRATIS, R. C. **Análise de componentes principais (PCA)**. Universidade Federal do ABC. 2010. Disponível em: <http://professor.ufabc.edu.br/~ronaldo.prati/DataMining/PCA.pdf>. Acesso em: 10 maio 2020.

PREKA, D.; DOULAMIS, A. 3D building modeling in LOD2 using the CityGML Standard. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE*, 11., 2016, Athens. **Proceedings** [...]. Athens: ISPR, 2016.

PRIETO, I.; IZKARA, J. L.; DEL HOYO, F. J. D. Efficient visualization of the geometric information of CityGML: application for the documentation of built heritage. *In: MURGANTE, B. et al. Computational Science and Its Applications: Lecture Notes in Computer Science*, v. 7333. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, p. 529-544.

PRIETO, Iñaki; IZKARA, Jose Luís; DELGADO, F. J. From point cloud to web 3D through CityGML. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA*, 18., 2012, Milão. **Proceedings** [...]. Milão: IEEE, 2012.

RAHAMAN, H.; CHAMPION, E. To 3D or not 3D: choosing a photogrammetry workflow for cultural heritage groups. **Heritage**, v. 2, n. 3, p. 1835-1851, 2019.

RAHAMAN, H. **Photogrammetry: What, How, and Where**. *In: Champion, E. M. Virtual Heritage: A Guide*. London: Ubiquity Press, p. 25–37, 2021.

RAHMAN, A. A. *et al.* 3D geospatial database schema for Istanbul 3D City Model. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMATICS AND GEOSPATIAL TECHNOLOGY*, 6., 2019, Kuala Lumpur. **Proceedings** [...]. Kuala Lumpur: ISPR, 2019.

RAU, Jiann-Yeou; CHENG, Chen-Kuang. A cost-effective strategy for multi-scale photo-realistic building modeling and web-based 3-D GIS applications in real estate. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 38, p. 35-44, 2013.

ROSS, L. **Virtual 3D City Models in Urban Land Management: Technologies and Applications**. 2010. 119 f. Thesis (PhD in Engineering) – Technical University of Berlin, Berlin, 2010.

RÜPPEL, Uwe; SCHATZ, Kristian. Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations. **Advanced engineering informatics**, v. 25, n. 4, p. 600-611, 2011.

SAEEDRASHED, Y. S.; BENIM, A. C. Validation Methods of Geometric 3D-CityGML Data for Urban Wind Simulations. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL HEAT, MASS AND MOMENTUM TRANSFER*, 21., 2019, Rome, Italy. **Proceedings** [...]. [S. l.]: EDP Sciences, 2019. 1-6 p. v. 128.

SÁ, J. P. M. **Modelação de estruturas em BIM: aplicação à extração automática de quantidades**. 2014. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2014.

SANTOS, D. L.; CAMBOIM, S. P.; PAIVA, C. A.; DELAZARI, L. S. Modelagem e Implementação de um Banco de Dados tridimensional baseado no padrão CityGML. *In: CONGRESSO DE CADASTRO MULTIFINALITÁRIO E GESTÃO TERRITORIAL*, 14., 2020, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: COBRAC, 2020.

SAS. **Deep learning**: o que é e qual sua importância? 2021. Disponível em: https://www.sas.com/pt_br/insights/analytics/deep-learning.html. Acesso em: 8 jan. 2021.

SCIANNA, A.; LA GUARDIA, M. Survey and photogrammetric restitution of monumental complexes: issues and solutions—the case of the Manfredonic castle of mussomeli. **Heritage**, v. 2, n. 1, p. 774-786, 2019.

SCIENCEDIRECT. **Discover more with ScienceDirect**. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 9 jan. 2020.

SCHNABEL, M. A.; ZHANG, Y.; AYDIN, S. Using parametric modelling in form-based code design for high-dense cities. **Procedia engineering**, v. 180, p. 1379-1387, 2017.

SCOPUS. **What is Scopus?** Disponível em: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>. Acesso em: 10 jan. 2020.

SERRA, G. **Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**: guia prático para o trabalho de pesquisadores em pós-graduação. São Paulo: EdUSP, 2006.

SHAN, J.; LI, Z.; ZHANG, W. Recent progress in large-scale 3D city modeling. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, v. 48, n. 12, p. 1523, 2019.

SHIODE, N. 3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. **GeoJournal**, v. 52, p. 263, 2000.

SILVA, J. F.; SILVA, R. K. A.; SANTOS, M. O.; LOPES, M. G. P.; BARROS, I. O.; MOREIRA, E. B. M.; FERREIRA, H. S. Análise conceitual do Building Information Modelling-BiM e City Information Modelling-CiM e contribuições na construção das cidades sustentáveis. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 341-348, 2017.

SILVA, R. C. B. A. Revisão da Realidade Brasileira em Termos da Aplicabilidade de Pequenos Satélites para Missões de Sensoriamento Remoto. *In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO*, 1., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: Plêiade, 2018.

SIMONELLI, L.; AMORIM, A. L. City Information Modeling: General Aspects and Conceptualization. **American Journal of Engineering Research**, v. 7, n. 10, p. 319-324, 2018.

SketchUp. Disponível em: <https://www.sketchup.com/pt-BR>. Acesso em: 1 jun. 2020.

STADLER, Alexandra; KOLBE, Thomas H. Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city models. *In: INTERNATIONAL ISPRS SYMPOSIUM ON*

SPATIAL DATA QUALITY, 5., 2007, The Netherlands. **Proceedings** [...]. The Netherlands: ISPRS, 2007. p. 13-15.

STOJANOVSKI, T. City information modeling (CIM) and urbanism: Blocks, connections, territories, people and situations. *In*: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE & URBAN DESIGN, 1., 2013, San Diego. **Proceedings** [...]. San Diego: SimAUD, 2013.

STOTER, J.; OHORI, K. A.; DUKAI, B.; LABETSKI, A.; KUMAR, K.; VITALIS, S.; LEDOUX, H. **State of the Art in 3D City Modelling**. 2020. Disponível em: <https://www.festivalviart.com/2020/04/state-of-art-in-3d-city-modelling.html>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SUCCAR, B.; SHER, W.; ARANDA-MENA, G.; WILLIAMS, T. **A proposed framework to investigate Building Information Modelling through knowledge elicitation and visual models**. 2007. Disponível em: <https://goo.gl/fVBMK1>. Acesso em: 22 jun. 2021.

TAH, J. H. M.; OTI, A. H.; ABANDA, F. H. A state-of-the-art review of built environment information modelling (BeIM). **Organization, technology & management in construction: an international journal**, v. 9, n. 1, p. 1638-1654, 2017.

TANG, P.; HUBER, D.; AKINCI, B.; LIPMAN, R.; LYTLE, A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. **Automation in construction**, v. 19, n. 7, p. 829-843, 2010.

TASHAKKORI, Hosna; RAJABIFARD, Abbas; KALANTARI, Mohsen. A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. **Building and Environment**, v. 89, p. 170-182, 2015.

TECHOPEDIA. **Data Lineage**. 2021. Disponível em: <https://www.techopedia.com/definition/28040/data-lineage>. Acesso em: 10 jan. 2021.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2020. 248 p.

THOMPSON, E. M.; GREENHALGH, P.; MULDOON-SMITH, K.; CHARLTON, J.; DOLNÍK, M. Planners in the Future City: Using City Information Modelling to Support Planners as Market Actors. **Urban Planning**, v. 1, n. 1, p. 16, 2016. ISSN 2183-7635. Disponível em: <https://goo.gl/KMw94z>. Acesso em: 9 maio 2017.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British journal of management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

TUM - Technische Universität München. 3D City Model of New York City. Disponível em: <https://www.asg.ed.tum.de/gis/projekte/new-york-city-3d>. Acesso em: 10 jun. 2021.

VAL3DITY. **Geometric validation of 3D primitives**. Disponível em: <http://geovalidation.bk.tudelft.nl/val3dity/>. Acesso em: 1 maio 2020.

VARDUHN, V.; MUNDANI, R.P.; RANK, E. Multi-resolution Models: Recent Progress in Coupling 3D Geometry to Environmental Numerical Simulation. *In*: BREUNIG M.; AL-DOORI M.; BUTWILOWSKI E.; KUPER P.; BENNER J.; HAEFELE K. **3D Geoinformation Science: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**. [S. l.]: Springer, p. 55-69, 2015. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-12181-9_4. Acesso em: 15 nov. 2021.

VITALIS, S. *et al.* A data structure to incorporate versioning in 3D city models. *In*: 3D GEOINFO CONFERENCE, 14., 2019, Singapura. **Proceedings** [...]. Singapura: Delft University, 2019. p. 123-130.

WEBSTER, C. J. GIS and the scientific inputs to urban planning. Part 1: description. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 20, n. 6, p. 709-728, 1993.

WIKIPÉDIA. **Homomorfismo**. 2018. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Homomorfismo>. Acesso em: 25 maio 2020.

WIKIPÉDIA. **Pelourinho (Salvador)**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Pelourinho_\(Salvador\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Pelourinho_(Salvador)). Acesso em: 1 jun. 2020.

WOLFF, M.; ASCHE, H. Geospatial Modelling of Urban Security: A Novel Approach with Virtual 3D City Models. *In*: GERVASI, O.; MURGANTE, B.; LAGANÀ, A.; TANIAR, D.; MUN, Y.; GAVRILOVA, M. L. **Computational Science and Its Applications: Lecture Notes in Computer Science**. Berlin: Springer, v. 5072, p. 55-69, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69839-5_4. Acesso em: 20 set. 2020.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 663 f.

WU, Bo; XIE, Linfu; HU, Han *et al.* Integration of aerial oblique imagery and terrestrial imagery for optimized 3D modeling in urban areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 139, p. 119-132, 2018.

XU, Bo *et al.* Investigation on the weighted ransac approaches for building roof plane segmentation from lidar point clouds. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 5, 2016.

XU, X.; DING, L.; LUO, H.; MA, L. From building information modeling to city information modeling. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 19, p. 292-307, 2014.

YAO, Zhihang *et al.* 3DCityDB-a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 3, n. 1, p. 1-26, 2018.

YANG, B.; LEE, J. Improving accuracy of automated 3D building models for smart cities. **International Journal of Digital Earth**, 2019, v. 12, n. 2, p. 209-227.

YEZIORO, Abraham; SHAVIV, Edna. Shading: A design tool for analyzing mutual shading between buildings. **Solar energy**, v. 52, n. 1, p. 27-37, 1994.

YINGER, John. Racial prejudice and racial residential segregation in an urban model. **Journal of urban economics**, v. 3, n. 4, p. 383-396, 1976.

YU, B.; LIU, H.; WU, J.; LIN, W. M. Investigating impacts of urban morphology on spatio-temporal variations of solar radiation with airborne LIDAR data and a solar flux model: a case study of downtown Houston. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 17, p. 4359-4385, 2009.

ZHAO, J.; STOTER, J.; LEDOUX, H. A Framework for the Automatic Geometric Repair of CityGML Models. *In*: BUCHROITHNER, M.; PRECHTEL, N.; BURGHARDT, D. **Cartography from Pole to Pole**: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin: Springer, 2014. p. 199-215. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32618-9_14. Acesso em: 23 set. 2021.

ZHU, Q.; HU, M.; ZHANG, Y.; DU, Z. Research and practice in three-dimensional city modeling. **Geo-spatial Information Science**, v. 12, n. 1, p. 18-24, 2009.

ZHU, Q.; ZHAO, J.; DU, Z.; ZHANG, Y.; XU, W.; XIE, X.; WANG, T. Towards semantic 3D city modeling and visual explorations. *In*: INTERNATIONAL 3D GEOINFO CONFERENCE, 5., 2010, Berlin. **Proceedings** [...]. Berlin: Heidelberg, 2011.