



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**MODELAGEM GEOMÉTRICA E SEMÂNTICA BASEADAS
NO PADRÃO CITYGML: UMA APLICAÇÃO SIG 3D PARA O
CAMPUS UNIVERSITÁRIO FEDERAÇÃO ONDINA DA UFBA**

ELAINE GOMES VIEIRA DE JESUS

Salvador – BA
2024

ELAINE GOMES VIEIRA DE JESUS

**MODELAGEM GEOMÉTRICA E SEMÂNTICA BASEADAS
NO PADRÃO CITYGML: UMA APLICAÇÃO SIG 3D PARA O
CAMPUS UNIVERSITÁRIO FEDERAÇÃO ONDINA DA UFBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPG-AU), da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia (FAUFBA), como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim
Coorientador: Prof. Dr. Mauro José Alixandrini Junior

Salvador – BA
2024

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

J58

Jesus, Elaine Gomes Vieira de.

Modelagem geométrica e semântica baseadas no padrão CityGML [recurso eletrônico] : uma aplicação SIG 3D para o *campus* universitário federação ondina da UFBA / Elaine Gomes Vieira de Jesus. – Salvador, 2024.

167 p. : il. ; 24 cm.

Tese – Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. 2024.

Orientador: Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim.

Coorientador: Prof. Dr. Mauro José Alixandrini Junior.

1. Modelagem de informação da construção. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Edifícios universitários - Projetos e plantas. 4. Fotogrametria aérea - Salvador (BA). 5. Arquitetura e tecnologia. 6. Universidade Federal da Bahia - Edifícios. I. Amorim, Arivaldo Leão de. II. Alixandrini Junior, Mauro Jose. III. Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Arquitetura. IV. Título.

CDU: 72.02:725.1(813.8)



ATA DA SESSÃO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA DOUTORANDA
ELAINE GOMES VIEIRA DE JESUS

Ao décimo dia do mês de maio de dois mil e vinte e quatro, reuniu-se por convocação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, a comissão composta pelos professores doutores Arivaldo Leão de Amorim, Érica de Sousa Checcucci, Natalei Johanna Groetelaars, Camila Marques Zyngier, Luciene Stamato Delazari e Mauro José Alixandrini Júnior, sob a presidência do primeiro, na qualidade de orientador da tese, para proceder ao exame do trabalho apresentado pela doutoranda **ELAINE GOMES VIEIRA DE JESUS** intitulado "**Modelagem geométrica e semântica baseada no padrão CitygGML: uma aplicação SIG 3D para o campus universitário Federação - Ondina da UFBA**".

O ato teve início às 14:00 horas, tendo sido concedido à doutoranda cinquenta (50) minutos para exposição resumida dos conteúdos do seu trabalho. De acordo com as normas que regulam a matéria, cada examinador fez suas observações e levantou questões, que foram respondidas pela candidata.

Concluído o exame, os professores atribuíram as seguintes indicações:

Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim	APROVADA
Profa. Dra. Érica de Sousa Checcucci	APROVADA
Profa. Dra. Natalie Johanna Groetelaars	APROVADA
Profa. Dra. Camila Marques Zyngier	APROVADA
Profa. Dra. Luciene Stamato Delazari	APROVADA
Prof. Dr. Mauro José Alixandrini Júnior	APROVADA

Com o que se julgou a doutoranda **APROVADA**, sendo recomendado ao Colegiado de Curso deste Programa de Pós-Graduação que seja concedido à **ELAINE GOMES VIEIRA DE JESUS** o grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Salvador, 10 de maio de 2024.

Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim
Orientador e Presidente da Banca Examinadora
PPG-AU/FAUFBA

Documento assinado digitalmente
 **ARIVALDO LEAO DE AMORIM**
Data: 15/05/2024 06:46:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Érica de Sousa Checcucci
Membro da Banca Examinadora
PPG-AU/FAUFBA

Documento assinado digitalmente
 **ERICA DE SOUSA CHECCUCCI**
Data: 11/05/2024 09:56:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Natalie Johanna Groetelaars
Membro da Banca Examinadora
PPG-AU/FAUFBA

Documento assinado digitalmente
 **NATALIE JOHANNA GROETELAARS**
Data: 11/05/2024 14:17:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Camila Marques Zyngier
Membro da Banca Examinadora
UFMG

Documento assinado digitalmente
 **CAMILA MARQUES ZYNGIER**
Data: 13/05/2024 15:09:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Luciene Stamato Delazari
Membro da Banca Examinadora
UFPR

Documento assinado digitalmente
 **LUCIENE STAMATO DELAZARI**
Data: 14/05/2024 08:23:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mauro José Alixandrini Júnior
Coorientador e Membro da Banca Examinadora
EPUFBA

Documento assinado digitalmente
 **MAURO JOSE ALIXANDRINI JUNIOR**
Data: 13/05/2024 16:09:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, especialmente a Deus, por me proporcionar uma vida cheia de desafios e me dar forças para superá-los.

Toda minha família e em especial a minha mãe que sempre me incentivou e apoiou ao longo deste processo.

Ao meu marido, Ricardo por toda paciência, compreensão e dedicação, em todas as etapas deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim e meu coorientador Prof. Dr. Mauro José Alixandrini Junior por toda dedicação e apoio, que foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

A banca examinadora que avaliou e contribuiu com este trabalho: Profa. Dra. Luciene Stamato Delazari, Profa. Dra. Camila Marques Zyngier, Profa. Dra. Érica de Souza Checcucci e Profa. Dra. Natalie Johanna Groetelaars.

A Universidade Federal da Bahia (UFBA) pelas oportunidades oferecidas na Graduação, Mestrado e Doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU).

Ao Laboratório de estudos avançados em Cidade, Arquitetura e Tecnologias Digitais (LCAD) que me recebeu em 2017, e frequentei durante essa etapa do doutorado sendo fundamental para troca de ideias e experiências que culminaram nesta tese.

Ao Departamento de Geografia da UFBA, no qual sou professora desde 2019 e que me concedeu uma licença durante 2 anos permitindo que eu me dedicasse exclusivamente a tese.

Aos Colegas da turma de 2019 do Doutorado em Arquitetura e Urbanismo.

Ao grupo de pesquisa que participo juntamente com os Professores do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (DETG) que me proporcionou muitas discussões e debates enriquecedores para a construção e finalização desta tese.

Aos meus amores (meus pets) Cadu e Amora que me deram muito apoio emocional

nestes últimos 2 anos.

A duas pessoas muito especiais para mim, Vivian e Mauro, que me orientaram ao longo da minha vida acadêmica, sempre me incentivaram e apoiaram diante de todos os desafios, principalmente nesta jornada dos últimos 5 anos.

JESUS, E. G. V. **Modelagem geométrica e semântica baseadas no padrão CityGML: uma aplicação SIG 3D para o *campus* universitário Federação Ondina da UFBA, Salvador – BA.** 2024. 167 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

RESUMO

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são sistemas utilizados para monitoramento, operação, análise e planejamento. Recentemente estão ganhando destaque as aplicações que envolvem dados tridimensionais como por exemplo: cadastro 3D; planejamento urbano; respostas à emergências; prevenção de danos sísmicos; inundações, entre outros. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com esta temática com o intuito de discutir os elementos relacionados à modelagem geométrica e semântica de acordo com o padrão CityGML. Neste padrão é necessário definir o Nível de Detalhe (*Level of Detail - LOD*), que indica os elementos e as classes a serem representados. Assim, esta pesquisa propõe uma aplicação SIG 3D a partir da modelagem geométrica e semântica do *campus* universitário Federação Ondina da UFBA, baseada no padrão CityGML, para a otimização dos usos dos espaços visando auxiliar a gestão do *campus*. Para isso, foi utilizado o método *Design Science Research (DSR)* que busca construir e avaliar artefatos a partir de um problema, buscando soluções para o mesmo. A metodologia utilizada envolve: a aquisição de dados geométricos provenientes do último levantamento aerofotogramétrico oficial do município de Salvador, de 2017, para compor a base de dados da área de estudo; a modelagem geométrica e semântica, no padrão CityGML, das categorias terreno, sistema viário e edificações do *campus* universitário utilizando o software SketchUp e seu *plugin* CityEditor; o armazenamento do modelo geométrico resultante no banco de dados bem como a inserção de novos dados e criação de novas tabelas conforme a modelagem conceitual da aplicação (utilizando os softwares PostgreSQL/PostGIS, PgAdmin e 3DCityDB); e por fim é demonstrada a viabilidade da proposta de aplicação SIG 3D a partir das consultas aos usos e funções dos espaços bem como análises espaciais que contemplam a identificação de possíveis rotas (dos percursos realizados pelos alunos no *campus*) e rotas de evacuação, criadas para simular áreas suscetíveis ao risco de incêndio de alguns laboratórios da Escola Politécnica (estas representações das consultas e análises foram realizadas no Blender).

Palavras-chave: SIG 3D. Modelagem geométrica e semântica. Banco de dados. CityGML. *Campus* universitário.

JESUS, E. G. V. Geometric and semantic modeling based on the CityGML standard: a 3D GIS application for the UFBA Federação Ondina university campus, Salvador – BA. 2024. 167 f. Thesis (Ph.D. in Architecture and Urbanism) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) are systems used for monitoring, operation, analysis, and planning. Recently, applications involving three-dimensional data have been gaining prominence, such as 3D cadastre, urban planning, emergency response, and the prevention of seismic damage and floods. Many studies have been conducted on this topic to discuss elements related to geometric and semantic modeling according to the CityGML standard. In this standard, it is necessary to define the Level of Detail (LOD), which indicates the elements and classes to be represented. This research proposes a 3D GIS application based on the geometric and semantic modeling of the UFBA's Federação Ondina university campus, according to CityGML standards, to optimize space usage and assist campus management. For this, the Design Science Research (DSR) method was used to build and evaluate artifacts based on a problem, seeking solutions for it. The methodology involves: acquiring geometric data from the Salvador municipality's latest official aerial photogrammetric survey, conducted in 2017, to compose the study area database; geometric and semantic modeling, according to CityGML standards, using SketchUp software and its CityEditor plugin to create the terrain, road system, and buildings categories for the university campus; storing the resulting geometric model in the database; and the insertion of new data and creation of new tables according to the application's conceptual modeling (using PostgreSQL/PostGIS, PgAdmin, and 3DCityDB software). Finally, the feasibility of the proposed 3D GIS application is demonstrated based on queries regarding the uses and functions of the spaces, as well as spatial analyses that include the identification of possible routes (the paths taken by students on campus) and evacuation routes, created to simulate areas susceptible to the risk of fire in some laboratories of the Polytechnic School (these representations of the queries and analyses were performed in Blender).

Keywords: 3D GIS. Geometric and semantic modeling. Database. CityGML. University campus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	27
Figura 2 - Processo de modelagem conceitual.....	37
Figura 3 - Notação UML da associação entre classes.....	39
Figura 4 - Notação UML da Cardinalidade.....	40
Figura 5 - Notação UML da agregação e composição entre classes.....	40
Figura 6 - Notação UML da especialização entre classes.....	41
Figura 7 - Exemplo de diagrama UML do padrão CityGML.....	49
Figura 8 - Primitivas geométricas utilizadas no modelo CityGML.....	51
Figura 9 - Os cinco níveis de detalhes.....	51
Figura 10 - Visão geral dos módulos do CityGML 3.0.....	54
Figura 11 - Representação de uma edificação no CityGML 3.0.....	55
Figura 12 - Classe e subclasse <i>TunnelPart</i>	57
Figura 13 - Nova classe adicionada derivada da classe <i>Site</i>	58
Figura 14 - Trecho do modelo numérico 3D de Viena.....	60
Figura 15 - Comparação entre os diferentes tipos de representação.....	61
Figura 16 - Edificações em LOD2.....	62
Figura 17 - Interface do <i>plugin</i> CityEditor.....	63
Figura 18 - Interface do <i>plugin</i> Heron do Grasshopper.....	64
Figura 19 - Interface do CityEngine.....	64
Figura 20 - Trecho de Helsinque visualizado no QGIS.....	66
Figura 21 - Interface do SuperMap.....	67
Figura 22 - Mapa do <i>campus</i> da Universidade do Texas.....	70
Figura 23 - Mapa do <i>campus</i> da Universidade de Michigan.....	71
Figura 24 - Visualização do SIG UEL através do ArcGIS <i>online</i>	72
Figura 25 - Cadastro de um edifício no sistema do projeto Atlas.....	73
Figura 26 - Modelo geométrico das edificações na área de estudo.....	74
Figura 27 - Mapa do <i>campus</i> da Universidade da Carolina do Sul.....	75
Figura 28 - Áreas atualizadas após o estudo.....	85
Figura 29 - Modelo geométrico e semântico produzido no QGIS.....	86
Figura 30 - Capacidade de alunos por sala de aula em diferentes pavimentos.....	87
Figura 31 - Consulta ao banco de dados e visualização no QGIS.....	88
Figura 32 - Diagrama de Casos de Uso.....	92
Figura 33 - Diagrama UML do Módulo <i>Relief</i>	94
Figura 34 - Diagrama UML do Módulo <i>Transportation</i>	95
Figura 35 - Diagrama UML do módulo <i>Building</i>	97

Figura 36 - Diagrama de classes UML da área externa do <i>campus</i>	100
Figura 37 - Diagrama de classes UML da área interna da Escola Politécnica	103
Figura 38 - Edificações e arruamento da área de estudo	105
Figura 39 - MDT e MDS da área de estudo	106
Figura 40 - Alterações de construções na área de estudo	108
Figura 41 - Novo prédio construído em São Lázaro	108
Figura 42 - Edificações construídas em área proibida	109
Figura 43 - Hospital de Medicina Veterinária, construído fora da poligonal.....	109
Figura 44 - Prédios da PROAE e DCE, construídos fora da poligonal.....	110
Figura 45 - Terrenos que pertencem a Universidade	110
Figura 46 - Erro na atribuição do centroide das edificações	111
Figura 47 - Alturas das edificações a partir da normalização do MDS.....	111
Figura 48 - Tabela de atributos do arquivo <i>shapefile</i>	112
Figura 49 - Modelagem geométrica LOD1 no SketchUp	115
Figura 50 - Modelagem geométrica LOD2 no CityEditor	116
Figura 51 - Modelo geométrico visualizado no FZKViewer	117
Figura 52 - Modelo geométrico LOD4 no CityEditor (classe <i>Room</i>)	118
Figura 53 - Modelo geométrico LOD4 no CityEditor (classe <i>BuildingFurniture</i>)	119
Figura 54 - Trecho do modelo geométrico do Sistema Viário	120
Figura 55 - Modelo geométrico contendo Edificações, Sistema Viário e Terreno	121
Figura 56 - Importação do modelo geométrico no 3DCityDB.....	123
Figura 57 - Tipos de superfície identificadas pela coluna <i>Objectclass_id</i>	125
Figura 58 - Tabela <i>Building</i> com inserção de atributos.....	126
Figura 59 - Tabela <i>Room</i> com inserção de atributos	127
Figura 60 - Consulta das informações das salas de aula	128
Figura 61 - Consulta das disciplinas alocadas em uma sala.....	130
Figura 62 - Consulta a tabela lista de softwares	131
Figura 63 - Visualização das edificações (<i>Footprints</i> e <i>Extruded</i>) no Google Earth.....	135
Figura 64 - Visualização das edificações (<i>Geometry</i> e COLLADA/gITF) no Google Earth.....	135
Figura 65 - Usos e funções das edificações da área de estudo no Blender.....	136
Figura 66 - Usos e funções dos espaços em LOD4 no Blender	137
Figura 67 - Rota proposta entre Escola Politécnica e Instituto de Física	138
Figura 68 - Rota proposta entre Escola Politécnica e Instituto de Geociências	139
Figura 69 - 1 ^o cenário de risco de incêndio	142
Figura 70 - 2 ^o cenário de risco de incêndio	143
Figura 71 - 3 ^o cenário de risco de incêndio	144

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais formatos de dados utilizados em cada domínio	47
Quadro 2 - Módulos e campos temáticos do CityGML 2.0.....	52
Quadro 3 - Extensões (ADE) do CityGML	58
Quadro 4 - Tipos de dados usados para criação de modelos geométricos e semânticos.....	77
Quadro 5 - Softwares usados para modelagem e visualização na <i>web</i>	78
Quadro 6 - Instalações e equipamentos universitários da UFBA	83
Quadro 7 - Categorização das edificações da área de estudo	113
Quadro 8 - Softwares utilizados na aplicação SIG 3D	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição da área física da UFBA.....	81
--------------------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3DCityDB - 3D City Database
ADE - *Application Domain Extension*
ALS - *Airborne Laser Scanning*
API - *Application Programming Interface*
BIM - *Building Information Modeling*
CAD - *Computer Aided Design*
CARTOLAB - Laboratório de Cartografia e GIS
CBGE - Classes Base do Mapeamento Topográfico em Grandes Escalas
CDGV - Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais
CGA – *Computer Generated Architecture*
CIS - *Campus Information System*
CityGML - *City Geography Markup Language*
COLLADA - *Collaborative Design Activity*
DCU - Design Centrado no Usuário
DETG - Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia
DSR - *Design Science Research*
EMU - Estrutura de Mobilidade Urbana
ET-EDGV - Especificações Técnicas para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais
FME - Feature Manipulation Engine
GB - *Gigabytes*
GDB - *Geodatabase*
GIS - *Geographic Information System*
GLTF - *GL Transmission Format*
GML - *Geography Markup Language*
GNSS - *Global Navigation Satellite System*
HTML - *Hypertext Markup Language*
IHAC - Instituto de Humanidades, Artes e Ciências Prof. Milton Santos
INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
IoT - *Internet of Things*
ISO - International Organization for Standardization
JSON - *JavaScript Object Notation*
KML - *Keyhole Markup Language*
LABARQ - Laboratório de Informatização de Acervo

LABGEO - Laboratório de Geoprocessamento Theodoro Sampaio
LIDAR - *Light Detection And Ranging*
LOD - *Level of Detail*
LTGEO - Laboratório de Topografia e Geodésia
MB – *Megabytes*
MDE - Modelo Digital de Elevação
MDS - Modelo Digital de Superfície
MDT - Modelo Digital de Terreno
OGC - Open Geospatial Consortium
OSGEO - Open Source Geospatial Foundation
OSM – OpenStreetMap
PAF I - Pavilhão de Aulas Reitor Felipe Serpa
PAF II - Pavilhão de Aulas Alceu Hiltner
PAF III - Pavilhão de Aulas Glauber Rocha
PAF IV - Pavilhão de Aulas da Federação IV
PAF V - Pavilhão de Aulas da Federação V
PAF VI - Pavilhão de Aulas da Federação VI
PASL - Pavilhão de Aulas Thales de Azevedo
PD - Plano Diretor
PDI - Plano de Desenvolvimento Institucional
PRS - Pavilhão de Aulas Raul Seixas
RPAS - *Remotely Piloted Aircraft System*
RU - Restaurante Universitário
SGBD - Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SHP - *Shapefile*
SIC - Sistema de Informação do *Campus*
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SIG 3D - Sistema de Informações Geográficas 3D
SIG3D - Special Interest Group 3D
SIG *Web* - Sistema de Informações Geográficas integrado à *Web*
SPU - Secretaria de Patrimônio da União
SQL - *Structured Query Language*
SUMAI - Superintendência de Meio Ambiente e Infraestrutura da UFBA
TB - *Terabytes*
TIN - *Triangulated Irregular Network*

UEL - Universidade Estadual de Londrina

UFBA - Universidade Federal da Bahia

UFPR - Universidade Federal do Paraná

UML - *Unified Modeling Language*

URL - *Uniform Resource Locator*

VRML - *Virtual Reality Modeling Language*

WebGL - *Web Graphics Library*

WFS - *Web Feature Service*

WMS - *Web Map Service*

X3D - Extensible 3D

XML - *Extensible Markup Language*

XSLT - *Extensible Stylesheet Language Transformations*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 OBJETIVOS	22
1.2 METODOLOGIA	23
1.2.1 Identificação do problema.....	24
1.2.2 Definição do objetivo	24
1.2.3 Construção do artefato	25
1.2.4 Demonstração de uso	25
1.2.5 Avaliação.....	26
1.2.6 Comunicação	26
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	28
1.4 ESTRUTURA DA TESE.....	28
2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG).....	30
2.1 FUNDAMENTOS DO SIG	30
2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS 3D	33
2.3 MODELOS E MODELAGEM DE DADOS	36
2.3.1 Princípios da notação UML.....	38
2.4 BANCO DE DADOS.....	41
3 MODELAGEM GEOMÉTRICA E SEMÂNTICA PARA SIG 3D.....	44
3.1 TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM	44
3.2 PADRÕES E FORMATOS DE DADOS PARA MODELAGEM.....	45
3.3 CITYGML	48
3.3.1 CityGML 2.0.....	51
3.3.2 CityGML 3.0.....	53
3.4 EXTENSÕES E APLICAÇÕES DO CITYGML.....	56
3.5 SOFTWARES USADOS NA MODELAGEM GEOMÉTRICA	63
4 SIG APLICADO AOS CAMPUS UNIVERSITÁRIOS	69
4.1 USO DE SIG PARA GESTÃO DO <i>CAMPUS</i> UNIVERSITÁRIO	69
4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CRIAÇÃO DE MODELOS GEOMÉTRICOS E SEMÂNTICOS EM <i>CAMPUS</i> UNIVERSITÁRIO	75
4.3 MODELAGEM GEOMÉTRICA E SEMÂNTICA PARA <i>CAMPUS</i> UNIVERSITÁRIO	77
4.4 UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA.....	80
5 PROJETO E MODELAGEM CONCEITUAL DO SIG 3D	89

5.1 CASOS DE USO DA APLICAÇÃO 3D	89
5.2 REQUISITOS FUNCIONAIS	93
5.3 REQUISITOS DE DADOS	93
5.3.1 Módulo <i>Relief</i>	94
5.3.2 Módulo <i>Transportation</i>	94
5.3.3 Módulo <i>Building</i>	95
5.4 FUNCIONALIDADES DA APLICAÇÃO	97
5.5 MODELAGEM CONCEITUAL DA APLICAÇÃO SIG 3D	98
6 PROPOSTA DE APLICAÇÃO SIG 3D	104
6.1 AQUISIÇÃO DE DADOS GEOMÉTRICOS	104
6.2 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS	107
6.3 MODELAGEM GEOMÉTRICA DO <i>CAMPUS</i>	114
6.3.1 Modelagem Geométrica das Edificações.....	115
6.3.2 Modelagem Geométrica do Sistema Viário	119
6.3.3 Modelagem Geométrica do Terreno	120
6.3.4 Discussão sobre a modelagem geométrica	121
6.4 ARMAZENAMENTO DO MODELO EM BANCO DE DADOS 3D.....	122
6.4.1 Inserção de atributos padrão do CityGML e atributos propostos como extensão	126
6.4.2 Consultas SQL realizadas no banco de dados.....	128
6.4.3 Discussão sobre a modelagem semântica	131
6.5 APLICAÇÃO SIG 3D PARA O <i>CAMPUS</i> FEDERAÇÃO ONDINA.....	132
6.5.1 Tecnologias utilizadas na aplicação SIG 3D.....	133
6.5.2 Consultas da aplicação SIG 3D.....	134
6.5.3 Análises espaciais da aplicação SIG 3D	137
6.5.4 Discussão sobre a aplicação SIG 3D - Potencialidades e desafios	144
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	146
7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
REFERÊNCIAS	151
APÊNDICE A – DICIONÁRIO DE DADOS DAS CLASSES E ATRIBUTOS DA APLICAÇÃO SIG 3D.....	160
APÊNDICE B – LISTA DE CÓDIGOS DOS MÓDULOS CITYGML	165
APÊNDICE C – EXEMPLOS DE SCRIPTS ELABORADOS PARA BANCO DE DADOS	168

1 INTRODUÇÃO

Os modelos numéricos 3D de cidades representam objetos do mundo real a partir de quatro elementos: representações geométricas (forma), aparência, topologia e semântica. Na modelagem geométrica é necessário definir o nível de detalhe (*Level of Detail* - LOD), que expressa a precisão e a fidedignidade com as quais os elementos devem ser representados, bem como as classes a serem incluídas (Redweik *et al.*, 2007).

Esses modelos numéricos 3D de cidades possuem inúmeras aplicações, algumas vezes envolvendo apenas a geometria e outras agregando informações semânticas. As principais aplicações foram apontadas pelo 3D Geoinformation Group no *website* [<https://www.citygml.org/>], e discutidas por Biljecki *et al.* (2015), como por exemplo:

- Estimativa de demanda de energia (utiliza dados semânticos do modelo como número de andares, tipo de construção e outras características para prever a demanda de energia para aquecimento e/ou resfriamento);
- Classificação do tipo de construção (identificação da tipologia da edificação a partir da sua geometria 3D, como por exemplo a distinção entre apartamentos de um prédio e casas);
- Aprimoramento de geo-visualização (utilizada em vistas panorâmicas, visualização na *web*, realidade aumentada etc.);
- Cadastro 3D (utilizado por exemplo em construções subterrâneas para representar cabos, tubulações, garagem etc.);
- Planejamento urbano (projetos de parques e áreas verdes, análise temporal de mudanças na paisagem etc.);
- Resposta de emergência e gerenciamento de desastres (planejamento da evacuação de pessoas em edifícios, determinando por exemplo a melhor posição para a implantação de portas e escadas em caso de incêndio);
- Estimativa da população vulnerável a determinado fenômeno (usado por exemplo para estimar a população afetada por uma inundação, otimizar a cobertura do sinal de rádio móvel, necessário para cobrir uma área com maior população, avaliar o número de pessoas e edifícios afetados por ruídos de um parque eólico etc.);
- Previsão de danos sísmicos (modelos geométricos usados para prever e visualizar danos a edifícios causados por terremotos, avaliando a vulnerabilidade sísmica dos locais);

- Inundações (modelos de propagação e impacto de inundações por um transbordamento de corpos d'água ou precipitações fortes podem ser usados para avaliar o risco de inundação e o dano potencial em determinada área).

Os dados utilizados para a construção dos modelos geométricos podem ser obtidos através de métodos topográficos, sistema de navegação global por satélite, fotogrametria e métodos de captura e representação da forma por “nuvem de pontos” (*Dense Stereo Matching* e varredura a laser). Dentre estas destacam-se a varredura a laser do tipo *Light Detection and Ranging* (LIDAR), que possibilita a geração dos modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais de terreno (MDT) dos quais podem ser extraídas informações sobre as alturas das edificações e do relevo do terreno; e a fotogrametria terrestre, também conhecida como fotogrametria a curta distância, que permite obter modelos geométricos mais detalhados, incluindo feições das fachadas das edificações.

Atualmente, o padrão internacional usado para criação de modelos numéricos 3D de cidades é o CityGML, desenvolvido pela Open Geospatial Consortium (OGC), que apresenta um modelo de dados aberto para armazenamento e troca de dados em aplicações espaciais, relativas às cidades e o seu ambiente. O padrão CityGML¹ na versão 2.0 suporta diferentes níveis de detalhe que podem variar do LOD0, menos detalhado, ao LOD4, mais detalhado. Os modelos numéricos 3D de cidades construídos no padrão CityGML podem ser armazenados no 3DCityDB², que é um software para o armazenamento de dados geográficos tridimensionais, possibilitando o uso associado aos sistemas gerenciadores de bancos de dados como o Oracle e PostgreSQL.

A discussão em torno da relevância dos sistemas de representação em três dimensões em detrimento aos sistemas de representação em duas dimensões ainda apresenta divergências na literatura. Assim, algumas temáticas podem ser beneficiadas com o uso da terceira dimensão, enquanto em outras não há alteração significativa. Neste contexto, Biljecki *et al.* (2015) indicam a importância do uso dos modelos numéricos 3D de cidades de acordo com os objetivos do usuário, uma vez que há uma falsa ideia de que o 3D é mais relevante do que o 2D, e muitas vezes estudos abordam o uso destes modelos para determinadas aplicações, mas não esclarecem

¹ Apesar de a versão 3.0 do CityGML ter sido lançada em 2021, nesta tese optou-se por utilizar a versão 2.0 devido à limitação do 3DCityDB, software empregado para modelagem do banco de dados, que ainda não oferece suporte para a modelagem na nova versão.

² O 3DCityDB será abordado com mais detalhes na seção 2.4.

suas reais vantagens.

Os modelos numéricos 3D de cidades são formas de comunicação mais eficazes e mais precisas do que as representações 2D, pois reduzem significativamente o esforço cognitivo necessário para interpretar os dados e as análises dos resultados. Essa compreensão auxilia na tomada de decisões aumentando o nível de eficiência e eficácia das mesmas (Kemec *et al.*, 2010).

Assim, segundo Saran (2018), as vantagens dos modelos numéricos 3D de cidades estão relacionadas a alguns fatores, tais como os descritos a seguir:

- normalmente oferecem imagens que permitem que os planejadores tomem decisões, facilitando a gestão;
- fornecem e reutilizam dados multiescala³ em diferentes aplicações;
- permitem visualizar o objeto em perspectivas diferentes;
- a geometria 3D dos recursos é útil para modelar sombras de objetos;
- a aparência e as informações de textura permitem uma visualização mais realista.

Em contrapartida, as desvantagens dos modelos numéricos 3D de cidades estão relacionadas a diversos fatores, como (Saran, 2018):

- alto custo de produção;
- modelos geométricos que podem ser imprecisos de acordo com o ambiente real;
- quantidade de tempo de trabalho manual para edição de dados;
- problemas de validação destes dados.

A modelagem numérica 3D de cidades é um processo que envolve muitas variáveis, com destaque para: diferentes técnicas de aquisição dos dados; variedade de softwares para modelagem da geometria; falta de interoperabilidade entre eles e uso de padrões distintos. É importante ressaltar que existem muitos softwares que utilizam dados 3D, mas as limitações para realização de todo o processo de modelagem em um único software ainda é uma barreira, ou seja, percebe-se a necessidade de utilizar diferentes softwares no processo de modelagem, de visualização e exportação do modelo, o que pode causar perdas significativas de dados e muito retrabalho.

³ Nesta tese, o termo dados multiescala se refere ao uso de dados em diferentes níveis de detalhe.

De acordo com Valencia *et al.* (2015), existem alguns desafios nessa temática que ainda precisam ser enfrentados, como por exemplo: a forma de exibição dos modelos numéricos 3D de cidades e os requisitos técnicos necessários para que estes modelos sejam visualizados em tempo real⁴. Quanto a isso surgem dúvidas como: existem ferramentas disponíveis para atender a estes desafios? Essas ferramentas são úteis para atender às demandas de um SIG 3D?

Visando alternativas para visualizar e disponibilizar dados, a *web* é sem dúvida uma opção que permite ao usuário interagir com o conteúdo sem necessariamente ter o acesso físico aos dados, podendo acessá-los por meio de um geoportal. Os geoportais são ferramentas *web* para acesso aos dados através de geoserviços como *Web Map Service* (WMS)⁵ e *Web Feature Service* (WFS)⁶. Geralmente possuem visualizadores de mapas com o objetivo de representar os resultados das pesquisas em forma de camadas. Outra opção para disponibilização dos dados é através de SIG *Web*⁷ que, de acordo com Vacca *et al.* (2017), é um recurso que permitiu modificar a forma tradicional de usar o SIG como um banco de dados e ferramenta analítica espacial tornando-se uma maneira mais eficiente de fornecer, gerenciar e analisar dados de várias fontes na internet. Em se tratando da visualização de dados geográficos 3D na *web*, destacam-se os globos virtuais Cesium⁸ (assunto discutido na seção 3.2).

Sobre as questões de ferramentas para suporte as demandas dos *campi* universitários, alguns trabalhos foram desenvolvidos abordando a necessidade de customização de plataformas existentes ou até mesmo criação de protótipos como observado em Buyukdemircioglu e Kocaman (2018) e Templin *et al.* (2019). Buyukdemircioglu e Kocaman (2018) elaboraram um protótipo de SIG 3D usando uma interface *web* de código aberto para o *campus* da Universidade Hacettepe (Turquia), incluindo a geometria das edificações, informações semânticas e um MDT em alta resolução. Templin *et al.* (2019) também produziram um aplicativo para visualizar, na *web*, as mudanças ao longo do tempo nos prédios do *campus* da

⁴ Neste caso, o termo ‘em tempo real’ está se referindo à visualização dos dados pelos usuários ao mesmo tempo em que os dados são cadastrados/atualizados no sistema.

⁵ WMS é um padrão OGC que permite acesso aos dados em formato imagem, geralmente JPEG.

⁶ WFS é um padrão OGC que permite acesso aos dados em formato vetorial possibilitando executar filtros com critérios espaciais e topológicos.

⁷ Considera-se um SIG *Web*, um sistema que permite acesso aos dados geográficos através da *web*, podendo haver diferentes níveis de interatividade com o usuário, variando do nível básico (visualização e consulta) ao nível avançado com análises espaciais.

⁸ Cesium é uma plataforma (baseada em JavaScript) de código aberto utilizada para criar globos virtuais interativos que permitem a visualização de dados geográficos.

Universidade de Warmia e Mazury e da cidade velha de Olsztyn, na Polônia.

Além das questões voltadas à forma de exibição dos modelos numéricos 3D de cidades na *web* e aos requisitos necessários para isso, outras lacunas deste tema estão relacionadas aos seguintes fatos: a maioria dos modelos numéricos 3D de cidades abordam apenas as edificações e não contemplam outros módulos do CityGML, inviabilizando análises mais abrangentes; não é muito comum a ocorrência de modelos numéricos 3D de cidades com variação dos níveis de detalhe (LOD) em um único modelo; e a falta de aplicações voltadas para a gestão de *campus* universitário a partir da modelagem geométrica e semântica no padrão CityGML frente às questões relacionadas ao SIG 3D.

Dessa forma, faz-se necessário discutir os desafios para a modelagem numérica 3D de cidades com base no padrão CityGML, buscando softwares/plataformas que possibilitem a interoperabilidade entre as aplicações. Para tanto, o problema desta pesquisa é: Quais requisitos funcionais são necessários para implementar uma aplicação SIG 3D para *campus* universitário levando em consideração a modelagem geométrica e semântica baseadas no padrão CityGML?

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em geral e específicos. O objetivo geral consiste em: fornecer subsídios para a implementação de um SIG 3D, no contexto de um *campus* universitário, a partir da modelagem geométrica e semântica, baseada no padrão CityGML. A fim de alcançar este objetivo geral, foram propostos como objetivos específicos:

- Identificar os requisitos funcionais para elaboração de uma base de dados 3D de *campus* universitário;
- Estabelecer os critérios necessários para a modelagem geométrica e semântica dos objetos (edificações, sistema viário e terreno) de acordo com o padrão CityGML, garantindo a interoperabilidade entre modelos⁹;
- Armazenar o modelo geométrico e semântico, baseado no padrão CityGML, em um banco de dados;
- Propor uma aplicação SIG 3D, para *campus* universitário¹⁰ a partir da modelagem

⁹ Referem-se aos modelos geométricos e semânticos no padrão CityGML que são gerados em diferentes softwares.

¹⁰ A aplicação SIG 3D foi realizada no *campus* universitário Federação Ondina da UFBA.

geométrica e semântica baseada no padrão CityGML para otimização dos usos dos espaços no *campus*.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia proposta nesta pesquisa foi desenvolvida a partir de uma revisão de literatura que baseou o desenvolvimento dos Capítulos acerca dos temas: Sistemas de Informações Geográficas 3D (SIG 3D); modelos e modelagem de dados; banco de dados; modelagem geométrica e semântica; padrão CityGML e *campus* universitário.

O método utilizado nesta pesquisa foi o *Design Science Research* (DSR). Este método busca, a partir do entendimento do problema, construir e avaliar artefatos, que permitam transformar situações, alterando suas condições para estados melhores ou desejáveis (March; Smith, 1995). O método foi usado na elaboração da aplicação SIG 3D para o *campus* universitário Federação Ondina da UFBA.

Segundo March e Smith (1995) existem quatro tipos de artefatos. Eles podem ser classificados em: constructos, modelos, métodos ou instanciações. Um constructo constitui um conceito usado para descrever os problemas e para especificar soluções; o modelo é visto como um conjunto de proposições que expressam as relações entre os constructos. Na *Design Science* buscam-se modelos úteis que sejam capazes de capturar a realidade; um método é um conjunto de passos usados para executar uma tarefa, ou seja, baseiam-se em um conjunto de constructos e uma representação (modelo) em um espaço de solução; e por fim a instanciação, que é a concretização de um artefato, ela operacionaliza constructos, modelos, e métodos.

De acordo com Peffers *et al.* (2008), o processo de condução da DSR envolve as seguintes fases:

- Identificação do problema que será solucionado com a construção do artefato;
- Definição dos objetivos de uma solução a partir do problema;
- Criação do artefato (que pode ser um constructo, modelo, método ou instanciação);
- Demonstração do uso do artefato para resolver uma ou mais instâncias do problema;
- Avaliação do artefato como solução para o problema;
- Comunicação da utilidade e eficácia do artefato para resolver o problema.

1.2.1 Identificação do problema

Para definir o problema de pesquisa foi realizada uma vasta revisão de literatura, utilizando as bases de pesquisa disponíveis de artigos científicos, dando ênfase ao conteúdo abordado nesta tese, que está dividido em três grandes grupos:

a) Conceitos básicos relacionados aos temas:

- Modelagem de dados;
- Banco de dados com destaque para o 3DCityDB; e
- Sistemas de Informações Geográficas (em duas e três dimensões).

b) Modelagem geométrica e semântica para SIG 3D que envolve:

- Técnicas para obtenção de dados;
- Softwares para modelagem geométrica e semântica; e
- Padrões e formatos de dados com destaque para o CityGML e suas extensões.

c) Aplicações SIG 2D e 3D em *campus* universitário com destaque em estudos que envolvam a gestão do *campus*.

Com base no que foi verificado nesta revisão de literatura (conforme já mencionado), identificou-se o seguinte problema de pesquisa: quais requisitos funcionais são necessários para implementar uma aplicação SIG 3D para *campus* universitário levando em consideração a modelagem geométrica e semântica baseadas no padrão CityGML?

1.2.2 Definição do objetivo

De acordo com os objetivos definidos na seção 1.1, o artefato desenvolvido nesta tese, visa demonstrar a importância do uso de um SIG 3D para um *campus* universitário a partir de uma proposta de aplicação que envolve a otimização dos usos dos espaços, tendo como área de estudo o *campus* Federação Ondina da UFBA.

1.2.3 Construção do artefato

O artefato desenvolvido nesta tese consiste na proposta de um método para o desenvolvimento de uma aplicação SIG 3D de *campus* universitário, podendo ser replicado em outras universidades.

1.2.4 Demonstração de uso

Na demonstração de uso, o artefato deve ser testado. Nesta tese, isso ocorreu por meio de testes experimentais que foram divididos em quatro etapas, que podem ser verificadas na Figura 1, e estão descritas a seguir:

a) Etapa 1 - Aquisição de dados geométricos e semânticos e elaboração da base de dados

Esta etapa envolve a aquisição de dados a partir das técnicas de varredura a laser e fotogrametria. Os dados utilizados são provenientes do último levantamento aerofotogramétrico oficial do município de Salvador que ocorreu em 2017. Os dados vetoriais englobam as edificações (bem como seus atributos) e o sistema viário da área de estudo. Os dados matriciais¹¹ são compostos por: ortofoto, modelo digital de terreno e modelo digital de superfície.

Após a aquisição destes dados, foram realizadas visitas a campo com objetivo de verificar a geometria das edificações e sanar dúvidas. Posteriormente foi possível elaborar a base de dados da área de estudo no software QGIS, no qual também foram obtidas as alturas médias das edificações com base no MDT e MDS.

b) Etapa 2 - Modelagem geométrica no padrão CityGML

A modelagem geométrica foi realizada no software SketchUp por meio do *plugin* CityEditor para as edificações (LOD1, 2 e 4), sistema viário e terreno (LOD2). Todas as edificações do *campus* foram modeladas no LOD1 (contendo apenas a extrusão da edificação de acordo com a altura média) e LOD2 (a partir da representação das superfícies telhado, parede e piso) e apenas a parte interna de um pavimento da Escola Politécnica foi modelada em LOD4.

¹¹ O termo dados matriciais nesta pesquisa, é usado para designar dados representados por uma matriz (formada por linhas e colunas) na qual cada elemento dessa matriz possui uma posição relacionada a uma localização geográfica.

c) Etapa 3 - Armazenamento em banco de dados

Para a criação do banco de dados e armazenamento do modelo geométrico e semântico foram utilizados os softwares PostgreSQL/PostGIS, PgAdmin e o 3DCityDB. Os atributos das edificações determinadas em cada LOD segundo o CityGML e demais atributos propostos como extensão CityGML foram inseridos manualmente no PostgreSQL. Para visualização dos modelos CityGML, foram utilizadas as quatro opções disponíveis no Google Earth: *Footprint*, *Extruded*, *Geometry* e *COLLADA/glTF*.

d) Etapa 4 - Aplicação SIG 3D para *campus* universitário

A aplicação SIG 3D para o *campus* Federação Ondina da UFBA buscou representar questões voltadas à otimização dos usos dos espaços no *campus* a partir da estrutura física dos prédios, dos usos e funções dos espaços bem como a identificação de potenciais riscos oferecidos por alguns laboratórios. Para isso, a aplicação possui diferentes níveis de detalhe, contendo geometria e informações semânticas sobre todas as edificações do *campus* e um detalhamento em LOD4 da Escola Politécnica. A aplicação foi elaborada a partir dos requisitos funcionais definidos e da modelagem conceitual da extensão CityGML e buscou evidenciar sua importância com base em consultas simples e análises espaciais. O Blender¹² foi usado para visualização dos resultados esperados de consultas, a criação de rotas e as análises espaciais propostas, que esperava-se obter com as plataformas *web*.

1.2.5 Avaliação

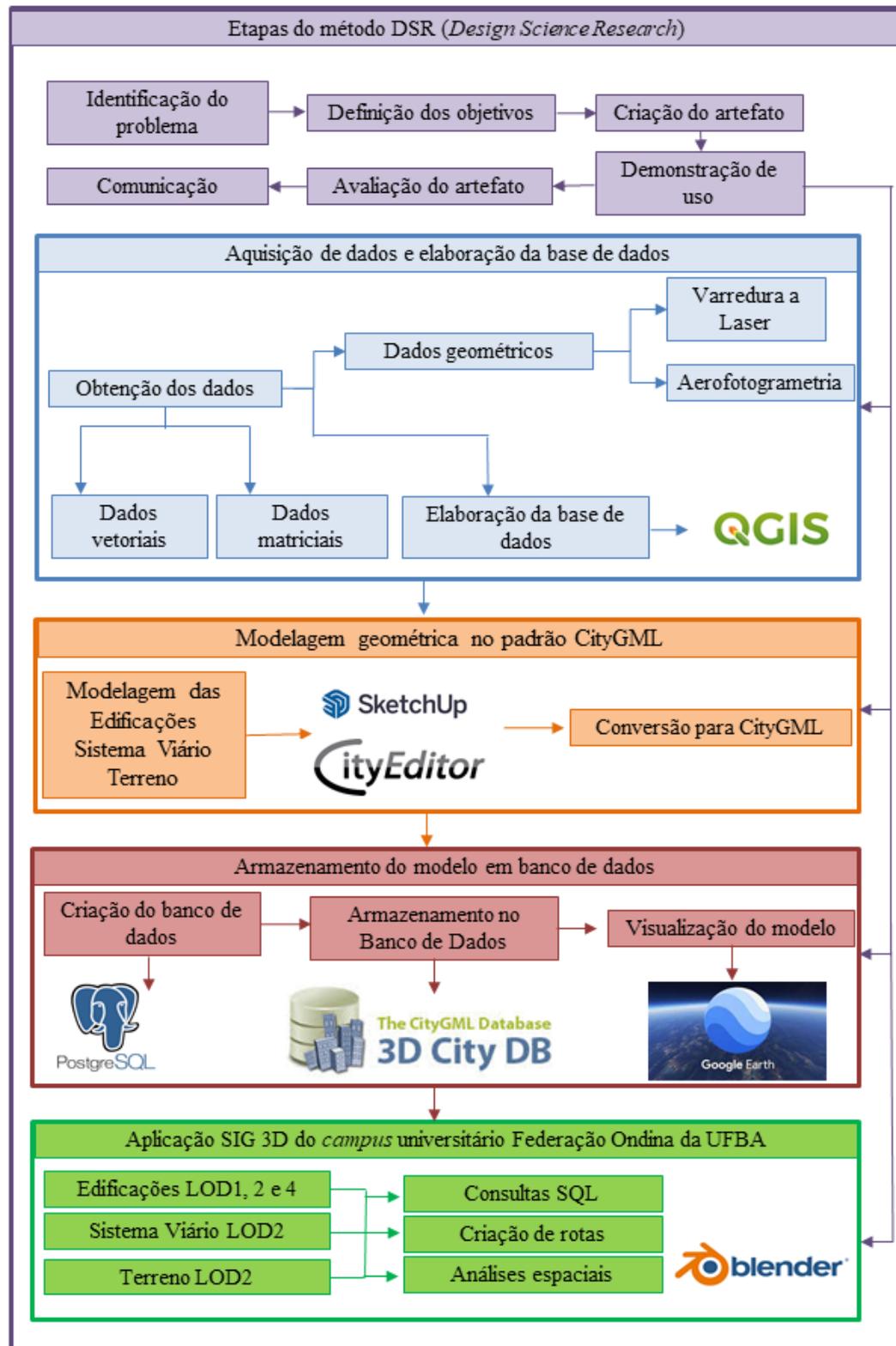
A avaliação do artefato nesta pesquisa foi realizada de forma experimental, a partir do método de experimento controlado que objetiva estudar o artefato em um ambiente controlado para verificar suas qualidades e o método de simulação executando o artefato com dados artificiais (Hevner; March; Park, 2004).

1.2.6 Comunicação

A comunicação dos resultados encontrados nesta pesquisa será feita através da publicação de artigos em periódicos.

¹² O Blender consiste em uma ferramenta que permite a realização de modelagem 3D, simulação, renderização e animação.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A justificativa e a relevância desta pesquisa estão sustentadas nas lacunas observadas na bibliografia pesquisada acerca dos modelos numéricos 3D de cidades. Inicialmente a relevância está associada à aplicação desses modelos na gestão de uma universidade, com ênfase em SIG 3D. A gestão das universidades ganha destaque nesse contexto, pois, segundo Almeida Filho (2010), de acordo com a Carta Magna brasileira, essas instituições possuem autonomia didático-científica, administrativa e de gestão financeira e patrimonial. Entretanto, na falta de uma Lei Orgânica ou alguma norma especial, as universidades seguem as mesmas regras de operação e gestão aplicadas as demais repartições públicas.

Assim, esta pesquisa é justificada pela necessidade de desenvolvimento de uma metodologia para modelagem geométrica e semântica com ênfase em uma aplicação SIG 3D baseada no padrão CityGML visando atender às demandas de um *campus* universitário. Espera-se que estes modelos geométricos e semânticos permitam a interoperabilidade entre diferentes softwares e tornem evidentes as vantagens de um SIG 3D para gestão dos *campi* universitários. Os resultados desta pesquisa também poderão dar suporte para implementação de SIG 3D em universidades de acordo com suas demandas e expectativas.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em sete Capítulos. No Capítulo 1, é apresentada uma introdução ao tema, bem como a identificação do problema, os objetivos (geral e específicos), a metodologia do trabalho e a justificativa da escolha do tema.

No Capítulo 2, são abordados conceitos básicos sobre os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), SIG 3D, modelos e modelagem de dados e banco de dados.

O Capítulo 3 apresenta a modelagem geométrica e semântica para SIG 3D, a partir da discussão das técnicas de obtenção dos dados, os softwares e padrões utilizados.

No Capítulo 4, são discutidas questões referentes aos Sistemas de Informações Geográficas aplicados aos *campi* universitários e apresentados exemplos de universidades no Brasil e em outros países que utilizam SIG, bancos de dados e/ou plataformas *web* para auxiliar o gestor na tomada de decisão.

No Capítulo 5 são discutidos o projeto e a modelagem conceitual de uma aplicação SIG

3D que engloba: casos de uso da aplicação, requisitos funcionais do sistema, requisitos dos dados, funcionalidades propostas e detalhamento da extensão do CityGML proposta e inserida na modelagem conceitual.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados e discussões que estão relacionados à: aquisição de dados geométricos e semânticos; elaboração da base de dados; modelagem geométrica e semântica; armazenamento em banco de dados; e aplicação SIG 3D para o *campus* universitário Federação Ondina.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as considerações finais, conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Neste Capítulo serão introduzidos alguns conceitos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa como: fundamentos dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), SIG 3D, modelos e modelagem de dados e banco de dados.

2.1 FUNDAMENTOS DO SIG

O conceito de *Geographic Information System* (GIS) ou Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é abordado de forma diferente na visão de cada autor. No entanto, o princípio básico, comum entre eles, é o enfoque aos processos de manipulação e análise dos dados permitindo a realização de análises espaciais cuja ênfase está na localização geográfica do fenômeno em estudo.

O termo SIG faz parte da Ciência da Informação Geográfica, constituindo uma área do conhecimento que estuda os temas fundamentais decorrentes da criação, manuseio, armazenamento e uso da informação (Longley *et al.*, 2013). Estes autores abordam a importância dos seis componentes do SIG: internet, hardware, software, dados, procedimentos e profissionais que estão relacionados da seguinte forma:

- A internet permite a comunicação rápida ou compartilhamento de informação digital;
- O hardware é o dispositivo com o qual o usuário interage diretamente na realização de operações de SIG;
- O software geralmente é instalado no computador do usuário, podendo ser uma licença adquirida ou um software gratuito;
- O banco de dados consiste em uma representação digital, de determinado aspecto de uma área da superfície terrestre, ou próxima a ela, para servir na resolução de problemas para fins científicos, administrativos ou comerciais;
- O SIG requer gerenciamento, logo, uma organização deve estabelecer procedimentos e formas de comunicação para garantir que atinjam suas necessidades, mantendo o orçamento e a qualidade;
- Ainda são necessários profissionais para conceber, programar, manter, alimentar com dados e interpretar os resultados.

A análise espacial é um dos pontos cruciais dos SIG, pois ela inclui todas as transformações, manipulações e métodos que podem ser aplicados aos dados geográficos para

adicionar valor a eles, para apoiar decisões e para revelar padrões e anomalias que não são óbvios à primeira vista. A análise espacial expressa a ideia básica de que a informação sobre a localização é essencial, ou seja, a análise feita sem conhecimento da localização não é uma análise espacial. Sendo assim, implica que o produto de uma análise espacial é alterado quando a localização dos objetos é modificada (Feitosa, 2015).

As análises espaciais podem ser aplicadas aos mais diversos temas, referentes aos estudos em diferentes dimensões. Saran *et al.* (2015) abordam a importância das análises com modelos numéricos 3D de cidades em seu estudo sobre avaliação do potencial solar, uma vez que ajudam a identificar locais para instalação de painéis solares, o que conseqüentemente implica em economia de eletricidade usada para iluminação. É possível, por exemplo, saber quais telhados e paredes de uma edificação estão recebendo mais radiação solar durante cada período do dia e até do ano, respondendo perguntas como: Qual é a área de superfície efetiva de parede útil para instalação fotovoltaica? Quais são as paredes adequadas para instalação fotovoltaica durante o verão e inverno? Quais janelas do prédio estão recebendo quantidade suficiente de iluminação durante o dia?

El-Mekawy *et al.* (2012) trazem os resultados da análise espacial em um caso de uso aplicado a um hospital para os cenários de evacuação e alocação de espaços para enfermarias de pacientes. O critério estabelece que todas as pessoas devem ser evacuadas dentro de um período de dois minutos, em caso de emergência, então, devem ser testados os locais do espaço em relação às saídas mais próximas possíveis, sendo necessário criar uma matriz de tempo de evacuação entre todos os espaços e possíveis saídas do edifício. Algumas consultas nesse caso seriam: definir as janelas possíveis em um piso específico que podem ser estendidas como portas em situações de emergência ou ter acesso ao telhado de um edifício adjacente; encontrar as portas que dão acesso ao ambiente externo de uma edificação, definir o uso do espaço externo acessado e identificação de espaço disponível para alocar pacientes de outra enfermaria, se for necessário.

No caso de um *campus* universitário, os Sistemas de Informações Geográficas podem ser usados como ferramenta para análise de dados espaciais e gerenciamento de dados para resolver problemas diversos, a exemplo de algo muito comum no cotidiano universitário, como identificar a capacidade adequada das salas de aula a partir da quantidade de alunos (Ramlee *et al.*, 2019). Segundo estes autores, esse é um problema da Universidade Tecnológica da Malásia e que ocorre em muitas outras universidades, e que pode causar prejuízos para os alunos no

planejamento de suas atividades ou programas relacionados aos seus cursos.

Esses exemplos de consultas e análises espaciais são possíveis devido ao fato do SIG fornecer um sistema de armazenamento de dados e uma definição de relacionamentos topológicos e semânticos. Os SIG 3D são baseados na representação digital com um modelo numérico 3D vinculado a um banco de dados relacional, no qual todas as informações do objeto estão relacionadas (Malinverni *et al.*, 2020). Este assunto será tratado de forma mais aprofundada na seção 2.2 que aborda algumas potencialidades e desafios do SIG 3D, e na seção 2.4 que traz as especificidades dos bancos de dados espaciais.

É importante ressaltar que até o momento não é comum que os *campi* universitários no Brasil possuam Sistemas de Informações Geográficas que permitam acesso e manipulação dos dados (mesmo em duas dimensões) e muito menos análises espaciais mais complexas. No entanto, alguns estudos internacionais se destacam na inserção destes sistemas (incluindo a terceira dimensão), a exemplo de Bansal (2011), Suwardhi *et al.* (2016), Pispidikis *et al.* (2018), dentre outros.

Suwardhi *et al.* (2016) abordam a construção de um Sistema de Informações Geográficas tridimensional para o *campus* do Instituto de Tecnologia Bandung (Indonésia) e ressaltam as seguintes etapas como necessárias para sua construção: determinação dos objetivos do sistema; escolha do hardware e software; aquisição de dados espaciais; processamento e análise de dados; análise do sistema; gestão das camadas; consultas e análise espacial; exibição e publicação de informações.

É necessário ressaltar a importância das análises espaciais realizadas com dados tridimensionais mais comuns em um SIG, que são categorizadas em: análise de dispersão/fluxo, de densidade 3D, de visibilidade, de proximidade e de sobreposição. A partir dessas análises podem ser utilizadas operações como: interseção, diferença, *buffer*, união, análise de fluxo e visibilidade de objetos de diferentes pontos de vista (Moser *et al.*, 2010).

A Ciência da Informação Geográfica é desenvolvida para gerenciar e analisar dados espaciais, que são baseados na Geomática. O SIG como tecnologia/sistema, permite o armazenamento de informações espaciais em um banco de dados e, como ciência, está além do sistema de armazenamento de dados. As informações de atributos associadas às feições espaciais armazenadas no banco de dados permitem uma análise espacial adicional usando atributos espaciais e não espaciais (Li *et al.*, 2020).

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS 3D

Recentemente houve um crescimento expressivo em estudos envolvendo os Sistemas de Informações Geográficas em três dimensões (SIG 3D). As pesquisas indicam as tendências voltadas principalmente para: o desenvolvimento de modelos geométricos e semânticos baseados em padrões de dados 3D (com ênfase para o CityGML), modelos geométricos que envolvem diferentes níveis de detalhe e suas aplicações, a importância das análises espaciais que podem ser realizadas com estes modelos geométricos e semânticos, o uso de bancos de dados integrados ao SIG 3D, o desenvolvimento de softwares que sejam capazes de manipular modelos CityGML sem perda de dados, dentre outros.

Desta forma, as vantagens dos SIG 3D em comparação aos tradicionais SIG bidimensionais estão relacionadas aos fatores: grande número de aplicações que variam desde visualização até análises espaciais; o uso de recursos de textura e aparência geralmente adiciona informações relevantes aos estudos; pode permitir a tomada de decisões baseada em informações mais detalhadas, facilitando a gestão, dentre outros.

Em relação à diversidade de aplicações que envolvem os modelos numéricos 3D de cidades utilizados em um SIG 3D, podem ser citados, por exemplo: estimativa de demanda de energia, apoio ao planejamento urbano, resposta de emergência e gerenciamento de desastres, etc, que foram discutidos no Capítulo 1 desta tese.

A tridimensionalidade representa um fator importante no quesito topológico. Isso ocorre principalmente porque permite uma compreensão mais aprofundada das características espaciais e relações entre os elementos possibilitando a realização de análises espaciais, como por exemplo, a identificação de espaços ou pessoas suscetíveis a determinado risco.

A definição dos usos dos modelos numéricos 3D de cidades depende geralmente do nível de detalhe e do tipo de análise espacial pretendida. Um modelo geométrico em LOD1 apesar de menos detalhado pode ser mais preciso e usado para aplicações como: avaliação da propagação de ruído de tráfego ou análise de sombra de uma edificação enquanto um modelo geométrico em LOD2 pode ser usado para determinar o espaço útil de um edifício ou estimar a irradiação solar dos telhados (Biljecki *et al.*, 2016b).

O nível de detalhe é importante também pois permite obter informações mais detalhadas e com maior precisão geométrica em modelos numéricos 3D de cidades, favorecendo que os

planejadores tomem decisões mais assertivas facilitando a gestão. Essa tomada de decisão é relevante no planejamento urbano ou no gerenciamento da infraestrutura de um *campus* universitário, nos quais o recurso público é escasso e deve ser gerenciado da melhor forma possível.

Por outro lado, as desvantagens e/ou desafios de um SIG 3D estão relacionados principalmente à complexidade técnica necessária, à demanda de softwares específicos e à necessidade de dados mais detalhados para determinados LOD, conforme descrito a seguir:

a) Complexidade técnica requerida

Este desafio está relacionado ao fato de um SIG 3D demandar o uso de hardwares para o uso de softwares específicos além da necessidade de mão-de-obra qualificada para uso destes.

Quanto ao uso de hardwares é justificado pelo peso dos arquivos que podem variar de muitos *megabytes* (MB) a *gigabytes* (GB) a depender do tamanho da área e do detalhamento do modelo geométrico. Como por exemplo, um modelo geométrico de terreno que facilmente pode ter 200 MB (em um recorte de um *campus* universitário) ou o modelo geométrico de uma única edificação em LOD4 que geralmente chega a 80 MB. Tudo isso exige processador e memória de armazenamento.

Em relação à mão-de-obra qualificada para trabalhar com esta temática, acaba se tornando mais escassa, pois se trata de uma área interdisciplinar que envolve conhecimentos sobre dados geográficos, SIG, modelagem numérica 3D de cidades, programação e banco de dados. Sendo assim, muitas vezes não há um profissional no mercado de trabalho que domine simultaneamente todos estes conteúdos, sendo necessário que sejam realizados cursos de atualização para o uso de técnicas específicas de acordo com os objetivos de cada projeto.

b) Softwares específicos para desenvolvimento de um SIG 3D

Foi verificado que na literatura não consta um software único capaz de atender às demandas de um SIG 3D, permitindo a exportação do modelo geométrico e semântico no padrão CityGML. Assim é necessário o uso de múltiplos softwares para modelagem numérica 3D de cidades (desde a entrada do dado bruto no sistema até visualização do modelo), inclusive linguagens de programação associadas aos softwares Rihonoceros e CityEngine. Este fato pode levar a problemas de interoperabilidade e perda de dados.

Existem diferentes softwares para modelagem geométrica, cada um com abordagens distintas. A escolha do software adequado depende das necessidades específicas do projeto e dos objetivos e preferências do usuário. Os softwares mais utilizados para esta modelagem são o CityEngine, SketchUp e Rhinoceros.

Já a criação e o armazenamento das informações no banco de dados podem ser feitos com o PgAdmin, PostgreSQL/PostGIS ou Oracle/Oracle Spatial. Para inserção dos modelos geométricos/semânticos e compatibilização dos mesmos com o padrão CityGML geralmente é usado o 3DCityDB.

Por fim, para a visualização desses modelos na *web*, podem ser usados softwares como o Google Earth ou o 3DCityDB-Web-Map-Client (associado ao 3DCityDB). Este último possibilita adaptações da interface por meio de programação, de acordo com a necessidade do usuário.

c) Dados mais detalhados e precisos para determinado LOD

Frequentemente o dado disponível não é compatível para a criação de um modelo geométrico no padrão CityGML com o nível de detalhe desejado. Isso ocorre pois muitas vezes só dispõe-se de dados genéricos como por exemplo altura das edificações que seriam adequadas para o LOD1.

Quando o objetivo é a modelagem geométrica com maior riqueza de detalhes como LOD3 e 4 torna-se necessário que se tenha informações detalhadas de uma edificação ou parte dela, como as dimensões das paredes de sala, especificações e localização de portas e janelas, etc.

Levantar dados para a modelagem geométrica de edificações em LOD3, pode ser desafiador, uma vez que geralmente envolve o uso de fotogrametria terrestre para capturar detalhes dos estilos e formas arquitetônicas de monumentos e construções históricas.

Diante do exposto, verifica-se que apesar dos esforços em construir softwares capazes de manipular modelos geométricos e semânticos no padrão CityGML ainda há vários desafios a serem enfrentados. O principal deles está relacionado à denominação, pois os softwares disponíveis atualmente não devem ser considerados como SIG 3D apenas por permitir o uso de modelos geométricos, uma vez que, um SIG pressupõe muitas funcionalidades, além da visualização.

2.3 MODELOS E MODELAGEM DE DADOS

Na literatura encontram-se vários conceitos e tipos de modelos¹³, que variam de acordo com sua aplicação. ‘Modelo de dados’ (base para um Sistema de Informações Geográficas) é um conjunto de construtores usado para representar objetos¹⁴ e processos em ambiente computacional. Para representar o mundo real em ambiente computacional (e consequentemente em um SIG) passa-se por quatro níveis de abstração, também conhecidos como paradigma dos quatro universos (Gomes; Velho, 1995). No primeiro universo, são identificados os fenômenos do mundo real (edificações, ruas, poços, lagos, pessoas etc.) e envolve todos os aspectos que podem ou não ser percebidos pelos indivíduos ou considerados relevantes para uma aplicação particular. O segundo universo, conceitual ou matemático, inclui uma definição matemática das entidades que serão representadas. O terceiro, é o universo de representação que corresponde ao modelo lógico, que associa o universo conceitual com as representações geométricas. Por fim, o quarto universo é o de implementação, associado ao ‘modelo físico’ no qual, o modelo é implementado a partir de linguagens de programação.

Os modelos de dados conceituais¹⁵ ou semânticos são os mais adequados para capturar a semântica dos dados e, consequentemente, para modelar e especificar as suas propriedades. Estes se destinam a descrever a estrutura de um banco de dados em um nível de abstração independente dos aspectos de implementação. Os modelos de dados lógicos descrevem a estrutura de um banco de dados apresentando um nível de abstração mais próximo das estruturas físicas de armazenamento de dados. Já os modelos de dados físicos são utilizados para descrever as estruturas físicas de armazenamento (Borges, 2002).

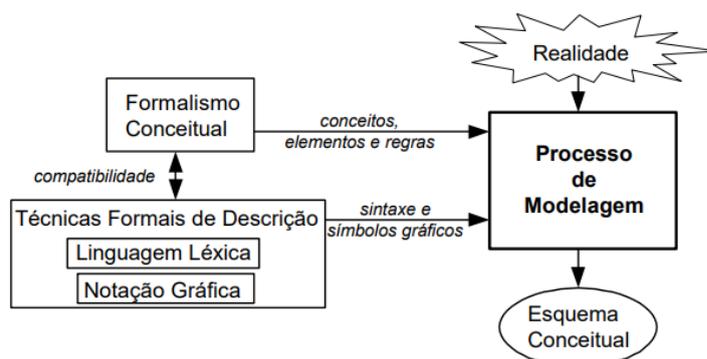
Modelagem de dados é o processo de abstração onde somente os elementos essenciais da realidade observada são enfatizados, descartando-se os elementos não essenciais. O processo de modelagem conceitual (Figura 2) de banco de dados compreende a descrição dos possíveis conteúdos dos dados, além de estruturas e de regras a eles aplicáveis (Lisboa Filho *et al.*, 2000).

¹³ Nesta tese o termo ‘modelo’ é usado para designar uma representação simplificada de objetos do mundo real.

¹⁴ Nesta tese o termo ‘objeto’ é usado como sinônimo de elementos do mundo real como edificações, sistema viário e vegetação.

¹⁵ Um modelo conceitual de dados fornece uma base formal (notacional e semântica) para ferramentas e técnicas usadas para suportar a modelagem de dados (Lisboa Filho *et al.*, 2000).

Figura 2 - Processo de modelagem conceitual



Fonte: Lisboa Filho *et al.* (2000).

A modelagem conceitual é sempre feita com base em algum formalismo conceitual, como por exemplo, a orientação a objetos. Para cada formalismo conceitual, existem diversas linguagens de descrição de esquema¹⁶. O formalismo fornece um conjunto de conceitos, elementos e regras que são usados no processo de modelagem da realidade, enquanto que a linguagem de descrição fornece uma gramática para a apresentação do esquema conceitual resultante da modelagem. A linguagem léxica possibilita o processamento computacional do esquema, enquanto a notação gráfica é mais adequada para facilitar o entendimento e a comunicação entre desenvolvedores e usuários (Lisboa Filho *et al.*, 2000).

Nesta pesquisa, serão enfatizados o modelo de dados relacional (um tipo de modelo lógico) e o modelo orientado a objetos (um tipo de modelo conceitual). O modelo de dados relacional básico representa um banco de dados como uma ‘coleção de tabelas’, na qual cada uma delas pode ser armazenada como um arquivo separado. A maioria dos bancos de dados relacionais usa uma linguagem de consulta chamada *Structured Query Language* (SQL). Por outro lado, o modelo orientado a objetos define um banco de dados em termos de objetos, propriedades e operações. Os objetos com a mesma estrutura e comportamento pertencem a uma classe, e as classes são organizadas em hierarquias. As operações de cada classe são especificadas em termos de procedimentos pré-definidos, denominados métodos (Elmasri; Navathe, 2005).

Em SIG, os modelos de dados são estruturas e regras programadas para acomodar os dados. Qualquer aplicação SIG requer uma atenção para o que pode ser representado e como. Há uma variedade de maneiras possíveis de representação do mundo geográfico de forma

¹⁶ O esquema conceitual é o resultado do processo de modelagem que é apresentado através de uma linguagem formal de descrição que possui uma sintaxe e uma notação gráfica (Lisboa Filho *et al.*, 2000).

digital, nenhuma é perfeita ou ideal para todas as aplicações. As duas formas principais de representação geográfica são objetos discretos e campos contínuos. Os objetos discretos são entidades com limites bem definidos sobre o espaço vazio. Por sua vez, o campo contínuo é descrito por um conjunto de variáveis, cujo valor pode ser medido em qualquer ponto na superfície terrestre e pode variar continuamente ao longo da superfície. Para a representação destes fenômenos geográficos em ambiente digital são utilizados matrizes e vetores. Ambos podem ser usados para codificar tanto objetos discretos quanto campos contínuos, mas há uma melhor associação entre matrizes e campos contínuos, e, entre vetores e objetos discretos (Longley *et al.*, 2013).

Tradicionalmente, a representação vetorial pode ser realizada através de pontos que não possuem dimensão; linhas que apresentam apenas uma dimensão, sendo formadas por pontos que se unem; e polígonos que formam áreas, apresentando duas dimensões. Em uma representação matricial o espaço é dividido em células. Cada célula também chamada de *pixel* possui um número de linha, um número de coluna e um valor correspondente ao atributo (Câmara *et al.*, 2001). Exemplos de dados matriciais são as imagens de satélites, ortofotos, entre outros.

Quando se trata de SIG 3D, tanto as formas de representação dos objetos quanto a modelagem de dados seguem critérios específicos, uma vez que adotam o padrão CityGML (descrito na seção 3.3) e a linguagem *Unified Modeling Language* (UML), explicitada na seção 2.3.1. A modelagem numérica 3D de cidades envolve a modelagem geométrica, semântica e topológica. A modelagem geométrica tem como objetivo capturar a forma de um objeto; a modelagem semântica atribui propriedades significativas ao objeto, e a modelagem topológica analisa as relações entre os mesmos (Kim *et al.*, 2020).

2.3.1 Princípios da notação UML

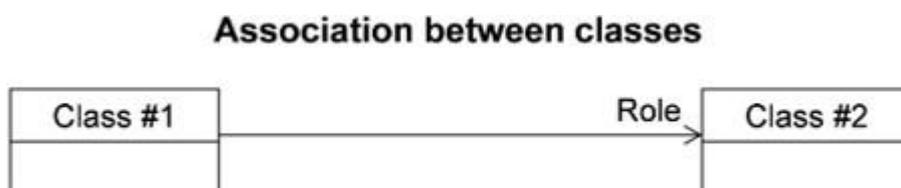
Podem ser utilizadas inúmeras linguagens para especificação de diagramas de classes na orientação a objetos. Neste trabalho será utilizada a notação gráfica do diagrama de classes UML, uma vez que representa a linguagem adotada pelo padrão CityGML.

De acordo com Lisboa Filho *et al.* (2000) os principais mecanismos de abstração presentes no formalismo da orientação a objetos são: classificação, associação, agregação e generalização/especialização. Os autores definem esses mecanismos como (Lisboa Filho *et al.*, 2000, p. 18):

- A classificação é o processo de abstração através do qual os objetos que representam elementos semelhantes têm suas propriedades descritas em uma única classe. Estas propriedades podem ser estáticas ou dinâmicas. Todo objeto é instância de uma classe. Todas as instâncias de uma classe possuem as mesmas propriedades estáticas (definidas como atributos da classe) e as mesmas propriedades dinâmicas (definidas como operações da classe);
- Associação é um tipo de abstração através do qual os relacionamentos entre objetos são especificados. A multiplicidade (ou cardinalidade) indica quantos objetos podem estar relacionados através dessa associação;
- A agregação representa um tipo especial de associação que descreve relacionamentos do tipo “é parte de”, no qual um objeto complexo é definido como uma agregação de suas partes (ou objetos componentes);
- Generalização é o processo de definir classes mais genéricas a partir de classes com características semelhantes.
- Especialização é o processo inverso, no qual classes mais específicas são detalhadas a partir de classes genéricas, adicionando-se novas propriedades na forma de atributos e/ou operações. Este tipo de abstração estabelece uma hierarquia na qual classes especializadas (denominadas subclasses) herdam as propriedades das classes genéricas (denominadas superclasses).

As notações gráficas do diagrama de classes UML, utilizadas no padrão CityGML, podem ser verificadas nas Figuras 3, 4, 5 e 6. É possível observar que todas as associações entre as classes no modelo conceitual CityGML são unidirecionais (Figura 3). Assim, as associações no modelo conceitual são navegáveis em apenas uma direção. A direção da navegação é representada por uma seta. Em geral, o contexto que um elemento assume dentro da associação é indicada pela sua função, que é exibida perto do destino da associação. No entanto, se a representação gráfica for ambígua, a posição deve ser desenhada para o elemento para o qual a associação aponta (Kolbe *et al.*, 2021).

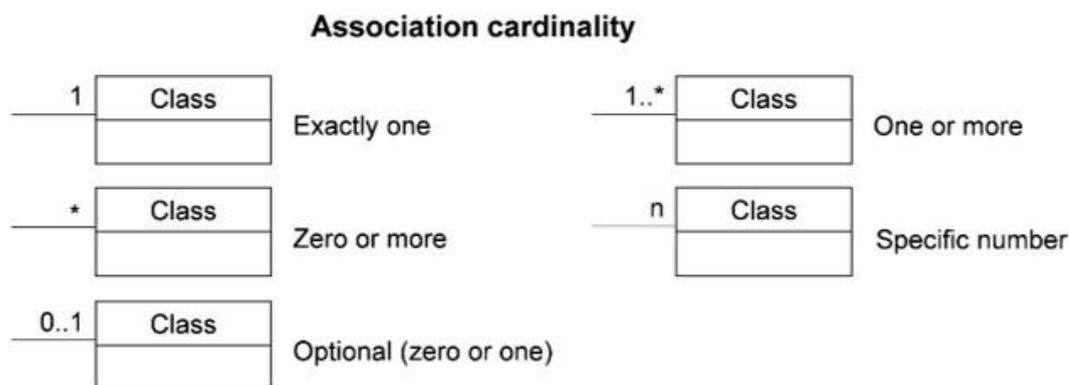
Figura 3 - Notação UML da associação entre classes



Fonte: Kolbe *et al.* (2021).

Os relacionamentos são caracterizados pela cardinalidade que representa o número de instâncias de uma classe que podem estar associadas a uma instância da outra classe (Borges, 2002). Assim, a Figura 4 indica que as associações das instâncias entre classes podem ocorrer a partir da seguinte notação: (1) exatamente um, (*) zero ou mais, (0..1) zero ou 1, (1..*) um ou mais, e (n) número determinado pelo usuário.

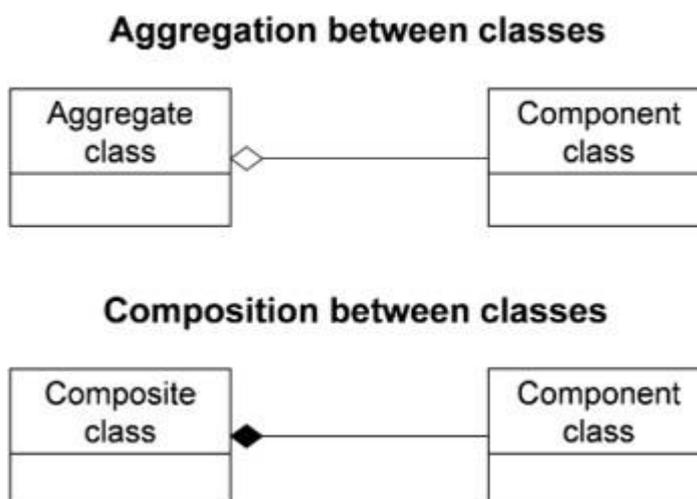
Figura 4 - Notação UML da Cardinalidade



Fonte: Kolbe *et al.* (2021).

Na Figura 5, observa-se que a agregação é representada com uma seta com losango vazado na ponta, enquanto a composição, com uma seta com losango preenchido na ponta, indicando os objetos que são compostos por objetos de outra classe.

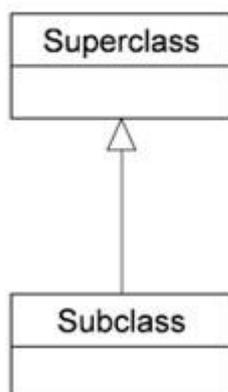
Figura 5 - Notação UML da agregação e composição entre classes



Fonte: Kolbe *et al.* (2021).

A herança de classes está relacionada com o processo de generalização/especialização, representado na Figura 6, que indica a partir de uma seta com triângulo vazado na ponta a superclasse que é especializada na subclasse.

Figura 6 - Notação UML da especialização entre classes

Class inheritance

Fonte: Kolbe *et al.* (2021).

2.4 BANCO DE DADOS

Os bancos de dados são construídos para atender a um objetivo específico, possuem um grupo de usuários definido e algumas aplicações preconcebidas, de acordo com os interesses desses usuários. Para criar um banco de dados é necessário especificar os tipos de dados, as estruturas e as restrições para os dados que serão armazenados no mesmo (Elmasri; Navathe, 2005).

Os dados em um banco estão fisicamente armazenados e são organizados por sistemas gerenciadores de bancos de dados (SGBD). SGBD é um software projetado para organizar o armazenamento e acesso de dados de forma eficiente e eficaz. As buscas para acesso aos dados são realizadas utilizando uma linguagem de consulta, chamada SQL, que consiste em uma forma padrão de consulta a bancos de dados.

O SGBD que suporta dados espaciais desempenha um papel central como plataforma de integração e manipulação de dados 2D e 3D georreferenciados, em vários cenários de aplicação. Este SGBD espacial estende os tradicionais SGBD, que lidam com dados alfanuméricos, incorporando tipos de dados espaciais e funções/operações nos tipos de dados suportados em seu modelo de dados (Li *et al.*, 2020).

As extensões espaciais para SGBD foram desenvolvidas em resposta aos novos requisitos para aplicações de geoinformação, entre eles, armazenar e gerenciar modelos de dados complexos, uma vez que, suporta todos os tipos de dados espaciais, linguagens de consulta espacial, além de fornecer meios para estrutura de indexação espacial de alta eficiência

e análises geométricas e topológicas. Portanto, as extensões espaciais de SGBD, como o Oracle Spatial¹⁷ do software comercial Oracle e o PostGIS¹⁸ do software de código aberto PostgreSQL¹⁹, desempenham um papel importante para os modelos geométricos e semânticos devido às suas extensas capacidades no manuseio de dados espaciais (Li *et al.*, 2020).

Existem sistemas gerenciadores de bancos de dados para diversas aplicações, havendo necessidade de definição de modelos conceituais e esquemas para estruturação de dados neles. O 3DCityDB é uma ferramenta muito utilizada na modelagem numérica 3D de cidades, principalmente por ser gratuita e de código aberto, e por permitir importar, gerenciar, analisar, armazenar, visualizar e exportar modelos geométricos e semânticos de acordo com o padrão CityGML (Yao *et al.*, 2018). Ele permite o uso dos SGBD Oracle e PostgreSQL com suas extensões espaciais, respectivamente Oracle Spatial e PostGIS.

O 3DCityDB usa esses SGBD espaciais como um banco de dados, acrescentando um esquema para modelos numéricos e semânticos de cidades, derivados do CityGML, e inclui todos os módulos temáticos do CityGML. Cada elemento é armazenado na tabela correspondente à classe pertencente ao módulo do CityGML, com a geometria, as informações semânticas e os relacionamentos topológicos que conectam os elementos (Kim *et al.*, 2020).

O 3DCityDB consiste em três componentes principais: o primeiro é o esquema, que representa propriedades espaciais e dados semânticos de modelos numéricos 3D de cidades, suporta os LOD0 à 4 da versão 2.0 do CityGML, dados de aparência, modelos digitais de terreno etc; o segundo corresponde à ferramenta Importer/Exporter usada para fazer *upload* e *download* de modelos em formatos como KML, COLLADA e glTF, além de validação XML de modelos geométricos e semânticos no padrão CityGML; e o terceiro componente, é o 3DCityDB-Web-Map-Client que serve como uma extensão do globo virtual de código aberto Cesium que permite importar e visualizar grandes modelos numéricos 3D de cidades (Hijazi *et al.*, 2020).

Uma questão importante a ser discutida, nesse caso, diz respeito ao modelo de dados do

¹⁷ É uma extensão espacial baseada nas especificações do OpenGIS e contém um conjunto de funcionalidades e procedimentos que permite armazenar, acessar, modificar e consultar dados espaciais de representação vetorial (Queiroz; Ferreira, 2005).

¹⁸ A extensão PostGIS permite o uso de dados espaciais como *Point*, *Linestring*, *Polygon*, *Multipoint*, *Multilinestring* e *Multipolygon* (Queiroz; Ferreira, 2005).

¹⁹ O PostgreSQL é um sistema gerenciador de banco de dados objeto-relacional, gratuito e de código fonte aberto, desenvolvido a partir do projeto Postgres, iniciado em 1986, na Universidade da Califórnia em Berkeley, sob a liderança do professor Michael Stonebraker (Queiroz; Ferreira, 2005).

CityGML, que é projetado com uma abordagem orientada a objetos e formulado em UML. Isso causa um problema de incompatibilidade ao tentar encaixar modelos no formato CityGML em SGBD padrão de mercado, que em geral tem estruturas relacionais ou objeto-relacionais, sem perda de informações. Essa questão pode ser solucionada transformando estes modelos, usando ferramentas como o 3DCityDB ou Feature Manipulation Engine (FME)²⁰ (Vitalis *et al.*, 2020).

Muitos trabalhos estão sendo desenvolvidos utilizando o 3DCityDB, a exemplo do Projeto Campus RoadMap, discutido por Fliegner *et al.* (2016), com o objetivo de reduzir o consumo de energia em um *campus* universitário. Prandi *et al.* (2015) também utilizaram o 3DCityDB no desenvolvimento e implantação de uma plataforma para armazenar, visualizar e analisar os modelos numéricos 3D de cidades, via *web*.

Collucci *et al.* (2018) apresentam um exemplo de integração de SIG e banco de dados, ao propor uma metodologia para representar igrejas relacionando características geométricas aos tipos de danos que podem ocorrer após um terremoto. Esta metodologia foi aplicada no estudo de caso da Igreja São Nicolau em Tolentino (Itália) utilizando o PostgreSQL (e sua extensão PostGIS) e o software QGIS²¹ para visualização do modelo numérico 3D.

É importante ressaltar que os SGBD possuem a capacidade de armazenar, recuperar e gerenciar dados. Enquanto os SIG apresentam recursos de edição dos dados, produção de mapas e análise de dados geográficos. Sendo assim, os bancos de dados estão sendo cada vez mais utilizados em conjunto com softwares SIG com o objetivo de, respectivamente, ampliar o gerenciamento dos dados geográficos e permitir análises espaciais detalhadas de maneira integrada.

²⁰ Software que permite conversão e transformação de dados para resolver problemas de interoperabilidade de dados, desenvolvido pela Safe Software.

²¹ O QGIS é uma ferramenta SIG que possibilita edição, visualização e análise de dados geográficos.

3 MODELAGEM GEOMÉTRICA E SEMÂNTICA PARA SIG 3D

Este Capítulo tem como objetivo abordar os principais temas relacionados à modelagem geométrica e semântica para SIG 3D como: diferentes técnicas de obtenção de dados, padrões e formatos de dados com ênfase para o padrão CityGML, suas extensões e aplicações e softwares usados para modelagem.

3.1 TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE DADOS PARA MODELAGEM

Atualmente existe uma grande variedade de técnicas para obtenção de dados usados para modelagem geométrica de cidades. Para obtenção de características físicas das edificações, por exemplo, podem ser utilizados alguns métodos de levantamento arquitetônico, como: medição direta, métodos topográficos, o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) ou sistema de navegação global por satélite, fotogrametria digital e varredura a laser (Groetelaars, 2015).

Dentre essas fontes de dados para modelagem geométrica de cidades, ressalta-se o uso do *Airborne Laser Scanning* (ALS)²², como uma tecnologia adequada para a captura de dados, tendo em vista a sua grande precisão e o curto tempo de trabalho em campo (Bobkowska *et al.*, 2017).

A varredura a laser é um sistema de captura de dados que permite a obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos da superfície terrestre e de objetos sobre ela. O processo baseia-se no tempo e na intensidade de emissão/retorno do pulso laser, que permite o cálculo da distância entre o ponto de reflexão do pulso e o sensor. Este sistema permite captar informações sobre o terreno, edificações, vegetação, vias, postes etc.

A nuvem de pontos consiste num tipo de representação eficaz, na medida em que a partir desta podem ser elaborados modelos digitais de terreno e modelos digitais de superfície. Estes dados podem ser utilizados em projetos voltados para elaboração e/ou atualização de mapas, obtenção da cota Z para criação de modelos geométricos de cidades e várias outras aplicações urbanas.

A produção de modelos digitais do terreno enfrenta um problema que consiste na identificação das feições que correspondem ao terreno e daquelas que estão acima deste, como

²² Trata-se de um sistema de varredura a laser aerotransportado (geralmente embarcado em uma aeronave), usado para medir a distância entre o sensor e a superfície terrestre.

as edificações e a vegetação. Uma das formas de obter a altura dos objetos que estão acima do terreno é realizar o processo conhecido como normalização do modelo digital de superfície, ou seja, calcular a diferença entre os valores para determinados pontos (que podem ser os centroides) com base no MDS e no MDT e assim obter as alturas de objetos como edificações, vegetação etc. (Centeno; Mitishita, 2007).

A escolha da técnica a ser utilizada está relacionada também ao nível de detalhe que se deseja alcançar. Os dados obtidos pela tecnologia ALS podem ser usados para gerar modelos geométricos compatíveis com os LOD0, 1 e 2, enquanto que os dados de fotogrametria de curta distância (ou terrestre) são mais adequados para gerar modelos geométricos detalhados nos LOD3 e 4 (Akmaliaa *et al.*, 2014).

3.2 PADRÕES E FORMATOS DE DADOS PARA MODELAGEM

Em relação aos formatos de dados para modelagem geométrica e semântica, Zlatanova *et al.* (2012) ressaltam alguns dos mais utilizados e suas características:

- O *Virtual Reality Modeling Language* (VRML) foi lançado em 1995 e aceito como padrão pelo consórcio Web 3D. Foi concebido como um padrão para a *web* visando a troca de dados gráficos e consiste em uma linguagem para modelar objetos 3D. Pelo fato de não ser baseado em *Extensible Markup Language* (XML), resulta em arquivos grandes para modelos numéricos 3D de cidades. Permite a manipulação de geometria e textura mas não armazena a semântica dos objetos.
- Após 1998, o consórcio Web 3D adotou o formato X3D baseado em XML, sendo um aprimoramento do VRML, apesar de ainda ser menos usado que esse. Poucos softwares disponíveis para visualização de dados gráficos na internet permitem a importação e a exportação no formato X3D. Quanto aos modelos numéricos 3D de cidades, o formato X3D permite o suporte à geometria, topologia e textura, mas, assim como o VRML não é capaz de armazenar a semântica dos objetos.
- O *Keyhole Markup Language* (KML) é codificado em XML, sendo usado para visualização de objetos 2D e 3D, no Google Maps e no Google Earth. O KML foi desenvolvido pela empresa Keyhole Inc., e que, posteriormente, foi adquirida pela Google. Entretanto, este formato só armazena informações semânticas básicas (por meio de atributos e descrições associadas aos objetos).
- O *Collaborative Design Activity* (COLLADA) constitui um formato de arquivo que

oferece recursos para armazenar geometria, topologia e textura, mas também não armazena a semântica dos objetos.

- O *Geography Markup Language* (GML), objeto da norma ISO 19136 (2020) é um padrão criado para a troca de dados espaciais empregando uma estrutura XML. O GML fornece classes para primitivas geométricas de 0D a 3D e apresenta referência espacial²³, temporal, topologia e semântica.

Saran *et al.* (2018) chamam a atenção para os diferentes formatos de dados que pertencem a cada domínio (CAD, Computação Gráfica - CG, BIM²⁴, SIG). Os formatos OBJ, DXF, 3DS e COLLADA²⁵ geralmente associados ao domínio CAD, podem ser usados para a modelagem geométrica e suas aplicações (inclusive visualização); os formatos VRML, X3D e COLLADA (do domínio CG) estão associados em sua maioria à visualização e representação para veiculação na *web*; IFC e GBXML (domínio BIM) são relacionados ao setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) e, por fim, os formatos GML, KML e CityGML, utilizados em SIG, possuem aplicações voltadas para renderização e troca de objetos 3D. Estas informações podem ser conferidas no Quadro 1.

²³ O termo referência espacial está relacionado à localização geográfica dos objetos com base em um sistema de coordenadas.

²⁴ BIM refere-se ao termo *Building Information Modeling* cuja tradução é Modelagem da Informação da Construção.

²⁵ O formato COLLADA pode estar associado tanto ao CAD quanto ao domínio CG.

Quadro 1 - Principais formatos de dados utilizados em cada domínio

Formatos	Domínios				
	CAD	CG	BIM	SIG	Web 3D
OBJ	✓				
DXF	✓				
3DS	✓				
COLLADA	✓	✓			
VRML		✓			
X3D		✓			
IFC			✓		
GBXML			✓		
GML				✓	
KML				✓	
CITYGML				✓	
WEBGL					✓
X3DOM					✓
HTML					✓

Fonte: Adaptado de Saran *et al.* (2018).

Existem softwares capazes de gerenciar e visualizar modelos geométricos e semânticos. No entanto, o desafio é publicar estes modelos diretamente na *web*, sem a necessidade de instalações adicionais. Tecnologias como padrões, formatos, bibliotecas e *plugins* para visualização 3D fazem parte da chamada Web 3D. Os mais significativos (Quadro 1), de acordo com Prieto *et al.* (2012), são: Web Graphic Library (WebGL), X3DOM²⁶ e HTML5²⁷. Muitos autores têm utilizado WebGL e X3DOM, como Rodrigues *et al.* (2013), na implementação de um SIG *Web 3D* com modelos no padrão CityGML, e Singh e Garg (2016), que desenvolveram um aplicativo para simulação de inundações.

O WebGL é um padrão *web* que pode ser usado por vários navegadores para uma API²⁸ de gráficos 3D. As bibliotecas WebGL que merecem destaque são: Three.js, Babylon.js, Scene.js, GLGE e X3DOM. Nenhuma destas bibliotecas requer a instalação de *plugins* para renderizar objetos 3D de cidade e realizar análises. Uma interface gráfica *web* pode ser

²⁶ É uma estrutura para integração e manipulação do padrão X3D para visualizar cenas 3D em ambiente *web*.

²⁷ HTML5 é um formato para desenvolver aplicações *web*, independentes de plataforma.

²⁸ *Application Programming Interface* (API) cujo termo em português foi traduzido como Interface de Programação de Aplicativos.

implementada para melhorar a representação, visualização e navegação de modelos geométricos e semânticos. Estas interfaces exploram a tecnologia de globo virtual, como Cesium, WebGL Earth e MapGL (Guney, 2016).

O globo virtual Cesium é uma plataforma de código aberto que possibilita a visualização de dados geográficos. Ele suporta visualização de terreno, camadas de imagens e geometrias 3D georreferenciadas e com texturas por meio do WebGL (Buyukdemircioglu; Kocaman, 2018).

O glTF (*GL Transmission Format*) pode ser usado para troca e carregamento eficiente de visualizações de modelos geométricos. Ele suporta os elementos básicos de cenas²⁹ 3D (hierarquia de nós, materiais, texturas, animação, câmeras, luzes), o que é suficiente para a maioria das aplicações. No entanto, ele não armazena informações semânticas (Schilling *et al.*, 2016). No domínio geoespacial, o Cesium adotou o glTF como formato de troca para edifícios e outros objetos 3D. Para incorporar o conteúdo CityGML no Cesium, pode ser utilizado o formato 3D Tiles e posteriormente convertido para o formato glTF. O formato 3D Tiles se apresenta como uma opção capaz de visualizar grandes volumes de modelos geométricos e semânticos 3D, com alto desempenho (Buyukdemircioglu; Kocaman, 2018).

3.3 CITYGML³⁰

O CityGML é um padrão de dados, baseado em XML, para armazenamento de modelos numéricos 3D de cidades. Ele é implementado como uma aplicação da *Geography Markup Language 3* (GML3), o padrão internacional extensível para codificação de dados espaciais emitido pelo Open Geospatial Consortium (OGC) e pela ISO TC211. Este padrão foi elaborado pelo Special Interest Group 3D (SIG3D), um grupo de trabalho que lida com questões relativas à modelagem, armazenamento, visualização e manipulação de dados espaciais 3D.

O padrão CityGML adota os diagramas da estrutura UML que apresenta os conceitos de classe e relacionamento. As associações entre os elementos do modelo CityGML são unidirecionais e a direção da navegação é representada por uma seta. O contexto que um elemento assume na associação é indicado por sua função.

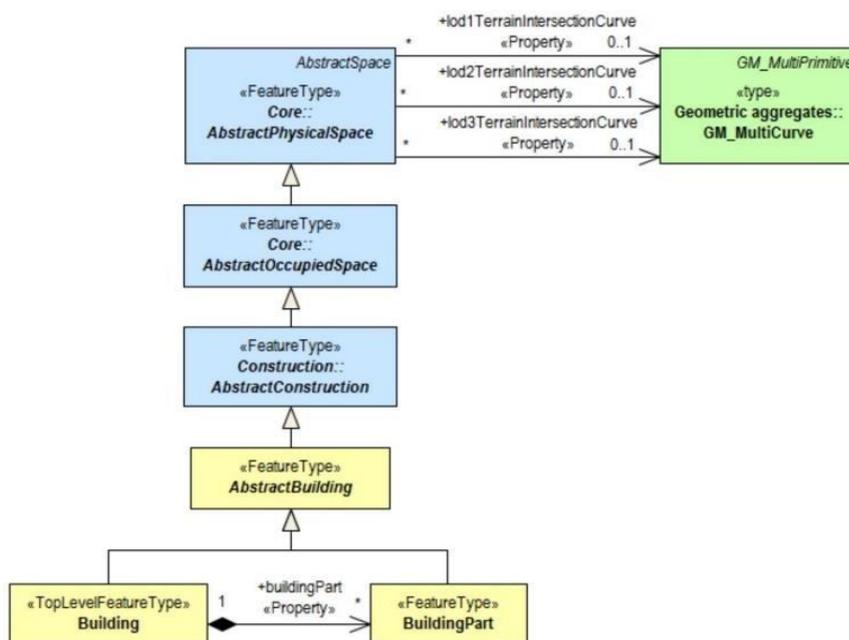
²⁹ Neste contexto cena está se referindo as visualizações de modelos numéricos 3D em páginas da *web*.

³⁰ O CityGML foi lançado na versão 1.0 em 2008, na versão 2.0 em 2012 e na versão 3.0 em 2021. Nesta tese foi utilizada a versão 2.0.

Nos diagramas UML usados no padrão CityGML, as classes são representadas em cores diferentes se pertencerem a classes de requisitos diferentes. As classes em amarelo pertencem à classe de requisitos, que é objeto de discussão na cláusula da especificação na qual o diagrama UML é fornecido. Por exemplo, no contexto do módulo *CityGML Core*, a cor amarela é usada para denotar classes definidas como requisitos do *CityGML Core* UML.

A cor azul designa uma classe de requisitos diferente daquela associada à cor amarela. Para indicar explicitamente a classe que pertencem, seus nomes são precedidos pelo pacote UML³¹ dessa classe de requisitos. No contexto do módulo *Building*, as classes do módulo *CityGML Core* estão na cor azul e seus nomes são precedidos pelo núcleo do prefixo *Core*. As classes em verde são definidas nas normas ISO 19107:2003, ISO 19111:2019 ou ISO 19123:2005. Seus nomes são precedidos pelo nome do pacote UML, no qual as classes são definidas (Kolbe *et al.*, 2021). É possível verificar na Figura 7, um exemplo de diagrama que demonstra a notação UML e o esquema de cores utilizado. A cor amarela está representando as classes associadas ao módulo *Building* do *CityGML*, a cor azul representando as classes *Core* e *Construction* e a cor verde representando uma geometria definida pela ISO 19107:2003.

Figura 7 - Exemplo de diagrama UML do padrão CityGML



Fonte: Kolbe *et al.* (2021).

³¹ Neste contexto, um pacote UML pode ser considerado como um agrupamento de elementos que estão relacionados no diagrama de classes UML.

Algumas características do padrão CityGML que merecem destaque estão relacionadas à: codificação, coordenadas, semântica, geometria e topologia. Quanto à codificação, o CityGML é um esquema para GML3, baseado em XML. Fornece uma definição comum de entidades básicas, atributos e relações de um modelo numérico 3D de cidade e possui uma representação que cria uma estrutura hierárquica que abrange recursos e atributos individuais (Salheb *et al.*, 2020).

No quesito coordenadas, no CityGML, elas pertencem a um sistema de referência de coordenadas mundial e as transformações locais não são permitidas, o que significa que a geometria pertence a exatamente um lugar fixo no espaço.

Quanto à semântica, os recursos no CityGML são uma abstração de objetos do mundo real e, semanticamente, são modelados por classes que são especificadas usando a notação UML. Essas feições geográficas podem ter um número arbitrário de atributos espaciais e não espaciais.

O modelo de topologia do GML permite estabelecer relações topológicas entre os objetos espaciais como por exemplo: adjacência, conectividade e fronteira.

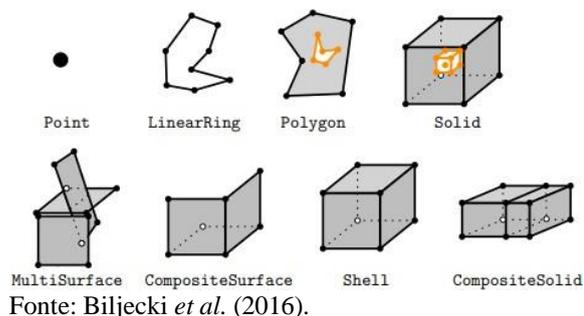
O modelo de geometria do CityGML, consiste nas seguintes primitivas geométricas: ponto (objeto com dimensão zero), curva (uma dimensão), superfície (duas dimensões) e sólido (três dimensões), bem como agregações (*MultiPoint*, *MultiCurve*, *MultiSurface*, *MultiSolid*) e compostos (*CompositeCurve*, *CompositeSurface*, *CompositeSolid*).

Desta forma, um sólido é formado por superfícies, que são compostas por curvas, que por sua vez são formadas por pontos. Em CityGML, uma curva é restrita a um seguimento de linha reta, e as superfícies são representadas por polígonos, que definem uma geometria plana, ou seja, o limite do polígono e todos os pontos internos devem estar localizados em um único plano.

As primitivas podem ser combinadas da seguinte forma: um agregado é um conjunto de primitivas de mesma dimensão que é usado para agrupar geometrias (Figura 8). O agregado mais relevante neste contexto é o *MultiSurface*, utilizado para representar geometria de edifícios. Um composto é uma coleção de primitivas que não podem se sobrepor e/ou serem desarticuladas, e cada aresta pode ter no máximo duas superfícies incidentes. Dentre os compostos destaca-se o *CompositeSurface*, que quando fechado (não há buracos na superfície)

é designado como um *shell* (Biljecki *et al.*, 2016).

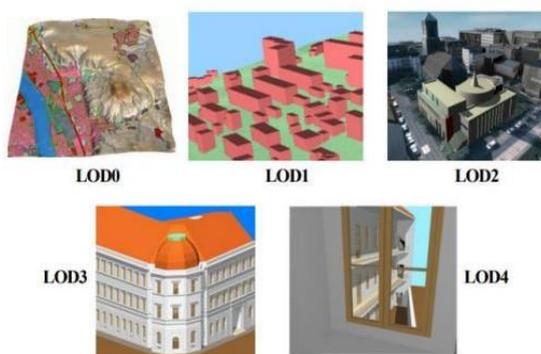
Figura 8 - Primitivas geométricas utilizadas no modelo CityGML



3.3.1 CityGML 2.0

Na versão 2.0, o CityGML suporta diferentes níveis de detalhe e estes podem variar do LOD0 ao LOD4. No LOD0 (menor nível de detalhe), o modelo representa apenas a superfície do terreno em grandes extensões, na escala da cidade; no LOD1, as edificações são representadas pela extrusão do perímetro externo da mesma (*footprint*); no LOD2, as características do exterior das edificações, como formato do telhado e texturas, podem estar presentes; no LOD3, representa-se a escala da edificação, na qual verifica-se um melhor detalhamento da parte externa da mesma, com modelagem de saliências e outros detalhes; e no LOD4, representa-se a parte interna das edificações, como divisões internas e seus equipamentos, com riqueza de detalhes e semântica. Essa representação pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Os cinco níveis de detalhes



Fonte: Groger *et al.* (2012).

O CityGML 2.0 possui 14 módulos temáticos: núcleo, aparência, pontes, edificações, mobiliário urbano, grupo de objetos, genérico, uso da terra, relevo, transportes, túneis, vegetação, corpos d'água e superfície texturizada, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Módulos e campos temáticos do CityGML 2.0

Módulos	Descrição
<i>CityGML Core</i>	Define os componentes básicos do modelo de dados do padrão CityGML.
<i>Appearance</i>	Fornecer os recursos para modelar a aparência dos objetos CityGML, ou seja, as propriedades visuais da superfície dos objetos.
<i>Bridge</i>	Permite a representação de aspectos espaciais e temáticos das pontes e seus componentes, em quatro níveis de detalhe (LOD1-4).
<i>Building</i>	Permite representar aspectos espaciais e temáticos das edificações, e seus componentes, em cinco níveis de detalhe (LOD0-4).
<i>CityFurniture</i>	Usado para representar o mobiliário urbano das cidades.
<i>CityObjectGroup</i>	Permite definir grupos de objetos diversos, que constituem um modelo parcial da cidade.
<i>Generics</i>	Fornecer extensões genéricas para o modelo de dados CityGML, que podem ser usadas para modelar características não abrangidas pelas classes temáticas predefinidas do padrão CityGML.
<i>LandUse</i>	Permite a representação de áreas da superfície da terra dedicadas a um uso da terra específico.
<i>Relief</i>	Permite a representação do terreno num modelo de cidade.
<i>Transportation</i>	Usado para representar as características de transportes da cidade, por exemplo, vias, caminhos, ferrovias ou praças.
<i>Tunnel</i>	Facilita a representação dos aspectos espaciais e temáticos dos túneis e os seus componentes, em quatro níveis de detalhe (LOD1-4).
<i>Vegetation</i>	Fornecer as classes temáticas para representar os objetos da vegetação, isolados ou contínuos.
<i>WaterBody</i>	Representa a geometria 3D e os aspectos temáticos dos rios, canais, lagos e bacias.
<i>TexturedSurface</i>	Permite a atribuição de propriedades visuais, aparência e texturas, para as superfícies dos objetos 3D.

Fonte: Amorim (2016), adaptado de OGC (2012).

Vários estudos foram realizados em diversas cidades do mundo utilizando o padrão CityGML para modelagem numérica 3D de cidades. Dentre eles, destaca-se um estudo que contemplou seis das maiores cidades da Finlândia: Helsinque, Espoo, Tampere, Vantaa, Turku e Oulu e inclui informações sobre os softwares usados na construção dos modelos das cidades, os níveis de detalhe e formas de visualização (Julin *et al.*, 2018). Dentre estes modelos numéricos 3D de cidades, destaca-se o de Helsinque, pois desde a década de 1980 vinham sendo desenvolvidos modelos geométricos da mesma, culminando com o lançamento do modelo

numérico 3D da cidade, baseado no padrão CityGML³², em 2017.

Groger e Plumer (2012) relatam a construção de modelos numéricos 3D de cidades europeias. Na Alemanha, muitos municípios possuem modelos compatíveis com LOD2, sendo que os modelos de Berlim, Colônia, Dresden, Dusseldorf e Munique são compatíveis com o LOD3.

Ainda, segundo esses autores, cidades como Mônaco, Genebra, Zurique, Leeuwarden e algumas cidades na Dinamarca usam o padrão CityGML para modelagem em LOD2 ou 3. Por fim, na Ásia também existem modelos numéricos 3D de cidades no padrão CityGML: Istambul (Turquia) em LOD1 e 2; Yokohama (Japão) em LOD2, e Doha (Katar) em LOD3.

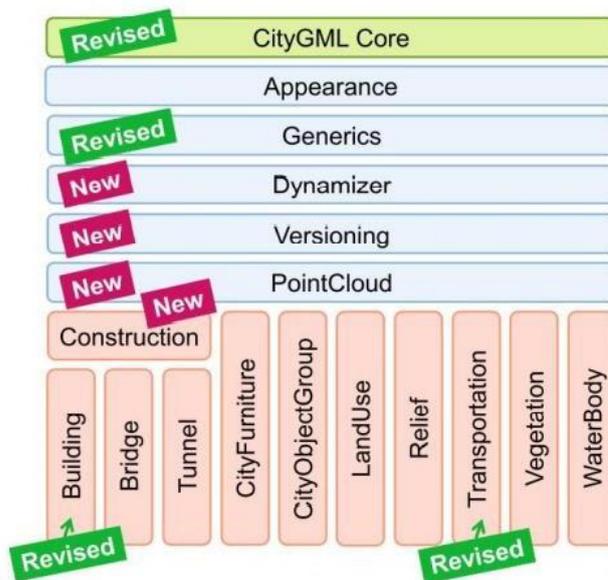
3.3.2 CityGML 3.0

As principais alterações realizadas na versão 3.0 do CityGML em comparação com a 2.0 estão relacionadas a: um novo conceito de espaço; um conceito revisado de LOD; uma representação de propriedades dependentes do tempo; um gerenciamento de várias versões de cidades; uma opção de utilizar nuvens de pontos; à possibilidade de uma modelagem mais aprimorada de construções e transportes, entre outros.

Assim, o CityGML 3.0 define os 17 módulos temáticos, conforme representados na Figura 10. Todos os módulos do CityGML 2.0 fazem parte do CityGML 3.0, sendo eles: *Core*, *Appearance*, *Generics*, *Building*, *Bridge*, *Tunnel*, *CityFurniture*, *CityObjectGroup*, *LandUse*, *Relief*, *Transportation*, *Vegetation* e *WaterBody*. Destes módulos, o *Core*, *Generics*, *Building* e *Transportation* passaram por revisões. E outros módulos foram criados, a exemplo de: *Dynamizer*, *Versioning*, *PointCloud* e *Construction*.

³² Os dados utilizados na construção do modelo, compatível com o LOD2 do CityGML estão disponíveis no portal de informações públicas de Helsinque [*Helsinki Region Infoshare* (HRI) https://hri.fi/data/en_GB/dataset].

Figura 10 - Visão geral dos módulos do CityGML 3.0



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

De forma resumida, é possível destacar os seguintes pontos do CityGML 3.0³³, de acordo com Kutzner *et al.* (2020):

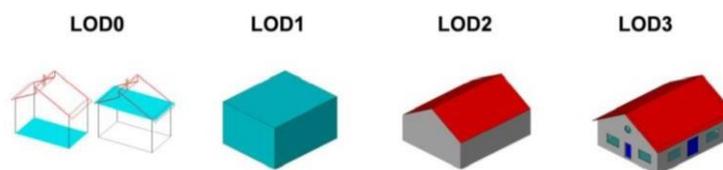
- O modelo de dados do CityGML 3.0 também é baseado nos padrões da série ISO 19100, relacionados a informações geográficas. Isso significa que os tipos de geometria da ISO 19107, bem como os tipos de dados da ISO 19103 são usados e que as regras para definir esquemas de aplicação em UML da ISO 19109 são aplicadas. Além disso, as regras de transformação para converter modelos UML em esquemas de aplicativo GML da ISO 19136 são aplicadas na codificação GML.
- No Conceito de Espaço³⁴ do CityGML 3.0, uma distinção semântica de características espaciais é introduzida mapeando todos os objetos da cidade nos conceitos semânticos de espaços e limites espaciais.
- O Conceito de LOD foi revisado, compreendendo uma definição central de todas as geometrias no módulo *Core* e a representação do interior dos objetos da cidade em qualquer nível de detalhe. O LOD4, usado para representar o interior de objetos no CityGML 2.0, foi removido e apenas os LOD0, 1, 2 e 3 permanecem (Figura 11). Desta forma, elementos internos e externos podem ser representados espacialmente nos LOD0

³³ Para mais informações, consultar o modelo conceitual do CityGML 3.0, que está disponível em: <https://docs.ogc.org/is/20-010/20-010.html#toc47>.

³⁴ No CityGML 3.0 um Espaço é uma entidade de extensão volumétrica no mundo real.

a 3, como por exemplo, a casca externa de um edifício pode ser representada espacialmente em LOD2 e elementos internos como salas, portas e corredores em LOD1. Por fim, os níveis de detalhe não estão mais associados ao grau de decomposição semântica dos objetos e referem-se apenas às representações espaciais, isso implica, por exemplo, que edificações podem ter superfícies temáticas como *WallSurface* e *GroundSurface* também nos LOD0 e 1, que no CityGML 2.0 eram permitidas apenas a partir do LOD2 (Kolbe *et al.*, 2021).

Figura 11 - Representação de uma edificação no CityGML 3.0



Fonte: Kolbe *et al.* (2021).

- O novo módulo *Construction* define os conceitos comuns a todos os tipos de construções feitas pelo homem, como prédios, pontes e túneis.
- Suporte para as variações de tempo com a inserção de dois novos conceitos (módulo *Versioning* e módulo *Dynamizer*) para gerenciar propriedades dependentes do tempo. O módulo *Versioning* gerencia mudanças qualitativas, por exemplo a história ou evolução das cidades, como construção ou demolição de edifícios. O módulo *Dynamizer* gerencia mudanças quantitativas que representam variações dinâmicas ou frequentes das propriedades do objeto, por exemplo, variações de atributos temáticos, como mudanças de quantidades físicas (demanda de energia, temperatura, níveis de irradiação solar).

É possível realizar a conversão dos modelos CityGML 2.0 para 3.0 aplicando transformações sintáticas. Um exemplo é a ferramenta usada para conversão ‘citygml2 to citygml3’ fornecida pelo TUM-GIS, baseada em *Extensible Stylesheet Language Transformations* (XSLT). O XSLT é um padrão para filtrar, classificar e formatar dados XML e que fornece a compatibilização dos modelos CityGML nas diferentes versões, sem perdas de dados (Kutzner *et al.*, 2020).

3.4 EXTENSÕES E APLICAÇÕES DO CITYGML

Além dos módulos básicos previstos no padrão CityGML foram criadas extensões denominadas *Application Domain Extension* (ADE), que podem ser de dois tipos: aquelas que são desenvolvidas para dar suporte a aplicações, ou as extensões genéricas que complementam o CityGML, sem uma aplicação específica. Assim, ADE é uma extensão do modelo CityGML padrão, criada para atender a determinado objetivo e simboliza um mecanismo para enriquecer o modelo de dados com novas classes e atributos, preservando a estrutura semântica do CityGML (Biljecki *et al.*, 2018).

Uma extensão pode ser especificada com um arquivo de definição de esquema XML ou com os diagramas *Unified Modeling Language* (UML). Van den Brink *et al.* (2013) descrevem seis maneiras diferentes de criar uma extensão usando UML. O esquema XML para uma ADE pode ser gerado a partir do modelo UML usando a ferramenta ShapeChange³⁵.

Van den Brink *et al.* (2013) demonstram a modelagem do padrão nacional 3D da Holanda (IMGEO) como uma extensão do CityGML. Após analisarem seis alternativas para modelagem de uma ADE em UML, chegaram à conclusão de que a melhor abordagem consiste em adicionar propriedades em uma subclasse no pacote ADE, mas suprimir essa subclasse do esquema XML gerado. Assim, a classe seria marcada com extensão ADE no modelo UML usando um estereótipo³⁶. Neste caso, são apontadas como vantagens dessa abordagem:

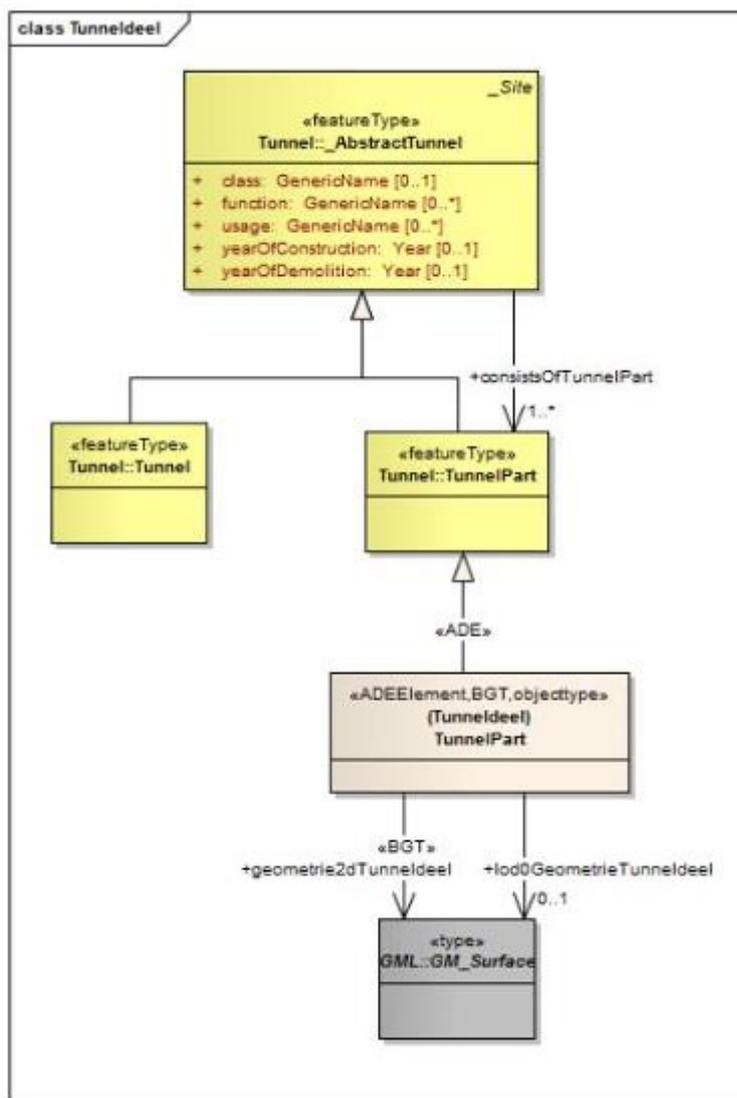
- O fato do IMGEO ser uma extensão do CityGML e ser apropriado definir classes como subclasses do CityGML;
- O uso de subclasses é compreensível por pessoas com conhecimentos básicos em diagramas de classes UML;
- A abordagem realizada está em conformidade com as regras da UML da série ISO 19100 e OGC;
- A abordagem foi a mais alinhada com a modelagem de informações da Holanda.

³⁵ShapeChange é uma ferramenta baseada em JAVA que implementa as regras de codificação UML para GML descritas nas normas ISO 19136, 19118 e 19109.

³⁶ Estereótipos são metapropriedades de classe, atributos e associações usados para estender semanticamente a UML para domínio específico. Nos diagramas, eles são mostrados entre colchetes no elemento ao qual se aplicam.

É possível verificar na Figura 12, que as classes amarelas são parte do pacote CityGML *Tunnel*. O estereótipo <<ADEElement>> *TunnelPart* é uma classe definida no pacote IMGEO ADE como subclasse da classe *TunnelPart*.

Figura 12 - Classe e subclasse *TunnelPart*

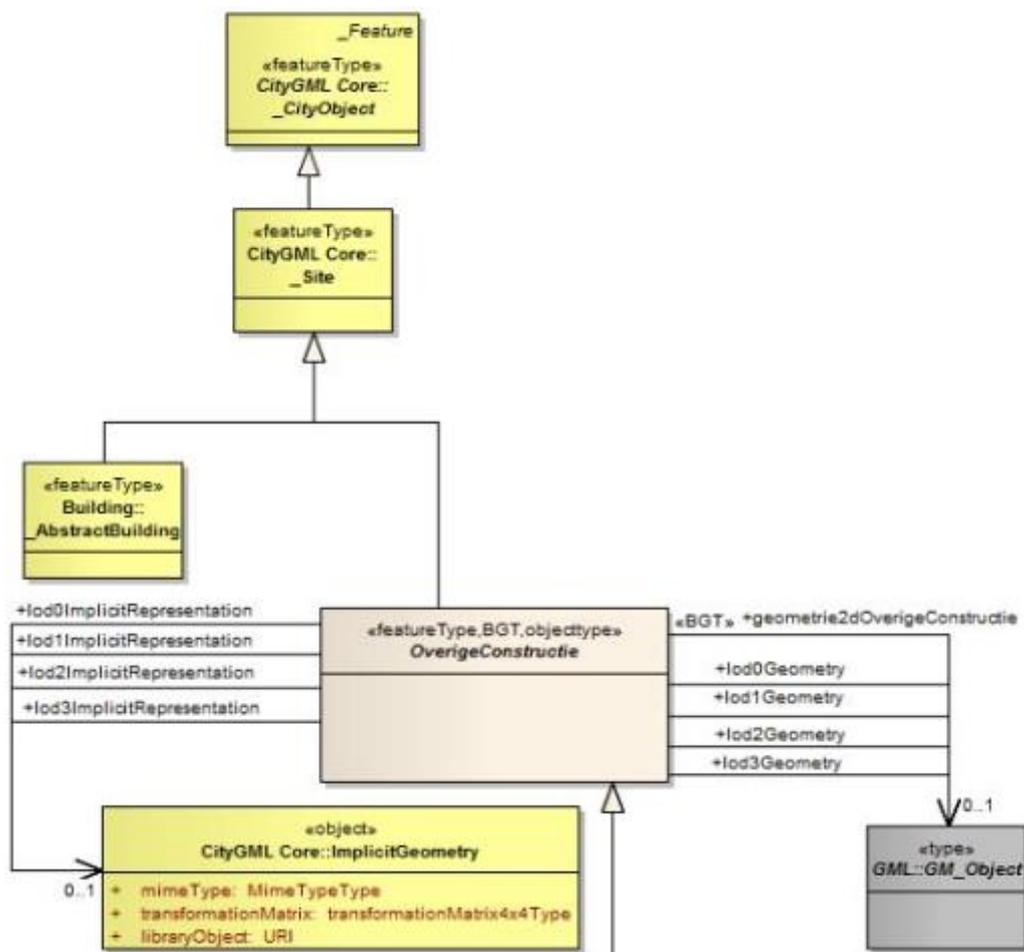


Fonte: Van den Brink *et al.* (2013).

Caso não seja possível remodelar o conceito em uma classe CityGML, será estendido como uma nova. Adicionando uma classe nova e não apenas propriedades a uma já existente, essa é modelada como uma subclasse de uma classe CityGML com estereótipo <<featureType>> e não é suprimida no esquema XML. É possível verificar esse caso na Figura 13, que mostra ‘*OverigeConstructie*’ que é um exemplo de classe não disponível na versão 2.0 do CityGML, usada para representar construções feitas pelo homem além de edificações, pontes e túneis.

Assim, a classe ‘*OverigeConstructie*’ é modelada como uma subclasse com estereótipo <<featureType>> da classe CityGML *Site*, que não é suprimida do esquema XML.

Figura 13 - Nova classe adicionada derivada da classe *Site*



Fonte: Van den Brink *et al.* (2013).

As extensões contemplam várias áreas, com destaque para: energia, patrimônio cultural, ambientes internos, transportes e metadados 3D. A lista de extensões adaptada de Biljecki *et al.* (2018), está expressa no Quadro 3.

Quadro 3 - Extensões (ADE) do CityGML

Nº	Extensão	Tipo	Origem
1	<i>Energy ADE</i>	Aplicação	Europa
2	<i>Energy Efficiency ADE</i>	Aplicação	Itália
3	<i>Energy Efficiency ADE (ii)</i>	Aplicação	Espanha
4	<i>Noise ADE</i>	Aplicação	Alemanha

Nº	Extensão	Tipo	Origem
5	<i>Extend Noise ADE</i>	Aplicação	Países Baixos
6	<i>Road Traffic Noise ADE</i>	Aplicação	Índia
7	<i>Robotics ADE</i>	Aplicação	Japão
8	<i>Utility Network ADE</i>	Aplicação	Alemanha
9	CAFM ADE	Aplicação	Alemanha
10	<i>Immovable Property Taxation ADE</i>	Aplicação	Turquia
11	<i>Cadastral ADE</i>	Aplicação	Países Baixos
12	CityGML-LADM ADE	Aplicação	Mista
13	<i>Cultural Heritage ADE</i>	Aplicação	Espanha
14	<i>Cultural Heritage ADE (ii)</i>	Aplicação	Itália
15	<i>Cultural Heritage ADE (iii)</i>	Aplicação	Itália
16	<i>Heritage house ADE</i>	Aplicação	Malásia
17	<i>Intervention ADE</i>	Aplicação	Espanha
18	BCH Management ADE	Aplicação	Bélgica
19	<i>Indoor N&P ADE</i>	Aplicação	Índia
20	<i>Indoor ADE</i>	Aplicação	Korea
21	i-SCOPE	Aplicação	Europa
22	<i>HydroADE</i>	Aplicação	Alemanha
23	AR ADE	Aplicação	Canada
24	Collada FX ADE	Aplicação	Alemanha
25	ENC ADE	Aplicação	Alemanha
26	<i>Air Quality ADE</i>	Aplicação	Itália
27	IMGeo ADE	Genérico	Países Baixos
28	CityGML-TRKBIS	Genérico	Turquia
29	INSPIRE ADE	Genérico	Alemanha
30	<i>ACRoofADE</i>	Genérico	China
31	CityGML iTINs ADE	Genérico	Países Baixos
32	<i>Vegetation Objects ADE</i>	Genérico	México
33	<i>Dynamizers</i>	Genérico	Alemanha
34	<i>Dynamic ADE</i>	Genérico	Espanha
35	<i>Geodata Join ADE</i>	Genérico	Alemanha
36	<i>Topo ADE</i>	Genérico	China
37	<i>Transport ADE</i>	Genérico	Países Baixos
38	<i>Traffic Sign ADE</i>	Genérico	Espanha
39	3D-GEM	Genérico	Países Baixos
40	<i>New LOD ADE</i>	Genérico	Países Baixos

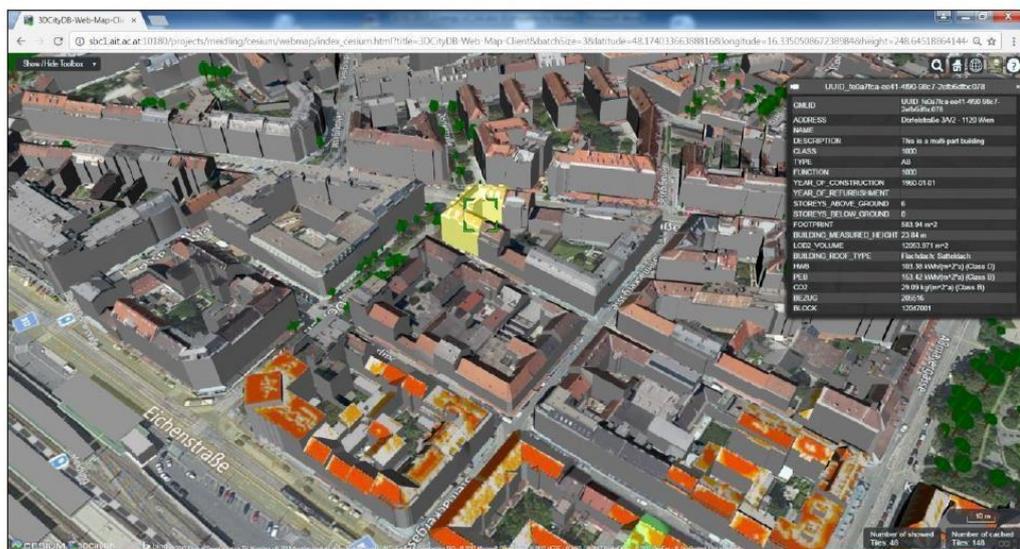
Nº	Extensão	Tipo	Origem
41	<i>Semantic City Model</i>	Genérico	China
42	GeoBIM	Genérico	Países Baixos
43	<i>PANTURA ADE</i>	Genérico	Países Baixos
44	<i>3D Metadata ADE</i>	Genérico	Países Baixos

Fonte: Adaptado de Biljecki *et al.* (2018).

Neste contexto, Agugiaro *et al.* (2017) abordam o Projeto CI-ENERGY ‘Cidades inteligentes com sistemas de energia sustentável’, que visa desenvolver métodos e ferramentas de modelagem, simulação e otimização do uso de energia (uso racional da energia) para apoiar a tomada de decisões no planejamento urbano. O projeto CI-ENERGY utiliza as extensões do CityGML: *UtilityNetwork* que permite modelar gás e efluentes, redes de aquecimento/resfriamento urbano ou redes de eletricidade urbana em 3D, e a extensão *Energy*, que realiza simulações do consumo de energia para áreas urbanas.

O projeto usou como exemplo Viena, pois desde 2014 esta cidade adotou a estratégia Smart City Wien, que enfatiza o fornecimento sustentável de energia por meio da conservação e uso inteligente dos recursos, definindo metas para diferentes áreas, como eficiência energética, energias renováveis, infraestrutura, mobilidade e edifícios. Em 2015, um grande número de dados (espaciais e não-espaciais) foi coletado para toda a cidade, contendo informações temáticas como endereço, número de pavimentos, uso etc. Um trecho do modelo numérico 3D de Viena é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Trecho do modelo numérico 3D de Viena

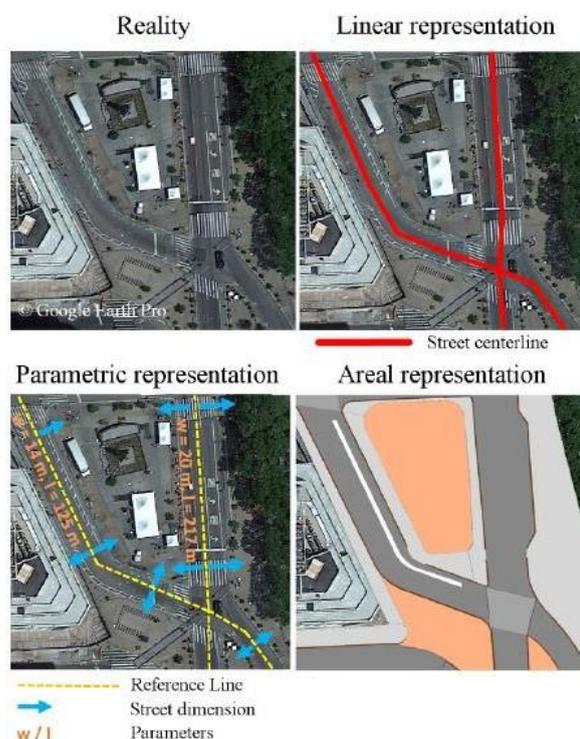


Fonte: Agugiaro *et al.* (2017).

Beil e Kolbe (2017) analisaram diferentes representações para elementos do módulo Transportes do CityGML. Eles identificaram que a maioria dos modelos geométricos e semânticos, conforme Figura 15, possui apenas o eixo da via em uma representação linear, ou a variação dos parâmetros da via em uma representação paramétrica. No entanto, é necessário o uso de modelos geométricos e semânticos mais detalhados que apresentem informações como: pontos de ônibus, larguras de ruas e sinalizações viárias.

Estes modelos geométricos e semânticos mais detalhados do módulo transportes possuem várias aplicações como: condução autônoma; simuladores de direção; simulações de fluxos de pedestres; planejamento de sinais e semáforos; simulação de transporte de carga pesada; aumento da segurança no trânsito (dados de comprimento e largura de determinada rua podem ser usados para ajudar os motoristas em ultrapassagens); treinamento de motorista; identificação de vias de uso exclusivo de determinados tipos de veículos; planejamento de rotas sem barreiras, a fim de ajudar as pessoas com dificuldades de mobilidade, dentre outras.

Figura 15 - Comparação entre os diferentes tipos de representação



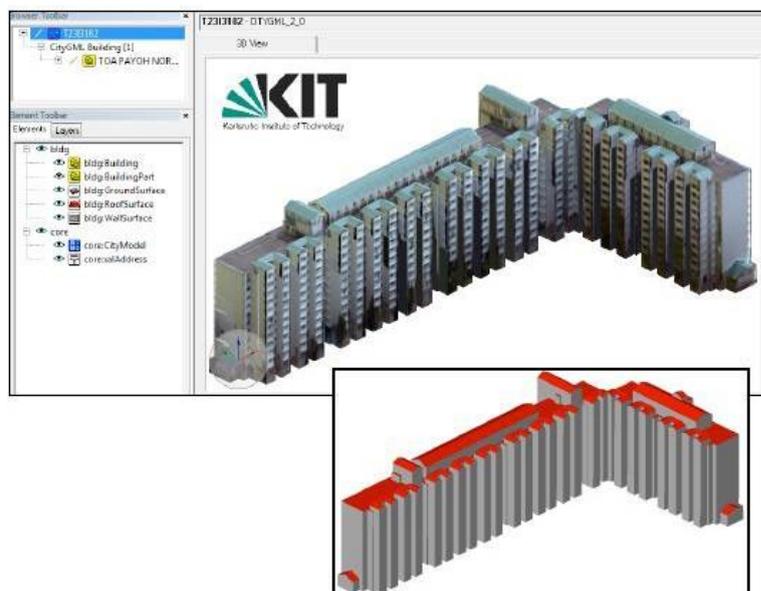
Fonte: Beil e Kolbe (2017).

Soon e Kloo (2017)³⁷ descreveram um projeto desenvolvido em Cingapura, desde 2014, para mapeamento, criação e manutenção de um mapa nacional 3D no padrão CityGML. Este projeto implementou oito módulos temáticos previstos no CityGML 2.0, sendo eles: relevo, edificações, vegetação, corpos d'água, transporte, mobiliário, ponte e túnel.

O relevo foi criado a partir de nuvens de pontos no LOD0. Os modelos geométricos de edificações no LOD2 foram gerados a partir de imagens aéreas e nuvem de pontos (Figura 16). Seus atributos incluem: uso e função do edifício. O módulo de transportes foi expresso em diferentes LOD. No LOD1 inclui somente as vias e no LOD2 inclui outros elementos como: meio-fio, estacionamento e áreas verdes. Os modelos geométricos no projeto são divididos em pontes e passarela para pedestres em LOD2. Os túneis foram modelados em LOD2 a partir da coleta de dados móveis de veículos dirigidos através do próprio túnel.

Como não foram coletados dados de batimetria para corpos d'água, estes foram modelados em LOD1 assumindo profundidade de 5,00 m para todos os corpos d'água. Por fim, a vegetação foi modelada em LOD1, considerando as árvores com alturas entre 15 e 20 m.

Figura 16 - Edificações em LOD2



Fonte: Soon e Kloo (2017).

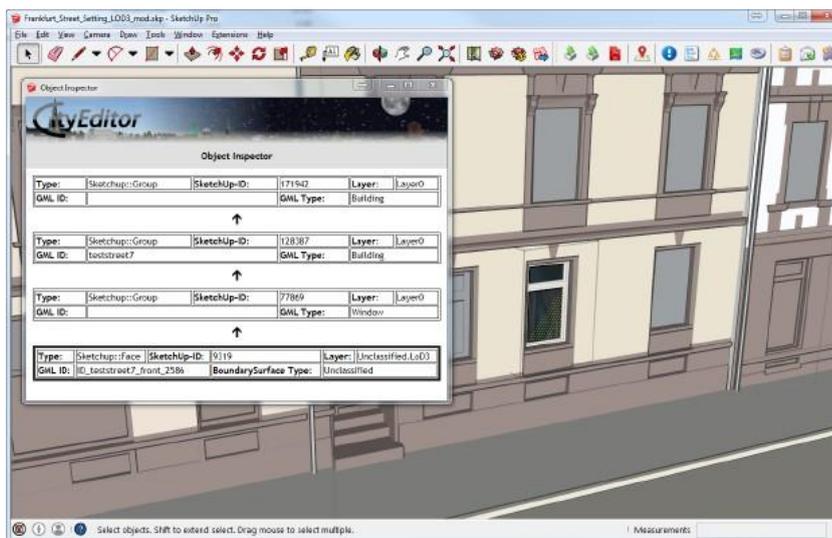
³⁷ No artigo citado não foi explicado como ocorre a atualização dos modelos do projeto. No entanto, essas atualizações devem ser previstas no banco de dados de acordo com as necessidades de cada projeto.

3.5 SOFTWARES USADOS NA MODELAGEM GEOMÉTRICA

Na literatura são encontrados diversos softwares para modelagem geométrica de cidades como o SketchUp e seu *plugin* CityEditor, o CityEngine e o Rhinoceros com os *plugins* Heron, Meerkat e Rhinocity. E atualmente estão sendo usados também softwares SIG como QGIS e o SuperMap para modelagens geométricas.

O SketchUp (Trimble) é um programa para modelagem geométrica, e seu *plugin* CityEditor (Figura 17) permite a importação, edição e exportação de modelos CityGML. Esta ferramenta importa: modelos CityGML; modelos digitais de terreno; texturas; dados vetoriais (ponto, linha e polígono) em formato SHP, DXF, GML, JSON, GEOJSON; nuvem de pontos e modelos digitais de superfícies no formato PLY e OBJ. Possibilita a edição, adição e exclusão de atributos para edifícios e superfícies e a exportação de objetos para modelos CityGML (3DIS, 2016).

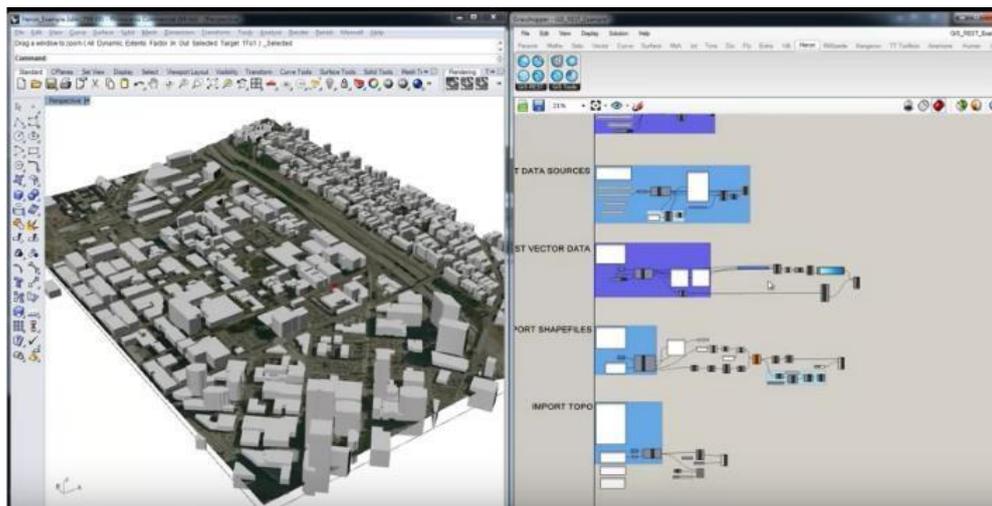
Figura 17 - Interface do *plugin* CityEditor



Fonte: 3DIS (2016).

O Grasshopper é um *plugin* do Rhinoceros (Rhino Software) e tem sido usado para diversas aplicações, inclusive aquelas denominadas de ‘urbanismo paramétrico’. Para a modelagem numérica 3D de cidades podem ser utilizados os *add-on* Heron e Merkat (que são *plugins* do Grasshopper), que permitem a importação de dados em formato *shapefile* (SHP), um dos formatos mais populares em SIG, e possibilitam a extrusão dos polígonos das edificações a partir da altura das mesmas, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Interface do *plugin* Heron do Grasshopper



Fonte: Washburn (2014).

Por sua vez, o CityEngine é um software da ESRI para modelagem urbana que possui integração com as ferramentas SIG. Ele utiliza a linguagem de programação *Computer Generated Architecture* (CGA) para gerar modelos geométricos e semânticos através de um conjunto de regras pré-definidas. O CityEngine importa diretamente dados em formato *shapefile* (SHP), *geodatabase* (GDB), KML e OpenStreetMap (OSM). A interface desse software pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 - Interface do CityEngine



Fonte: Canal CityEngineTV (2014).

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando softwares para planejamento urbano, urbanismo paramétrico e modelagem paramétrica. Estudos com o *plugin* CityEditor foram realizados por Wendel *et al.* (2017), que testaram diferentes metodologias para a geração de modelos numéricos 3D de cidades a partir de dados abertos disponíveis na internet. Eles usaram o CityEditor para exportar os modelos diretamente no formato CityGML.

Utilizando o software Rhinoceros, Chen *et al.* (2017) verificaram os resultados de modelagens numéricas 3D de cidades de forma automática. O Rhinoceros através de seu *plugin* Grasshopper também foi utilizado por Santos *et al.* (2016) com o objetivo de realizar a modelagem geométrica de edificações de um bairro em São Paulo por meio de um arquivo *shapefile*.

Experimentos realizados com o software CityEngine podem ser verificados em Santana *et al.* (2013) e Lima e Freitas (2015) que fizeram simulações para identificar como seriam as formas urbanas edificadas se todas as construções obedecessem a lei urbanística vigente nas cidades de Belo Horizonte e Fortaleza, respectivamente.

Recentemente dois softwares SIG têm apresentado potencialidades para desenvolver modelagens geométricas. Estes são o QGIS e o SuperMap. O QGIS é um software SIG de código aberto, licenciado segundo a Licença Pública Geral (GNU) e é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Permite a importação, manipulação e exportação de dados em inúmeros formatos vetoriais e matriciais. Recentemente vem se destacando, a partir da versão 3.0, com seu *plugin* CityJSON (que usa a codificação JSON) com base no modelo de dados do CityGML (Figura 20), possibilitando suporte à visualização de modelos numéricos 3D de cidades (Vitalis *et al.*, 2020).

Figura 20 - Trecho de Helsinque visualizado no QGIS



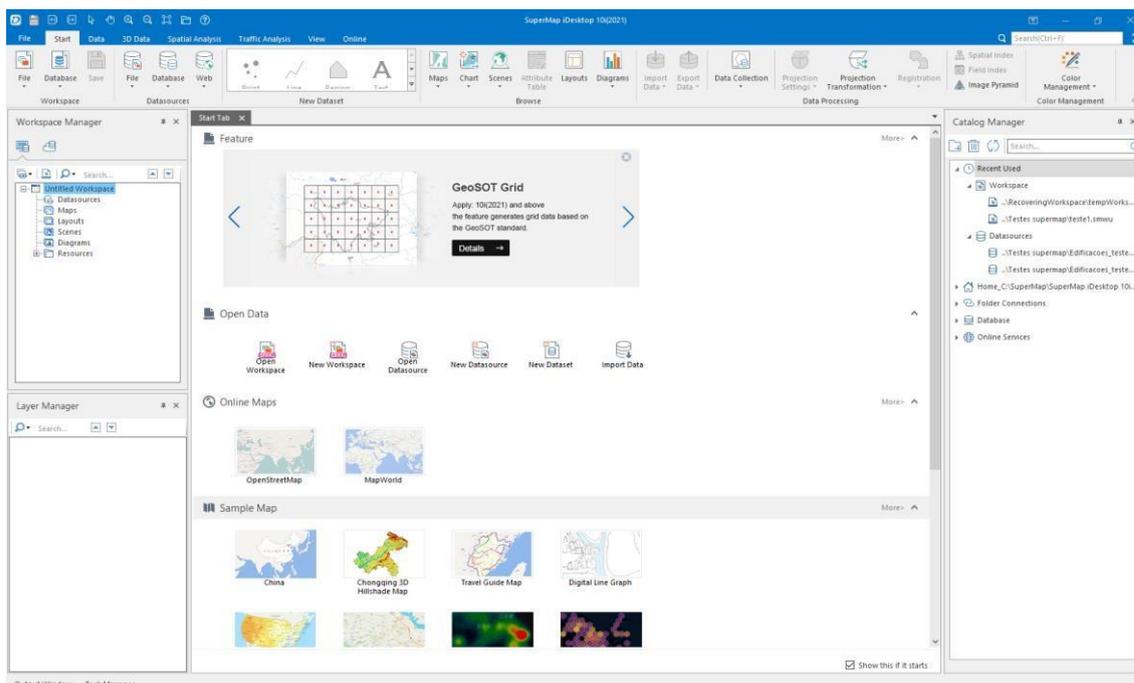
Fonte: Vitalis *et al.* (2020).

O SuperMap pertence à empresa SuperMap Software Co. É uma empresa especializada em SIG e serviços de localização, com sede em Pequim (China). A versão SuperMap *desktop* (Figura 21) apresenta opções de criação de ‘mapas 2D e 3D’ e possibilita análises espaciais. Permite uso de dados vetoriais e matriciais, visualização, mudança de estilo (cor, forma), criação de mapas temáticos e geração de *layouts*.

Como análises básicas, permite consultas espaciais em SQL, criação de *buffers*, identificação de feições sobrepostas, proximidade, estrutura e análise de rede; uso de mapas *online* que servem de base como: Google Maps, Google Earth e OpenStreetMap e ainda outras análises mais avançadas como os diagramas de voronoi (Polígonos de Thiessen).

Quanto ao uso de dados 3D, no SuperMap é possível importar objetos em três formatos principais: 3DS, IFC e SKP. Também importa modelos BIM e CityGML em diferentes níveis de detalhe. Possibilita extrusão de polígonos a partir da altura, visualização de atributos das feições 3D, e aplicação de texturas.

Figura 21 - Interface do SuperMap



Fonte: GeoEspaço (2021).

Verifica-se que os softwares que manipulam modelos geométricos e semânticos apresentam especificidades, uma vez que, um software é usado para armazenar dados, outro para visualização e outro para conversão entre formatos, como o CityGML. Até o presente momento, ainda não foi desenvolvido, um software único capaz de estruturar, manipular, analisar, visualizar, representar e converter dados 3D em formatos adequados para a modelagem geométrica e semântica de cidades (Zlatanova *et al.*, 2002).

Devido a estes desafios foi criado um *website* [<https://www.citygml.org/>] pelo 3D Geoinformation Group na Universidade Tecnológica de Delft, que agrega informações sobre modelagem geométrica e semântica, padrão CityGML e softwares que usam este padrão. Os softwares são classificados em geradores e visualizadores de modelos no padrão CityGML.

Dentre os softwares que geram modelos geométricos e semânticos de cidades no formato CityGML, ressaltam-se:

- O RandomCity: consiste num recurso de modelagem para gerar edificações em vários níveis de detalhe, Multi-LOD CityGML, visando determinar o LOD ideal para uma dada análise espacial. Este software foi desenvolvido como parte da pesquisa de doutorado de Biljecki (2017) na Universidade Tecnológica de Delft (Holanda);
- O OSM2CityGML: utiliza as edificações do OpenStreetMap e converte em formato

CityGML, através do software Feature Manipulation Engine (FME);

- O 3DFIER: utiliza geometrias 2D para extrudar os polígonos a partir da altura (obtida com nuvem de pontos de varredura a laser aerotransportado) e gera modelos CityGML.

Como softwares para visualização de modelos CityGML, destacam-se:

- O Elyx 3D View: apresenta ênfase em aplicações como planejamento urbano, acesso e mobilidade, controle de tráfego e ruído, usando dados 3D. Pode ser usado para gerenciar, visualizar, editar e analisar modelos geométricos;
- O FME: software que permite conversão e transformação de dados para resolver problemas de interoperabilidade de dados, desenvolvido pela Safe Software. Pode ser usado para leitura, escrita, processamento e visualização de dados em vários formatos inclusive no padrão CityGML;
- O FZKViewer: visualiza modelos geométricos e semânticos IFC e CityGML e foi elaborado pelo Institute for Automation and Applied Informatics do Karlsruhe Institute of Technology (KIT), na Alemanha.

4 SIG APLICADO AOS *CAMPI* UNIVERSITÁRIOS

Este Capítulo tem como objetivo abordar a temática do papel dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como recurso para o gerenciamento do *campus* universitário a partir do uso de dados espaciais e funcionalidades disponíveis nestas ferramentas. É feita uma explanação sobre alguns casos de universidades no Brasil (inclusive contendo um estudo de caso da UFBA) e no exterior que utilizam SIG, bancos de dados e/ou plataformas *web* com finalidades que variam desde localizar elementos no *campus* até auxiliar o gestor na tomada de decisão. Por fim, são abordados alguns aspectos da modelagem numérica 3D em *campus* universitário como o uso dos principais tipos de dados espaciais e dos softwares utilizados para modelagem geométrica e semântica.

4.1 USO DE SIG PARA GESTÃO DO *CAMPUS* UNIVERSITÁRIO

Diante da complexidade e dos desafios enfrentados pelas universidades, é necessário o uso de instrumentos internos de planejamento, tanto no âmbito administrativo, de ensino, extensão, como também para o espaço físico. Um dos instrumentos mais gerais é o Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI) que traça metas e objetivos de âmbito geral para a universidade, estabelecendo diretrizes e políticas internas, que influenciam diretamente nas tomadas de decisões. No que se refere ao espaço físico da universidade, é elaborado o Plano Diretor (PD) que aborda tanto questões de manutenção, infraestrutura e reformas das edificações, como previsões de expansão das áreas já existentes e áreas destinadas à novas edificações. Cabe destacar também os Planos de Desenvolvimento Sustentável, que traçam políticas de gestão da sustentabilidade para diversos aspectos da universidade (Esteves, 2013).

Além das questões administrativas, econômicas e burocráticas, a universidade hoje deve lidar com as questões relacionadas ao desenvolvimento sustentável, tanto no âmbito das edificações e meio ambiente, como na dimensão econômica, social e política. No entanto, a gestão ambiental das universidades encontra-se, na maioria dos casos, em fase inicial, e ainda tem pouco peso nas tomadas de decisão junto à administração do *campus* (Esteves, 2013).

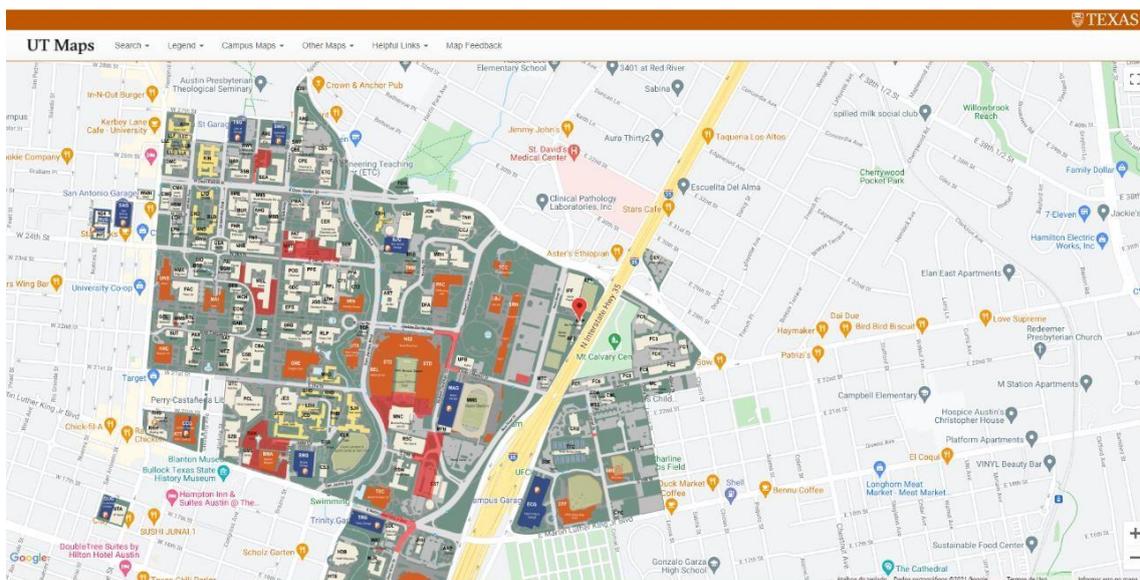
Como ferramenta de gerenciamento, o SIG pode combinar as informações espaciais com as informações de ensino, pesquisa, extensão e administração, favorecendo o gerenciamento do *campus* e a tomada de decisão, bem como economizando recursos humanos e materiais. Desta forma, o SIG desempenha um papel importante na estrutura do *campus* e seu desenvolvimento

pode ser visto como uma tendência inevitável (Fenghua *et al.*, 2010).

O conceito de Sistema de Informação do Campus (SIC), da tradução *Campus Information System* (CIS), é visto como um sistema integrado, formado por hardware, software, dados e usuários, para coletar dados espaciais e não espaciais dentro da universidade e suas subunidades (acadêmico e administrativo). Esses dados podem ser transferidos, armazenados, consultados, analisados e apresentados aos gestores. Embora o uso destes sistemas esteja tornando-se mais comum, as aplicações 3D ainda não prevalecem nas ferramentas de gestão das universidades (Kahramana *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, muitas universidades têm investido na organização e disponibilização dos dados através de plataformas *web*. Algumas universidades como a do Texas e de Michigan possuem plataformas que apresentam dados sobre as edificações e permitem algum grau de interatividade com o usuário. No mapa *web* da Universidade do Texas (Figura 22) é possível realizar pesquisas sobre as edificações. Ao clicar na edificação de interesse surge uma aba com informações do Google Maps do ponto de partida para o ponto de destino, permitindo identificar distâncias entre os mesmos através de diferentes meios de transporte. Também é possível acessar detalhes destas edificações, como o nome da construção, área, número de andares, data de construção, localização de estacionamentos próximos e plantas baixas que são de acesso restrito. Ainda é possível acessar fotos do prédio e os nomes dos departamentos que compõem a mesma.

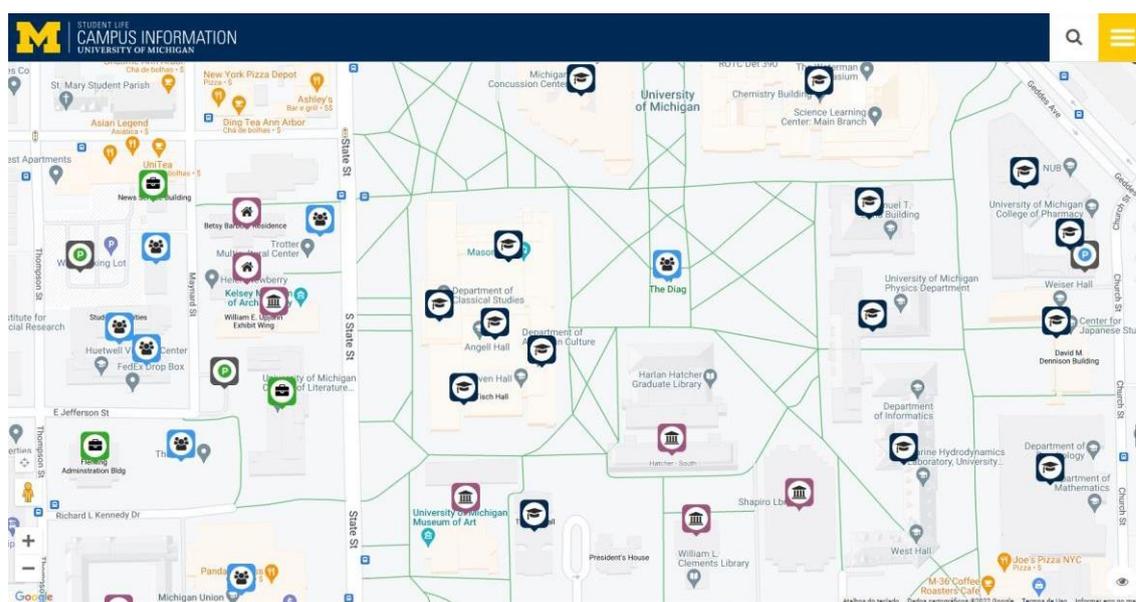
Figura 22 - Mapa do *campus* da Universidade do Texas



Fonte: <https://maps.utexas.edu/#>.

A Universidade de Michigan possui um mapa interativo do *campus* (conforme Figura 23), que possibilita a busca de informações por edifícios, indica direções, rotas de ônibus e opções de estacionamento. E os usos das edificações (acadêmico, administrativo, alojamento, biblioteca) são identificados por cores. As informações sobre as edificações se referem ao nome, endereço, categoria, acessibilidade (presença de rampas e elevadores), nomes e contato dos departamentos, informações sobre a localização dos edifícios e proximidade com outros.

Figura 23 - Mapa do *campus* da Universidade de Michigan



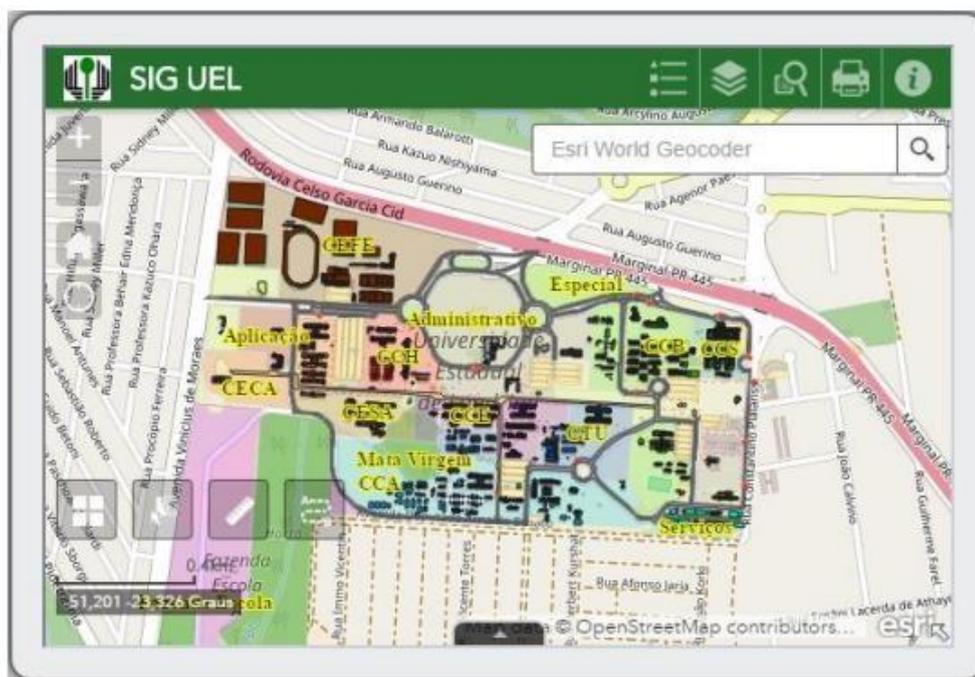
Fonte: <https://maps.studentlife.umich.edu/>.

Manzoli (2003) propôs uma metodologia de uso e aplicação de SIG em um *campus* da USP de São Carlos. O objetivo do projeto piloto foi unir dados alfanuméricos e geográficos para a produção do SIG com a finalidade de atender serviços, administração, manutenção, implantação de novas instalações, dentre outras, com ênfase na ocupação das salas de aula pelos alunos. Este projeto envolveu dados provenientes de mapa topográfico (em formato DWG), levantamentos com GPS e demais informações sobre a ocupação do espaço físico e o uso de recursos em formato XLS.

Tambani (2017) utilizou dados espaciais para criar uma base de dados georreferenciada de um *campus* da Universidade Estadual de Londrina (UEL). A base de dados (que incluía informações referentes ao espaço físico dos edifícios, salas etc.) teve como objetivo a implementação de um SIG a ser utilizado pela administração do *campus*, sendo alimentado com informações geradas através de aplicativos via *smartphones*. As informações são visualizadas através do ArcGIS *online* (Figura 24) permitindo à administração utilizá-las em suas atividades

diárias de gestão.

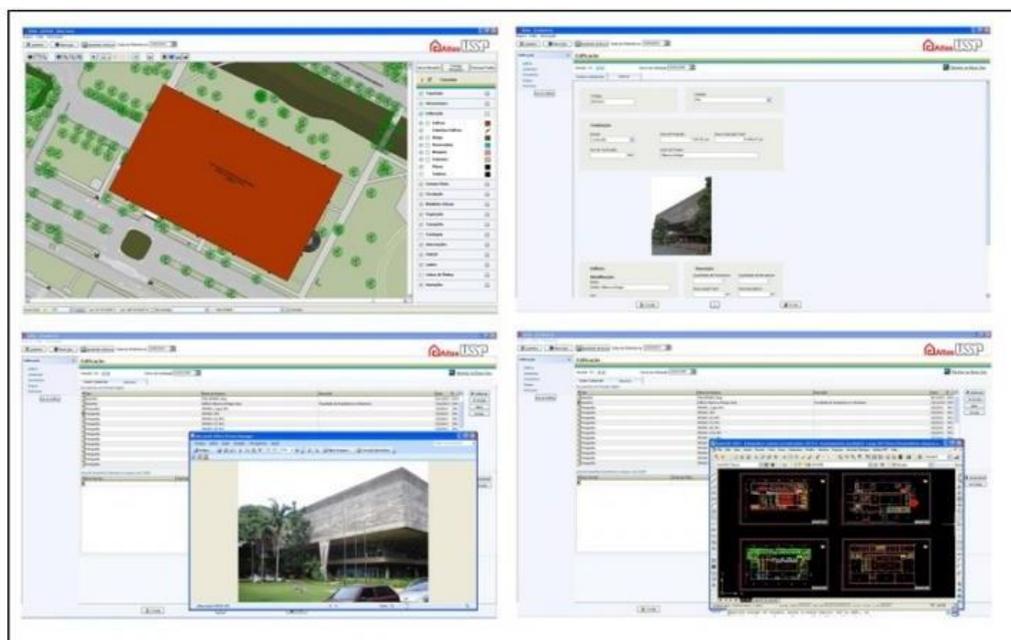
Figura 24 - Visualização do SIG UEL através do ArcGIS *online*



Fonte: Tambani (2017).

O Laboratório de Informatização de Acervo (LabArq) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP desenvolveu um SIG chamado projeto Atlas. Este projeto teve como objetivo, auxiliar os órgãos gestores do *campus* a administrar o patrimônio físico, o controle dos espaços utilizados e a manutenção do cadastro atual do *campus* da Cidade Universitária Armando Salles Oliveira (Couto, 2012). Foram cadastradas 385 edificações (exemplo de cadastro de edifício na Figura 25) e 19.370 ambientes. Ao cadastro predial foram anexados mais de 24 mil arquivos (fotografias, plantas em formato vetorial (CAD) e outros documentos). No mapeamento das áreas externas foram geradas mais de 100 camadas de informação. As funcionalidades do sistema permitem o apoio às operações de planejamento, gerenciamento de espaços, inventário, manutenção, operação, e gerenciamento de infraestrutura.

Figura 25 - Cadastro de um edifício no sistema do projeto Atlas



Fonte: Couto (2012).

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) possui um projeto denominado CampusMap, cujo principal objetivo é prover uma base de dados atualizada sobre a estrutura dos *campi*, tanto de seus ambientes externos quanto internos. Dentre suas funcionalidades está a busca e definição de rotas entre pontos de interesse. O projeto UFPR CampusMap teve início com o mapeamento do *campus* Centro Politécnico, em 2017. A metodologia empregada utiliza dados coletados por *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS)³⁸. Foram coletados pontos de apoio em campo, que fazem parte da Rede Topográfica da UFPR, para permitir a realização da aerotriangulação e posterior restituição estereofotogramétrica. A partir da restituição, os dados foram editados em um SIG para geração da topologia, adição de atributos e preparação para inserção no banco de dados. Paralelamente foram coletados e editados os dados referentes aos ambientes internos das edificações³⁹.

Santos *et al.* (2020) realizaram a modelagem e implementação de um banco de dados tridimensional⁴⁰ para uma parte das edificações do *campus* do Centro Politécnico da

³⁸ Nesta tese foi utilizado o termo *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), que se refere a um Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada, incluindo a aeronave (drone), um controle remoto e uma estação terrestre (presente em alguns casos).

³⁹ Informações extraídas do *website* do CampusMap, disponível em: <http://www.campusmap.ufpr.br/>.

⁴⁰ Nesta tese considera-se um banco de dados tridimensional como um banco que possui dados em três dimensões (comprimento, largura e altura) possibilitando determinar a posição e forma dos objetos.

Universidade Federal do Paraná que posteriormente poderão compor o conjunto de dados do projeto CampusMap da UFPR. As informações geométricas e semânticas foram modeladas segundo o padrão CityGML associadas a softwares livres, para implementação do banco de dados tridimensional. A Figura 26 mostra um trecho desse modelo geométrico.

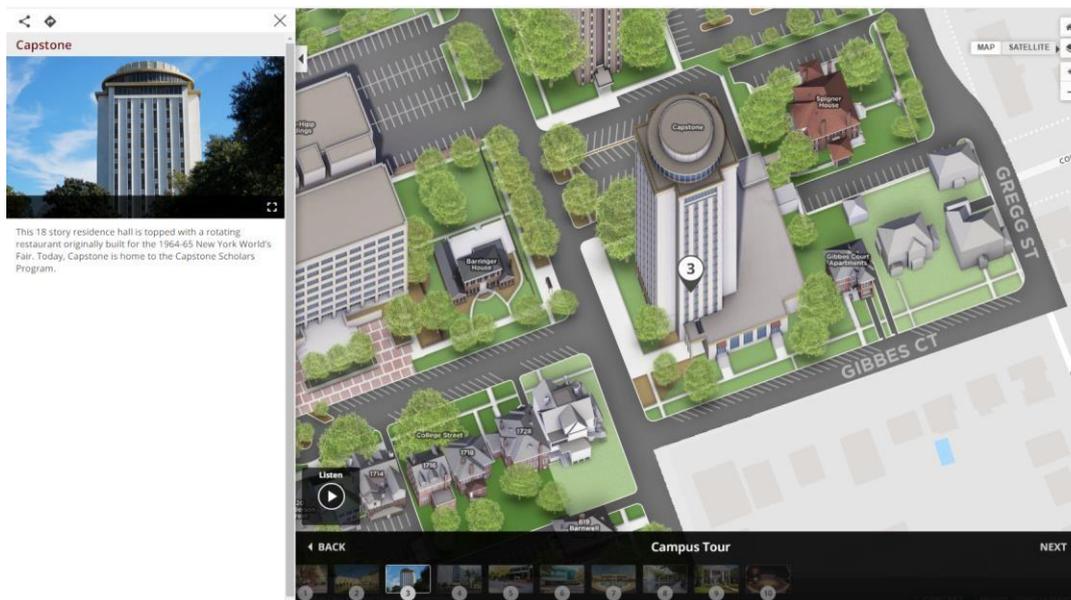
Figura 26 - Modelo geométrico das edificações na área de estudo



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

No entanto é ainda raro encontrar exemplos de *campus* com modelos geométricos e semânticos. Um sistema que merece destaque é o da Universidade da Carolina do Sul que apresenta a visualização das feições em três dimensões, a partir da ferramenta ‘*campus tour*’, conforme Figura 27. Por outro lado, possui apenas uma breve descrição das edificações, não apresentando outros dados complementares.

Figura 27 - Mapa do *campus* da Universidade da Carolina do Sul



Fonte: <https://sc.edu/visit/map/>.

Sendo assim, observa-se a escassez de plataformas que apresentem dados espaciais de forma sistemática e que sejam representados como modelos numéricos 3D. Aliado a isso, não foram encontrados exemplos de plataformas *web* que representem um *campus* universitário e que possuam ferramentas aplicadas a um SIG 3D para fins de gestão universitária. Sendo assim, esta pesquisa busca discutir estes desafios.

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CRIAÇÃO DE MODELOS GEOMÉTRICOS E SEMÂNTICOS EM *CAMPUS* UNIVERSITÁRIO

Conforme já mencionado no Capítulo 3, a modelagem geométrica do *campus* pode ser realizada a partir de dados obtidos das seguintes técnicas: métodos topográficos, *Global Navigation Satellite System* (GNSS), sensoriamento remoto, fotogrametria (terrestre e aérea) e varredura a laser (terrestre ou aerotransportada).

No Quadro 4, observa-se que a maioria dos estudos que envolvem modelagem geométrica para *campus* universitário utilizam imagens de satélite, fotografias aéreas e ortofotos (Templin *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020; Tsiliakou *et al.*, 2013; Pispidikis *et al.*, 2018; Suwardhi *et al.*, 2016 e Anh *et al.*, 2017) como base para criação dos modelos geométricos junto com coordenadas advindas de aparelhos GNSS e nuvens de pontos.

É comum também o uso de MDS e MDT (Buyukdemircioglu; Kocaman, 2018); Chen *et al.* (2020); Tsiliakou *et al.* (2013); Pispidikis *et al.* (2018). Por sua vez, Suwardhi *et al.* (2016)

e Trisyanti *et al.* (2019) utilizaram RPAS para aquisição de fotografias aéreas.

O Quadro 4 evidencia o uso de dados em formatos provenientes de softwares CAD e SIG. Para criação dos modelos numéricos 3D, Kahramana *et al.* (2013) utilizaram dados em formato DWG e DXF dos pisos, salas e *footprints* de edifícios. Tsiliakou *et al.* (2013) também utilizaram mapas topográficos do *campus*, plantas arquitetônicas georreferenciadas de edifícios existentes e outros a serem construídos, bem como, plantas baixas, vistas e seções. Por sua vez, Anh *et al.* (2017) e Chen *et al.* (2020) usaram softwares SIG como ArcGIS e QGIS para manipulação dos dados espaciais.

Uma das bases de dados espaciais com maior detalhamento acerca das instalações de *campus* universitário foi elaborada e descrita por Bansal (2011), sendo composta por modelos numéricos 3D classificados em: edifícios institucionais; edifícios residenciais; diversos (instalações como tanques de água, lojas, praças de alimentação, floricultura, berçário, templos, teatro ao ar livre, complexo esportivo); rede de água e esgoto; rede viária; postes elétricos, telefônicos e de iluminação; entre outros. Essa base foi associada a dados não espaciais cujos atributos correspondem a todas as instalações existentes especificadas na base espacial.

Pispidikis *et al.* (2018) também descrevem o processo de coleta e organização dos dados do *campus* (em formato vetorial e matricial) disponibilizados pelo Departamento de Serviços Técnicos da Universidade Tecnológica de Atenas. Foram fornecidos dados sobre: edifícios (fachadas); plantas baixas (seções); redes de infraestrutura, imagens aéreas da área, ortofotos, modelo digital do terreno e modelo digital de superfície; e aproximadamente 5.000 fotos das fachadas dos edifícios, capturadas para serem usadas nas texturas dos modelos numéricos 3D. Informações como o número de pisos, materiais e data de construção também são importantes neste contexto (Tsiliakou *et al.*, 2013). Trisyanti *et al.* (2019) desenvolveram modelos numéricos 3D para *campus* universitários com informações semânticas que incluem materiais de construção, valor da área, volume e altura da sala.

Quadro 4 - Tipos de dados usados para criação de modelos geométricos e semânticos

Autores	Imagens / fotografia aéreas	GNSS /RTK	Nuvem de pontos	(MDT/ (MDS)	CAD (DWG, DXF)	SIG (SHP, GDB)	Dados semânticos
Templin <i>et al.</i> (2019)	✓	✓	✓				
Buyukdemircioglu e Kocaman (2018)			✓	✓			
Trisyanti <i>et al.</i> (2019)	✓		✓				
Kahramana <i>et al.</i> (2013)					✓		✓
Chen <i>et al.</i> (2020)	✓		✓	✓		✓	✓
Tsiliakou <i>et al.</i> 2013	✓			✓	✓		✓
Pispidikis <i>et al.</i> (2018)	✓			✓			
Suwardhi <i>et al.</i> (2016)	✓						
Anh <i>et al.</i> (2017)	✓					✓	
Enqing <i>et al.</i> (2017)	✓						

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.3 MODELAGEM GEOMÉTRICA E SEMÂNTICA PARA *CAMPUS* UNIVERSITÁRIO

A modelagem numérica 3D é um processo para representar matematicamente um objeto ou uma cena em três dimensões, dividindo-se em três etapas: a primeira se refere à modelagem de terreno, a segunda à modelagem das edificações com baixo nível de detalhe (LOD1 e 2) e a terceira, com alto nível de detalhe, LOD3 e 4 (Suwardhi *et al.*, 2016).

Chen *et al.* (2020) identificaram que os estudos que envolvem modelos numéricos 3D podem ser divididos em dois grupos principais: 1) execução e simulação/análise e 2) apenas visualização. Geralmente os modelos geométricos possuem LOD2 ou 3 devido à demanda por representação realista e design dos cenários. Podem ser realizadas operações de consultas espaciais, como a distância entre pontos ou uma filtragem de um objeto baseado em regras.

Verificou-se que os softwares mais comuns utilizados (conforme Quadro 5) para modelagem geométrica são SketchUp, AutoCAD, Revit e CityEngine. Alguns estudos compararam a eficácia de softwares de modelagem geométrica (Pispidikis *et al.*, 2018, Jesus *et al.* 2018b) e outros que fazem uso de ferramentas CAD e SIG, em conjunto, para diferentes propósitos (Pispidikis *et al.*, 2018, Bansal, 2011). Em geral, o processo de modelagem descrito

na literatura abarca o uso de um SIG (como QGIS ou ArcGIS) para manipulação de dados 2D, como por exemplo, *footprints* de edificações e seus respectivos atributos, e em seguida, importam esses dados em outros softwares que possuam recursos mais avançados de modelagem como o AutoCAD, SketchUp, Revit ou CityEngine.

Para a criação de bancos de dados, podem ser usadas ferramentas integradas ao próprio SIG, como o *geodatabase*⁴¹ do ArcGIS, metodologia utilizada por Bansal (2011), o PostgreSQL/PostGIS (Suwardhi *et al.*, 2016) ou ainda softwares específicos para banco de dados 3D como o 3DCityDB (Pispidikis *et al.*, 2018). No quesito visualização, tem sido uma tendência a publicação dos modelos numéricos 3D na *web* por meio de opções integradas aos softwares de modelagem mais utilizados (SketchUp, AutoCAD, Revit e CityEngine), ao banco de dados ou o uso do Cesium. Os modelos numéricos 3D para *campus* universitário geralmente variam quanto aos níveis de detalhe do LOD1 (Chen *et al.*, 2020) ao LOD3 (Pispidikis *et al.*, 2018).

Quadro 5 - Softwares usados para modelagem e visualização na *web*

Autores	SIG (Arcgis/ QGIS)	CityEngi ne	Sketch Up	Revit	Autocad	FME	3DCity DB	Cesium
Anh <i>et al.</i> (2017)	✓							✓
Pispidikis <i>et al.</i> (2018)		✓	✓	✓			✓	
Tsiliakou <i>et al.</i> (2013)		✓						
Bansal (2011)	✓		✓		✓			
Kahramana <i>et al.</i> (2013)			✓					
Buyukdemircio glu e Kocaman (2018)						✓		
Templin <i>et al.</i> (2019)	✓	✓	✓					

⁴¹ O software ArcGIS utiliza o termo *geodatabase* para um conjunto de dados geográficos de vários tipos mantidos em uma pasta de sistema de arquivos comum ou um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional multiusuário. Para mais informações consultar <https://pro.arcgis.com/en/pro/app/2.8/help/data/geodatabases/overview/what-is-a-geodatabase-.htm>.

Autores	SIG (Arcgis/ QGIS)	CityEngi ne	Sketch Up	Revit	Autocad	FME	3DCity DB	Cesium
Fenghua <i>et al.</i> (2010)	✓							
Li <i>et al.</i> (2011)	✓		✓					
Ramlee <i>et al.</i> (2019)	✓							
Suwardhi <i>et al.</i> (2016)							✓	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pispidikis *et al.* (2018) abordam o uso combinado dos softwares CityEngine, SketchUp e Revit para modelagem de edifícios, identificando as potencialidades e limitações de cada um deles em relação aos níveis de detalhe. Aos modelos geométricos desenvolvidos foram adicionadas informações semânticas para serem representados em LOD1, 2 e 3 do padrão CityGML e depois, importados para um arquivo *geodatabase*. Posteriormente, o modelo contendo terreno, edificações, transportes e vegetação foi integrado ao visualizador GIS de interface do *campus*, usando um aplicativo *web* associado ao ArcGIS.

Os estudos desenvolvidos por Buyukdemircioglu e Kocaman (2018), Pispidikis *et al.* (2018) e Anh *et al.* (2017) destacam-se por realizar testes em visualizadores *web* para disponibilização dos modelos numéricos 3D. Buyukdemircioglu e Kocaman (2018) testaram os globos virtuais Cesium (baseado em Javascript), WebGL e também a biblioteca JavaScript Potree.

A construção do *campus* 3D da Universidade Nacional de Hanói (Vietnã) foi descrita por Anh *et al.* (2017), que utilizaram imagens de satélite do Google Earth para criar limites de construção e bordas do telhado, e o mapa base do OpenStreetMap para coletar as informações do sistema viário. Para visualização do sistema do *campus* 3D foi usado o Cesium. No entanto, pelo fato deste não suportar dados CityGML foi necessário converter os dados para glTF antes de ser carregado no Cesium.

Algumas pesquisas foram desenvolvidas dando ênfase aos sistemas com aplicações 3D para universidades, compreendendo dados geométricos e semânticos. Para fins de gerenciamento de instalações e gestão da universidade destacam-se os estudos de Trisyanti *et al.* (2019); Suwardhi *et al.* (2016); Bansal (2011) e Pispidikis *et al.* (2018). Quanto à disponibilização dos modelos numéricos 3D em plataforma *web*, os estudos de

Buyukdemircioglu e Kocaman (2018), Trisyanti *et al.* (2019), Kahramana *et al.* (2013) e Ramlee *et al.* (2019) podem ser considerados como referência.

Por fim, é importante ressaltar que gerir e atualizar os diferentes tipos de informação exigidas no planejamento espacial de um *campus* é uma tarefa tediosa. Planejar a nova infraestrutura e atualizar a existente em um *campus* é difícil porque a informação é amplamente dispersa, desatualizada, apresenta-se em diferentes escalas e formatos, e muitas vezes não está em ambiente digital (Bansal, 2011).

O mesmo ocorre em várias universidades estaduais e federais no Brasil, a exemplo da UFBA, que possui uma grande quantidade de dados. Apesar de muitos dados da UFBA estarem em formato digital (como por exemplo plantas das unidades universitárias) alguns possuem divergências quanto à localização de feições e dados semânticos dessas unidades, que não estão organizados de forma que favoreça o acesso e a disseminação das informações.

4.4 UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

A Universidade Federal da Bahia (UFBA) foi oficialmente instalada em 2 de julho de 1946 no Terreiro de Jesus, na antiga Faculdade de Medicina da Bahia, criada em 1808. E ao longo dos anos foram construídos novos prédios e criados vários cursos (Salles; Miguez, 2017).

A infraestrutura física da UFBA é composta por 31 unidades universitárias, além de três hospitais universitários, três museus, uma creche, três fazendas experimentais, quatro residências universitárias, um restaurante universitário e um centro de esportes, conforme Tabela 1. Praticamente 100% da infraestrutura existente está sendo utilizada (Salles; Miguez, 2017).

Tabela 1 – Descrição da área física da UFBA

	2013	2014	2015	2016
Área territorial (m ²)*	6.367.561,90	5.826.097,82	5.826.097,82	5.826.097,82
Área territorial (m ²)**	354.265,79	338.894,44	338.894,44	338.894,00
<i>Campi</i>	4	3	3	3
Unidades Universitárias	32	31	31	31
<i>Campus</i> Canela**	10	10	11	11
<i>Campus</i> Federação Ondina**	15	15	15	15
Dispersas	5	5	4	4
<i>Campus</i> Anísio Teixeira –IMS***	1	1	1	1
<i>Campus</i> Reitor Edgard Santos****	1	-	-	-
Hospitais Universitários	3	3	3	3
Hupes e MCO	2	2	2	2
HOSPMEV	1	1	1	1
Museus: MAE, MAFRO e MAS	3	3	3	3
Creche	1	1	1	1
Fazendas experimentais	3	3	3	3
Residências universitárias	5	5	4	4
Restaurante Universitário ⁴²	1	1	1	1
Centro de Esportes	1	1	1	1
Pavilhões de Aulas teóricas e práticas por local	16	11	11	11
<i>Campus</i> Salvador	9	9	9	9
<i>Campus</i> Anísio Teixeira - IMS	2	2	2	2
<i>Campus</i> Edgard Santos	5	-	-	-

Fonte: UFBA (2017), SUMAI/CPPO, Núcleo de Planejamento, Projetos e Patrimônio Imobiliário. * Incluídas área territorial e área construída das fazendas experimentais da Escola de Medicina Veterinária e Zootecnia. ** Unidades situadas em Salvador. *** Situado em Vitória da Conquista. **** Em 2013, ocorreu a desvinculação do *Campus* Reitor Edgar Santos, de Barreiras, que foi incorporado à UFOB, reduzindo a área territorial e construída e o número de unidades Universitárias.

O financiamento das universidades brasileiras mudou em 2007, através do programa de apoio a planos de reestruturação e expansão das universidades federais (REUNI) do Governo Federal, que disponibilizou vultosos recursos para a expansão do número de vagas, dos cursos e da estrutura física das universidades do país. Através do REUNI, a UFBA passou de 55 cursos de graduação, 43 mestrados, 18 doutorados e 3.745 vagas para ingresso de novos discentes para

⁴² O Restaurante Universitário (RU) de São Lázaro foi inaugurado em dezembro de 2016 e por esse motivo, na Tabela 1, consta apenas o RU de Ondina.

112 cursos de graduação, 61 mestrados, 47 doutorados e 7.426 vagas para ingressos na graduação. Em relação à estrutura física, a universidade inaugurou dois novos *campi* no interior do Estado (Vitória da Conquista e Barreiras), cinco pavilhões de aulas (PAF III, IV, V, VI e Pavilhão de Aulas de São Lázaro), uma biblioteca, uma unidade universitária (Prédio da Faculdade de Ciências Contábeis), uma praça (Praça das Artes), uma residência universitária, e restaurou o tradicional prédio da Faculdade de Medicina da Bahia (Salles; Míguez, 2017).

Como resultado do REUNI, a Universidade passou a contar com aproximadamente 50 mil pessoas, sendo 35 mil alunos da graduação, 5 mil da pós-graduação, além de docentes, técnico-administrativos e terceirizados, que estão distribuídos em uma área territorial de 5.826.097,82 m² e 338.894,00 m² de área construída.

Nesse contexto do REUNI, a UFBA (2009) estabeleceu nove diretrizes para ocupação do espaço físico institucional, que, por sua vez, podem ser divididas em três grupos: gestão da infraestrutura; ampliação da infraestrutura, e acessibilidade e preservação dos *campi*. Em relação ao primeiro grupo de diretrizes, gestão da infraestrutura, estão presentes a racionalização do uso do espaço físico e das instalações da UFBA, a minimização dos custos de manutenção dos imóveis e equipamentos da Universidade e a definição do perfil/padrão de utilização das unidades universitárias. No segundo grupo, ampliação da infraestrutura, estão a promoção da proximidade geográfica entre as unidades universitárias por área de conhecimento e grupos de formações afins, bem como, o estímulo à construção e ampliação de equipamentos de ensino, pesquisa e extensão. O terceiro grupo, preservação dos *campi*, é composto por diretrizes que tem por finalidade a segurança e a acessibilidade das unidades universitárias com o intuito de integrar serviços de apoio, atividades de ação comunitária e assistência estudantil, bem como, a preservação do patrimônio ambiental da UFBA, fauna e área verdes dos *campi*, e o patrimônio histórico e cultural da Universidade.

A UFBA, em 2013 criou a Superintendência de Meio Ambiente e Infraestrutura (SUMAI), que substitui a antiga Prefeitura do *Campus*. Entre suas responsabilidades está: planejar, coordenar e controlar o desenvolvimento da infraestrutura e patrimônio físico e elaborar, acompanhar e coordenar a implantação das políticas de gestão ambiental, bem como zelar pela manutenção das instalações físicas e espaços comuns.

Os serviços executados pela SUMAI são divididos em quatro núcleos: Núcleo Manutenção Elétrica, Eficiência Energética e Refrigeração; Núcleo de Ações Ambientais,

Urbanização e Conservação de Áreas Verdes; Núcleo de Manutenção Civil; e, Núcleo de Manutenção de Tecnologias de Informação e Comunicação (Salles; Miguez, 2017).

Na estrutura universitária instituída pela UFBA (2010), há os órgãos Reitoria e unidades universitárias. A Reitoria é o órgão executivo da administração superior da Universidade, que tem a incumbência de coordenar, fiscalizar e superintender as atividades de ensino, pesquisa e extensão, planejamento e orçamento, assistência aos estudantes, manutenção patrimonial e gerenciamento de obras, segurança e gestão ambiental; entre outras. Estas atividades são realizadas por pró-reitorias e órgãos específicos. Por sua vez, as unidades universitárias, que são órgãos de execução das atividades acadêmicas e de lotação de pessoal docente e técnico-administrativo, são divididas em duas modalidades: faculdades ou escolas, e, institutos. As faculdades ou escolas são unidades de ensino, pesquisa e extensão que tem por finalidade a formação em carreiras acadêmicas, profissionais, tecnológicas e artísticas. Os institutos são unidades de ensino, pesquisa e extensão que tem por objetivo a formação acadêmica em campos científicos gerais ou áreas de conhecimento disciplinares, multidisciplinares e interdisciplinares. De um total de 32 unidades universitárias, a UFBA (2010) apresenta 10 faculdades, 9 escolas e 13 institutos.

O Quadro 6 apresenta as instalações e os equipamentos universitários, de uso compartilhado ou específico, que são administrados pela Reitoria e pelas unidades universitárias.

Quadro 6 - Instalações e equipamentos universitários da UFBA

Instalações	Equipamentos
Utilização compartilhada (instalações administradas por órgão próprio da Reitoria)	Bibliotecas; museus; centros de idiomas; centros de educação não-presencial (EAD); pavilhões de ensino presencial (PAEP); pavilhões de ensino com recursos computacionais (PAERC); pavilhões de laboratórios multiuso para ensino (LAB Tipo I); auditórios e salas de espetáculos (fora das unidades de ensino); espaços de eventos (centros cerimoniais e de convenções); centros de esportes e lazer (incluindo espaços multiuso); centrais de processamento de resíduos químicos e biológicos; espaços artísticos culturais; restaurante universitário e residência universitária.
Utilização específica (instalações administradas por unidades universitárias)	Instalações administrativas; salas de professores; gabinetes para docentes; coleções e centros de documentação específica; dependências para núcleos/programas/projetos de pesquisa e extensão; salas de reuniões conversíveis para salas de aulas; salas e auditórios específicos; laboratórios temáticos especializados (LAB Tipo II); laboratórios de pesquisa e desenvolvimento tecnológico e laboratórios de atividades de extensão.

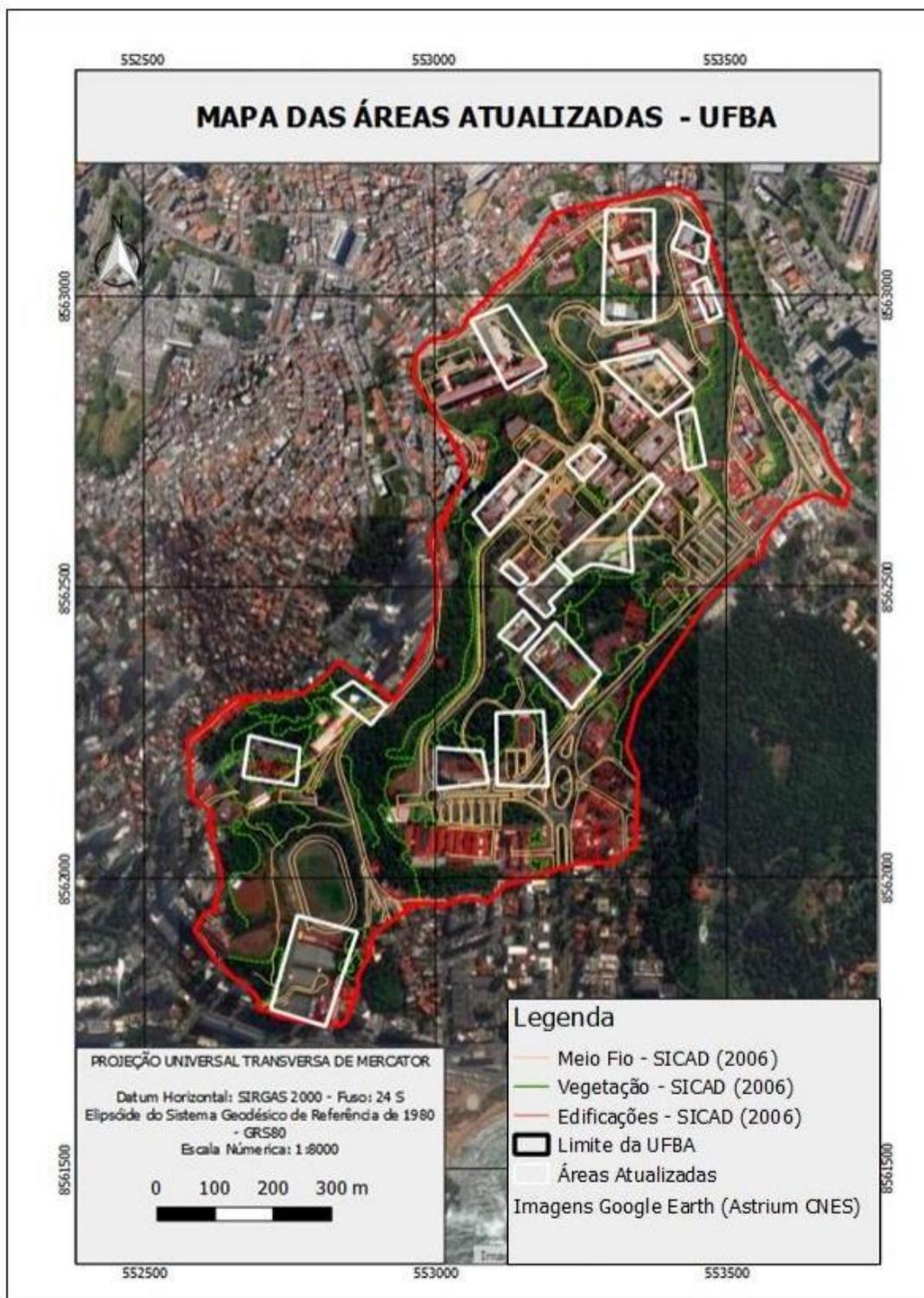
Fonte: Elaborado pela autora a partir de UFBA (2009).

O Plano de Desenvolvimento Institucional (PDI) da Universidade (2017), definiu para o período de 2018 a 2022, 10 objetivos estratégicos (OE). O décimo OE faz referência à necessidade de consolidar, aperfeiçoar e qualificar a infraestrutura física, tecnológica e de serviços da Universidade. Entre as ações propostas para atendimento desse objetivo estão: dotar os prédios e áreas comuns da Universidade com acessibilidade universal, sistemas de segurança e combate a incêndios e sistemas de desempenho ambiental de eficiência lumínica, termoacústica, consumo de energia e água; planejar a infraestrutura e os serviços (mobilidade, transporte, meio ambiente, água, luz, saúde etc.); implantar projeto piloto de energia elétrica a partir de fontes sustentáveis; captação e utilização de águas subterrâneas para irrigação e outros usos não potáveis; elaborar e implementar o plano de gerenciamento de resíduos sólidos da UFBA; realizar o cadastramento e sinalização ambiental das áreas para proteção; promover a requalificação e paisagismo adequado ao bioma local; realizar a recomposição florística, sob o viés da agroecologia, com plantio de espécies nativas e frutíferas atrativas de fauna; elaborar o plano de arborização dos *campi* com espécies nativas da mata atlântica.

Dessa forma, alguns estudos foram desenvolvidos no âmbito do uso e integração de dados espaciais no *campus* universitário que compreende a área de estudo e que serão usados para dar suporte à construção da aplicação SIG 3D do *campus* universitário Federação Ondina. Destacam-se os trabalhos de Elias (2017), Jesus *et al.* (2018a), Jesus *et al.* (2018b), Magalhães (2020), Silva (2021), e Sacramento (2021).

Elias (2017) descreveu o uso e aplicação de uma metodologia a fim de gerar ortofotos digitais a partir de fotografias obtidas por meio de RPAS em um *campus* universitário da UFBA. Assim, o trabalho utilizou essa tecnologia para fins de atualização cartográfica e posteriormente avaliação da exatidão posicional do produto cartográfico, por meio do processamento das imagens para a geração dos modelos digitais de elevação (MDE) e das ortofotos digitais. A partir das ortofotos foi realizada a vetorização das regiões onde houve mudanças (Figura 28) no *campus* Federação Ondina da UFBA no período compreendido entre 2006 e 2017.

Figura 28 - Áreas atualizadas após o estudo

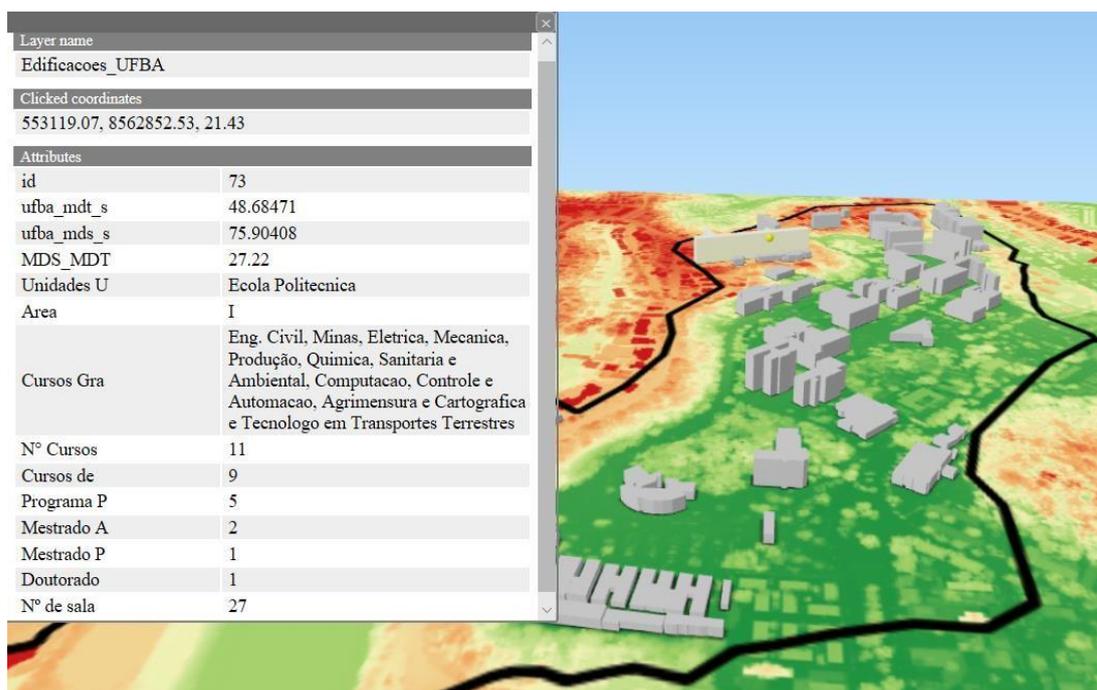


Fonte: Elias (2017).

Jesus *et al.* (2018a) apresentaram questões relacionadas à modelagem geométrica do *campus* Federação Ondina da UFBA, em LOD1 do padrão CityGML, usando dados de varredura a laser aerotransportada, visando a criação de uma base de dados para o

desenvolvimento de um SIG 3D. Este trabalho teve como objetivo ainda avaliar o desempenho do QGIS para realizar a modelagem geométrica e semântica (Figura 29). Em Jesus *et al.* (2018b) é comparada a modelagem geométrica e semântica em softwares distintos e realizada a conversão do modelo para o padrão CityGML.

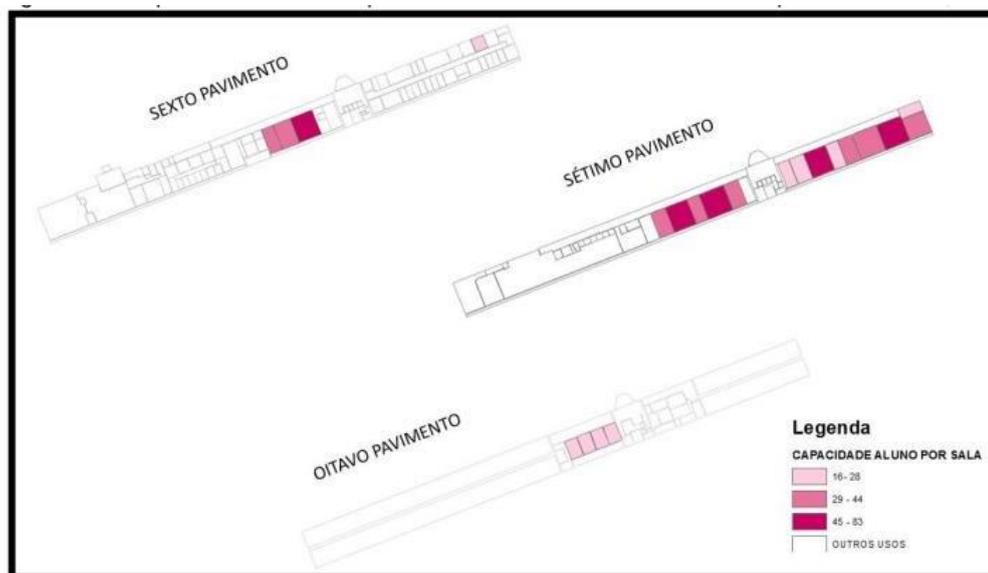
Figura 29 - Modelo geométrico e semântico produzido no QGIS



Fonte: Jesus *et al.* (2018a).

Magalhães (2020) relata questões voltadas às dificuldades enfrentadas pela Superintendência de Meio Ambiente e Infraestrutura (SUMAI) em gerir os espaços físicos e edificações no atendimento aos requisitos estabelecidos pelo Ministério de Educação (MEC) na dimensão infraestrutura para o processo de avaliação dos cursos. Para auxiliar neste processo, a autora propõe um modelo conceitual para a sistematização dos dados espaciais, para demonstrar a possibilidade de análises e apresenta um protótipo que aplica um SIG *Web* na gestão dos espaços físicos da Escola Politécnica da UFBA, construído com vistas a gestão dos dados desta edificação. Na Figura 30 é possível verificar, por exemplo, uma informação importante para avaliação do MEC que consiste em saber a capacidade de alunos por sala de aula.

Figura 30 - Capacidade de alunos por sala de aula em diferentes pavimentos



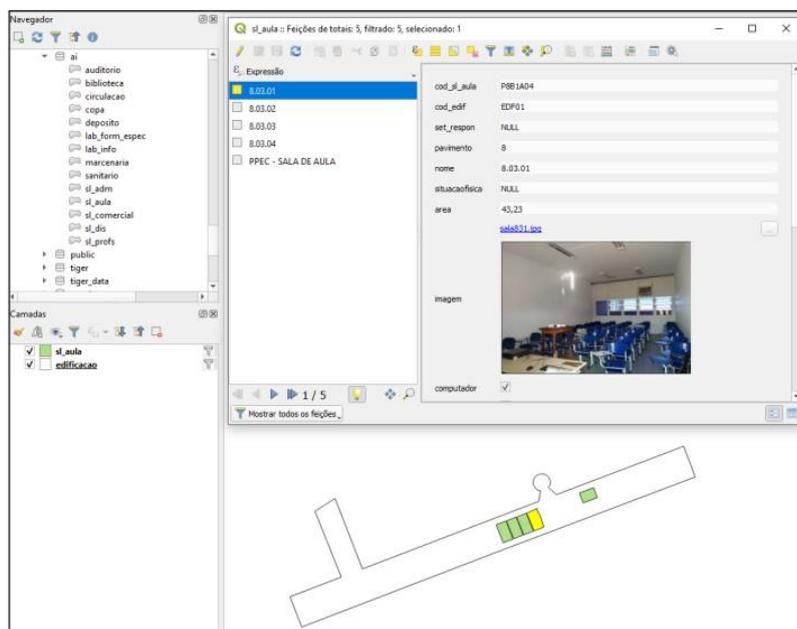
Fonte: Magalhães (2020).

Silva (2021) propôs uma modelagem conceitual de acordo com as Especificações Técnicas para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV)⁴³ e ET-EDGV-SPU⁴⁴ e modelagem física com implementação no banco de dados de categorias importantes para compor um SIG *Web* da Escola Politécnica da UFBA. O objetivo é que esse banco de dados seja utilizado na disponibilização de dados para auxiliar na gestão do espaço físico da Universidade. Um exemplo de consulta e visualização de dados cadastrados pode ser verificado na Figura 31.

⁴³ Esta Especificação Técnica consiste em uma norma do mapeamento sistemático terrestre que é adotado como um dos padrões da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).

⁴⁴ Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais do Patrimônio Público Federal cujas atividades descritas são desenvolvidas pela Secretaria de Patrimônio da União (SPU) do Ministério do Planejamento do Brasil.

Figura 31 - Consulta ao banco de dados e visualização no QGIS



Fonte: Silva (2021).

Outro trabalho que se destaca nessa temática é o de Sacramento (2021), que utilizou o conceito de *Internet of Things* (IoT) relacionado ao desenvolvimento de uma arquitetura de sistemas para captura e transmissão de dados em tempo real para apoio a gestão da segurança contra incêndios em *campi* universitários, buscando uma otimização quanto aos processos de gerenciamento, que envolvem resgate de vítimas, veracidade das ocorrências, emissão de alertas e um combate mais eficiente contra o fogo.

Diante do exposto, esta tese reuniu os dados provenientes dos trabalhos desenvolvidos anteriormente bem como os dados do aerolevante de 2017 disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Salvador para o desenvolvimento da aplicação SIG 3D do *campus* Federação Ondina da UFBA. A aplicação em questão envolve a construção dos modelos geométricos de edificações (contendo informações semânticas), sistema viário e terreno, cujo detalhamento está descrito no Capítulo 5.

5 PROJETO E MODELAGEM CONCEITUAL DO SIG 3D

Neste Capítulo estão descritas as etapas propostas para o projeto e modelagem conceitual de uma aplicação SIG 3D que engloba: os casos de uso da aplicação, requisitos funcionais do sistema, requisitos dos dados, funcionalidades da ferramenta, e uma breve explanação sobre como a extensão do CityGML foi proposta e inserida na modelagem conceitual da aplicação. Esta abordagem apresenta caráter inovador pois até o momento, na literatura, não há registro de uma aplicação 3D representada por uma extensão do padrão CityGML desenvolvida para *campus* universitários com a finalidade proposta nesta tese.

O protótipo para o *campus* Federação Ondina da UFBA representa uma aplicação SIG 3D realizada a partir da modelagem conceitual segundo padrão CityGML e da extensão proposta (detalhadas nas Figuras 36 e 37). Tem como objetivo subsidiar visualizações e análises que permitam a otimização dos espaços construídos no *campus* (voltados à estrutura física, uso e função dos espaços bem como a identificação dos locais suscetíveis a determinados riscos impostos, por exemplo, pelos laboratórios).

A alocação dos espaços representa um grande problema que a UFBA e outras universidades enfrentam, principalmente no que se refere à otimização dos usos destes espaços para as atividades de ensino, pesquisa e extensão. Diante deste desafio, a aplicação SIG 3D é desenvolvida levando em consideração as consultas e análises espaciais que podem ser evidenciadas com a terceira dimensão nos diferentes pavimentos da Escola Politécnica bem como nas demais edificações presentes no *campus*.

A Escola Politécnica foi representada no LOD4, pelo fato de ser uma unidade que apresenta um certo grau de complexidade, sendo a maior edificação da área de estudo (com oito pavimentos). Possui um alto fluxo de pessoas (alunos, professores e técnico-administrativos), e apresenta características únicas, como a presença de laboratórios de várias naturezas que possibilitam a simulação de cenários que envolvem potenciais riscos à segurança.

5.1 CASOS DE USO DA APLICAÇÃO 3D

Os casos de uso foram elaborados com base nos três principais usuários em potencial da aplicação SIG 3D que são: os alunos, os docentes e os gestores de um *campus* universitário. Sendo assim, cada um possui um papel a ser desenvolvido e necessidades distintas neste contexto.

Cabe ao aluno, entre outras atividades: participar de aulas das disciplinas nas quais está matriculado e realizar cursos além do currículo acadêmico (caso seja de seu interesse) e para isso, precisam acessar instalações e serviços do *campus*, como salas de aula, laboratórios, bibliotecas e refeitórios.

Já os docentes atuam nas atividades de ensino, pesquisa e extensão, preparando e ministrando aulas, produzindo e corrigindo artigos acadêmicos e orientando alunos; portanto, é necessário que participem de treinamentos, cursos de atualização e *workshops*, permitindo o aperfeiçoamento contínuo, e precisam ter acesso a recursos tecnológicos para contribuir no desenvolvimento de suas atividades.

E por fim, os gestores⁴⁵, que atuam em diferentes frentes, em relação à infraestrutura e serviços, segurança e tomada de decisões voltadas principalmente aos fatores acadêmicos e administrativos. Quanto à infraestrutura e serviços, precisam garantir que as instalações (como salas de aula, laboratórios e bibliotecas) estejam em bom estado e atendam às necessidades de uso cotidiano e excepcionais.

No que se refere à segurança que deve ser vista como prioridade para alunos, professores e funcionários, é fundamental a identificação de saídas de emergência, da localização de equipamentos de proteção individual (nas áreas internas das edificações) e o uso de câmeras posicionadas estrategicamente para segurança de pessoas e bens patrimoniais. Essas ações podem reduzir o risco de roubos e furtos e possibilitar o monitoramento de áreas com maior risco de incêndios e explosões nas edificações.

Desta forma, a tomada de decisões leva em conta fatores acadêmicos e administrativos nos quais são fundamentais a obtenção e a análise de informações para a eficácia do processo visando redução de tempo e recursos.

Para atender aos requisitos, foram elaborados os casos de uso que se referem ao gerenciamento da estrutura física da Escola Politécnica, de acordo com a Figura 32. O diagrama de casos de uso apresenta as relações entre o analista, o sistema e os usuários. O analista SIG é responsável por criar um sistema que atenda às necessidades de cada usuário (aluno, professor e gestor). Também cabe ao analista prever a possibilidade dos usuários utilizarem o sistema

⁴⁵ O gestor poderia inclusive modificar as informações no sistema semestralmente ou anualmente a depender da necessidade em relação à demanda, como por exemplo a alocação de turmas e disciplinas em cada sala, que trata-se de um dado com alta frequência de alterações.

como uma forma de comunicação⁴⁶ com o gestor, informando eventos importantes e/ou urgentes que ocorrem no *campus* universitário.

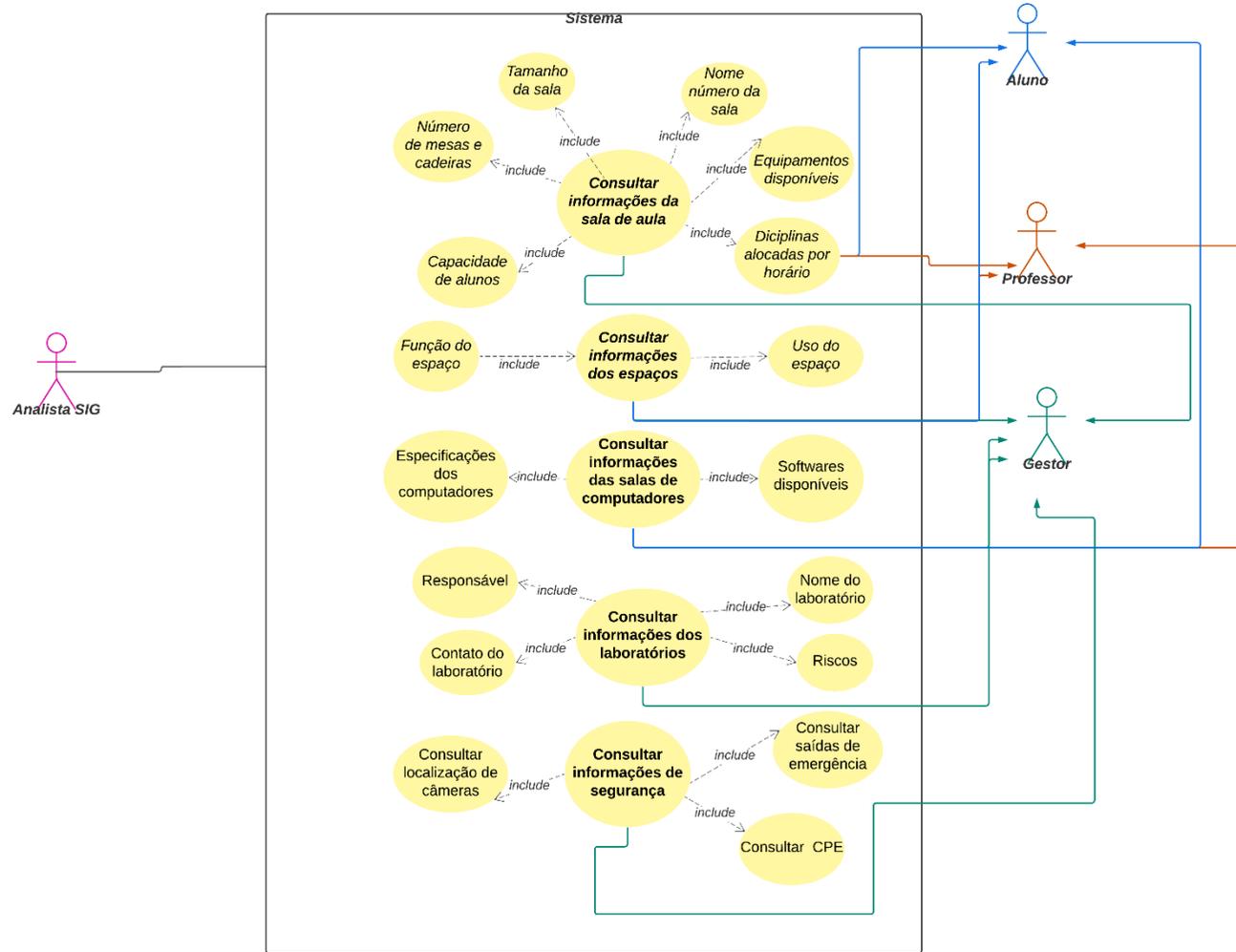
O sistema é responsável por possibilitar a consulta e análise de informações relacionadas a: espaços (uso e função); salas de aula (nome ou número da sala, tamanho, capacidade de alunos, número de mesas e cadeiras, equipamentos disponíveis e horários das disciplinas alocadas em cada uma delas); salas de computadores (especificações das máquinas e softwares disponíveis); laboratórios (nome do laboratório, responsável, contato e tipo de risco associado ao mesmo); e segurança (localização das câmeras, saídas de emergência e equipamentos de proteção coletiva como extintores de incêndio).

Os usuários (alunos, professores e gestor) podem visualizar as informações provenientes das consultas de diferentes formas na interface, a depender dos seus objetivos. As informações sobre as salas de aula podem ser úteis aos três usuários, no entanto para o aluno e professor são de maior interesse a localização das salas de aulas de suas respectivas disciplinas, equipamentos disponíveis, localização de laboratórios, bibliotecas e refeitórios. Já o gestor precisa de informações mais detalhadas para embasar suas tomadas de decisões quanto às necessidades cotidianas e excepcionais das unidades universitárias.

O gestor, nesta aplicação SIG 3D, poderá se beneficiar das análises a partir dos casos de uso da Figura 32, como por exemplo, a análise dos deslocamentos realizados pelos alunos, que podem ser visualizadas por meio da representação das rotas entre edificações ou entre salas de uma mesma edificação. Outro caso de uso está relacionado aos tipos de risco potencial de alguns laboratórios da UFBA, podendo ser mensurado através dos *buffers* que indicam a área de influência de determinado risco.

⁴⁶ Neste caso, o sistema poderia disponibilizar um *chat* ou algo similar para alunos, professores e funcionários informarem rapidamente sobre vazamentos de água, incêndios, ameaças à segurança, ou quaisquer informações relevantes de serviços essenciais da Universidade.

Figura 32 - Diagrama de Casos de Uso



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

5.2 REQUISITOS FUNCIONAIS

Alguns requisitos da aplicação proposta foram elaborados de forma ampla para abranger análises de todo o *campus* universitário, enquanto outros buscam atender a parte interna da edificação da Escola Politécnica. Os requisitos estão relacionados às ações que o sistema deve realizar. Foi utilizada a metodologia baseada no Design Centrado no Usuário (DCU)⁴⁷ para elaboração dos requisitos deste sistema, descritos a seguir:

- Consultar capacidade de salas de aula e disponibilidade de equipamentos das mesmas;
- Identificar disciplinas alocadas por horário em cada sala das unidades universitárias;
- Identificar os usos e funções dos espaços de todas as edificações do *campus* e em particular dos espaços de um pavimento da Escola Politécnica;
- Reconhecer áreas suscetíveis aos riscos oferecidos por laboratórios.

5.3 REQUISITOS DE DADOS

Os dados geométricos utilizados para o desenvolvimento da aplicação serão descritos nas seções 5.3.1; 5.3.2 e 5.3.3, que pertencem aos módulos do CityGML: *Relief*, *Transportation* e *Building*. Conforme explicado anteriormente, para detalhamento da aplicação foi selecionada a Escola Politécnica, cujos dados geométricos foram cedidos por Magalhães (2020), contendo os oito pavimentos da unidade.

A aplicação SIG 3D em questão utiliza as informações semânticas para as edificações, segundo o padrão CityGML: função; uso; ano de construção; ano de demolição; tipo de telhado; altura média; número de pavimentos; altura de pavimentos acima do solo e abaixo do solo, conforme descrito na seção 5.3.3.

Para a Escola Politécnica foram considerados como atributos gerais: pavimentos, salas (de aula e de computadores); laboratórios; gabinetes de professores; área de circulação (corredores); entradas e saídas do prédio; e dados específicos coletados por Magalhães (2020) para as salas como: nome ou número da sala; disciplinas alocadas; capacidade de alunos; tamanho; número de mesas, cadeiras, computadores; disponibilidade de climatização, projetor

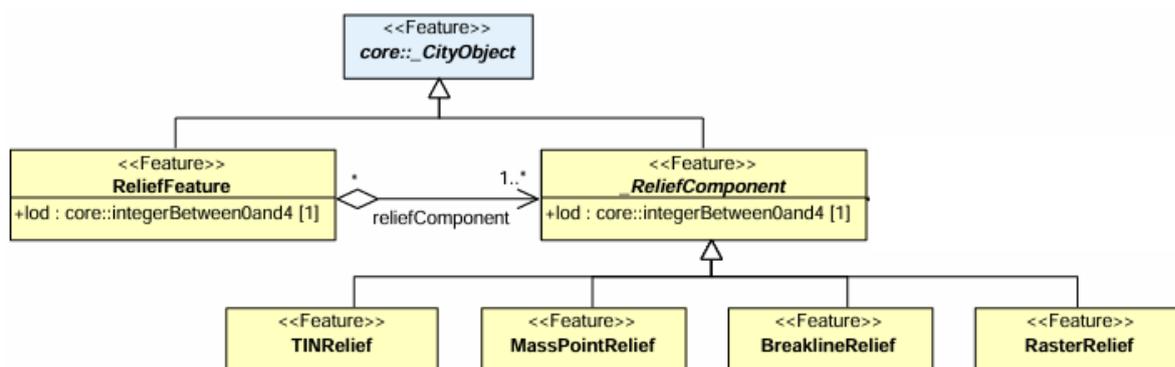
⁴⁷ O design centrado no usuário é uma abordagem que visa garantir que a interface atenda aos objetivos e necessidades do usuário.

e disponibilidade de internet⁴⁸.

5.3.1 Módulo *Relief*

A classe *ReliefFeature* representa o terreno e consiste em uma ou mais entidades da classe *ReliefComponent*. O terreno pode ser representado como dados em formato *raster* ou grade regular (*RasterRelief*); rede irregular triangular – *Triangulated Irregular Network* - TIN (*TINRelief*); linhas de quebra (*BreaklineRelief*)⁴⁹ ou massa de pontos (*MasspointRelief*)⁵⁰ conforme Figura 33. Cada uma dessas geometrias pode ser representada por diferentes níveis de detalhe e parte do terreno pode ser descrita pela combinação de algumas geometrias. Nesta tese, o terreno será representado no formato rede irregular triangular.

Figura 33 - Diagrama UML do Módulo *Relief*



Fonte: Groger *et al.* (2012).

5.3.2 Módulo *Transportation*

O módulo de transportes do CityGML 2.0 apresenta a classe principal *TransportationComplex* que é composta pelas classes *TrafficArea* e *AuxiliaryTrafficArea*. A classe *TrafficArea* é usada para pista de rolamento, calçadas, estacionamentos, zonas pedonais e ciclovias. Já a classe *AuxiliarTrafficArea* refere-se a: meio-fio, faixas intermediárias, áreas verdes e canteiros centrais com ou sem vegetação. Os objetos neste módulo são classificados tematicamente como: *Track* (trilha), *Road* (autoestradas, estradas secundárias e ruas), *Railway* (ferrovia) e *Square* (praça). Nesta pesquisa será utilizado esse modelo conceitual, de acordo

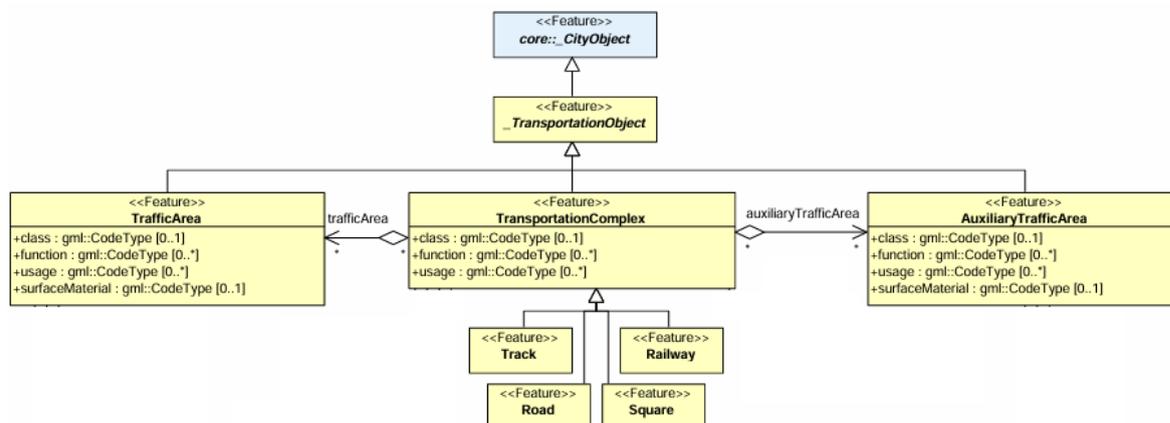
⁴⁸ Estas informações estão detalhadas no dicionário de dados e foram organizadas de acordo com a Figura 37.

⁴⁹ A geometria *Breakline Relief* pode ser composta por linhas de quebra e linhas de cume/vale. Sendo que, linhas de quebra indicam mudanças abruptas na inclinação do relevo e linhas de cume/vale indicam mudança no gradiente de inclinação.

⁵⁰ *MasspointRelief* é usado para massa de pontos com coordenadas tridimensionais.

com a Figura 34, com exceção da classe Ferrovia que não existe na área de estudo.

Figura 34 - Diagrama UML do Módulo *Transportation*



Fonte: Groger *et al.* (2012).

Os dados relacionados ao módulo de transportes que serão utilizados nesta tese foram obtidos no *website* da Prefeitura do Município de Salvador e estão agrupados nas categorias: estrutura de mobilidade urbana (EMU), que agrega acesso e escadarias; e classes base do mapeamento topográfico em grandes escalas (CBGE), que compreendem estacionamento, meio fio, passeio, canteiro central, trechos de arruamento. Após a aquisição dos dados, os mesmos foram categorizados de acordo com o diagrama UML da Figura 34.

5.3.3 Módulo *Building*

Na Figura 35, é possível verificar as classes que compõem o módulo Edificações do CityGML 2.0. *AbstractBuilding* é a classe principal deste modelo conceitual, que representa uma subclasse da classe temática *Site*, e é especializada em *Building* e *BuildingPart*.

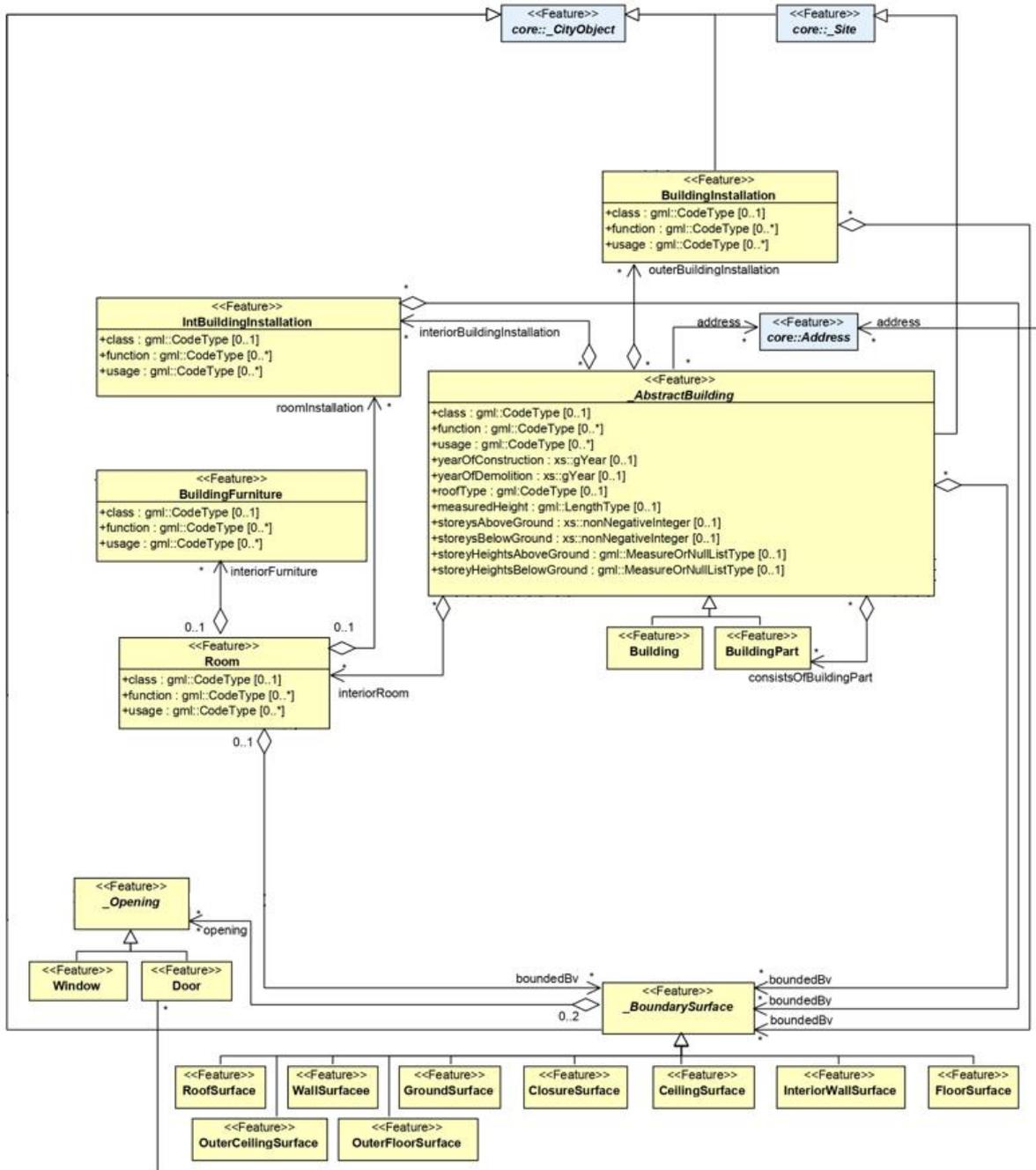
O módulo edificações também contempla a classe *BoundarySurface* (representada a partir do LOD2), que é a parte da casca externa da edificação com função especial como parede (*WallSurface*), telhado (*RoofSurface*), piso (*GroundSurface*), piso da área externa (*OuterFloorSurface*), telhado da área externa (*OuterCeilingSurface*) ou *ClosureSurface*⁵¹ (abertura em edificação não preenchida por porta ou janela, podendo ser selada por superfície

⁵¹ Um *ClosureSurface* é usado, por exemplo, para separar cômodos com funções diferentes, como cozinha e sala conectadas e sem porta. O *ClosureSurface* difere de uma porta comum pelo fato de que uma porta pode ser fechada, com o intuito de bloquear o trânsito de pessoas (Groger *et al.*, 2012).

virtual).

A classe *Opening* é especializada nas classes *Window* e *Door* (janelas e portas), visualizadas nos LOD3 e 4. E a classe *Room* corresponde às salas de uma edificação, verificadas no LOD4.

A classe *BuildingInstallation* é usada para varandas, chaminés e escadas externas, e a classe *IntBuildingInstallation*, para objetos do edifício que não podem ser movidos. As lâmpadas por exemplo (que pertencem à classe *IntBuildingInstallation*) são associadas a uma sala específica (classe *Room*) enquanto vigas e tubos (que também pertencem à classe *IntBuildingInstallation*) são associados a um edifício ou parte dele (classe *AbstractBuilding*). Já a classe *BuildingFurniture* é representada por móveis presentes em uma sala como mesas e cadeiras.

Figura 35 - Diagrama UML do módulo *Building*

Fonte: Groger *et al.* (2012).

5.4 FUNCIONALIDADES DA APLICAÇÃO

As funcionalidades propostas para esta aplicação envolvem:

- Visualização das geometrias das edificações em LOD1 e 2 (com seus respectivos atributos);
- Visualização das geometrias da Escola Politécnica em LOD4 e seus respectivos

atributos;

- Realização de consultas de acordo com as classes previstas, como por exemplo: localização das salas de aulas e equipamentos disponíveis ou localização das salas de computadores com seus respectivos atributos como: softwares disponíveis, número de máquinas, possibilidade de compartilhar máquinas⁵² etc.;
- Análises espaciais a partir dos horários das disciplinas e a localização onde são ministradas, permitindo a representação de rotas para indicação dos deslocamentos necessários internamente em uma edificação ou entre diferentes edificações do *campus*;
- Representação dos usos e funções das edificações e das salas da Escola Politécnica por meio de cores distintas (exemplo educação e administração em LOD1) e (sala com computadores, gabinete de professores, laboratórios específicos, sala de aula, cozinha, banheiros etc., em LOD4);
- Identificação das áreas suscetíveis a determinado risco, a partir da ferramenta *buffer*, que permite visualizar os espaços localizados num raio de abrangência (raio a ser determinado a depender do tipo de risco).

5.5 MODELAGEM CONCEITUAL DA APLICAÇÃO SIG 3D

A modelagem conceitual da aplicação SIG 3D foi dividida em área externa do *campus* e área interna das edificações, com o intuito de facilitar a visualização e explicação. A área externa do *campus* engloba os módulos *Relief*, *Transportation* e *Building* em LOD1 e 2, seguindo os princípios da modelagem UML, conforme verificado no diagrama de classes da Figura 36, que indica:

- Todas as classes principais (*ReliefFeature*, *TransportationObject* e *AbstractBuilding*) dos três módulos (*Relief*, *Transportation* e *Building*) estão associadas a classe *CityObject* (classe mãe) da qual derivam todas as outras na norma CityGML 2.0. Estas mesmas classes principais também estão contidas na classe *campus* (classe criada como uma ADE para esta aplicação SIG 3D);
- A classe *ReliefFeature*, é composta por *ReliefComponente*, e especializada em *TINRelief* (do módulo Terreno);
- No módulo *Transportation* observa-se a classe *TransportationComplex* que compõe as

⁵² A possibilidade de compartilhar máquinas está relacionada ao espaço disponível para dois alunos utilizarem simultaneamente o mesmo computador.

classes *TrafficArea* e *AuxiliaryTrafficArea*. A classe *TransportationComplex* é especializada em *Track*, *Road* e *Square*.

- *AbstractBuilding*, classe principal do módulo *Building* é uma superclasse especializada nas subclasses *Building* e *BuildingPart*. A classe *BuildingInstallation* possui uma relação de agregação com *AbstractBuilding*. No LOD2 a classe *BoundarySurface* (que também possui uma relação de agregação com *AbstractBuilding*) é especializada em *RoofSurface*, *WallSurface*, *GroundSurface*, *ClosureSurface*, *OuterFloorSurface* e *OuterCeilingSurface*. Os atributos previstos para a classe *AbstractBuilding* são classe, função, uso, altura média, tipo de telhado, ano de construção e demolição, número de pavimentos, altura de pavimentos acima e abaixo do solo⁵³.

⁵³ No Apêndice A é possível verificar o dicionário de dados contendo o significado de todas as classes bem como os tipos de dados utilizados.

AbstractBuilding) é especializada em *FloorSurface*, *CeilingSurface*, *InteriorWallSurface* e *ClosureSurface*.

No LOD3 e 4, existe uma relação de agregação da classe *Opening* (que se especializa em *Door* e *Window*) com a classe *BoundarySurface*.

A circulação no andar está representada a partir da classe *FloorSurface*, especializada na classe *Path*, que possui relação com a classe *Entrance*, com a classe *Circulation* e com a classe CPE. As classes *Circulation* e *Entrance* também possuem relação através de uma rede arco-nó⁵⁵.

A classe *Room* possui uma relação de associação com as classes *Office*, *Computerpool* (associada à classe *Computer* e consequentemente à classe *Software_list*), *Lab*, *Classroom* e *OtherRooms*. A classe *Room* também está relacionada por meio de agregação com as classes *BuildingFurniture* e *IntBuildingInstallation* (que possui uma relação de associação com *AbstractBuilding*).

As classes *Room*, *BuildingFurniture*, *BuildingInstallation* e *IntBuildingInstallation* possuem os atributos previstos no padrão CityGML: classe, função e uso. Os atributos das classes estão referenciados no diagrama de classes na Figura 37 e no dicionário de dados das classes e atributos no Apêndice A. Para a classe *Classroom*,⁵⁶ os atributos são: nome/número e tamanho da sala, capacidade de alunos que a sala comporta, disponibilidade de climatização, computador para uso do professor, disponibilidade de projetor, internet, número de mesa e cadeiras.

As salas com computadores (denominadas na modelagem conceitual como *Computerpool*) possuem como atributos: nome da sala, capacidade de alunos, número de computadores, disponibilidade de climatização, projetor, internet e data de manutenção dos computadores. A classe *Computer* apresenta os atributos: data de aquisição, CPU⁵⁷, GPU⁵⁸,

⁵⁵ Uma rede arco-nó representa uma rede em que cada nó se comunica diretamente com outro. Nesta tese, a classe *Circulation* corresponde a este tipo de rede que compreende os caminhos percorráveis dentro de uma edificação em direção a determinados pontos (que são os nós da rede). O significado de todas essas classes pode ser encontrado no dicionário de dados (Apêndice A).

⁵⁶ As classes discutidas nesta seção bem como seus relacionamentos e atributos constam na modelagem conceitual expressa no diagrama de classes UML da Figura 37.

⁵⁷ A *Central Processing Unit* (CPU) refere-se à unidade central de processamento do computador.

⁵⁸ A *Graphics Processing Unit* (GPU) é a unidade de processamento que lida com operações gráficas.

fabricante, garantia, tamanho da tela do monitor, OS⁵⁹, RAM⁶⁰, ROM⁶¹ e número de tombo. E a classe *Software_list* representa uma lista de softwares instalados em cada computador que indica: nome do software, configuração mínima de CPU, GPU, RAM e ROM necessários e o tipo de licença. E a classe *Lab* apresenta os atributos: nome, responsável, contato, e tipo de risco. Neste caso, mapear estes riscos é importante pois alguns laboratórios podem conter produtos químicos tóxicos e inflamáveis.

⁵⁹ A sigla OS (*Operating System*) representa o sistema operacional.

⁶⁰ A sigla RAM refere-se ao termo *Random-Access Memory* que traduzida para o português é memória de acesso aleatório.

⁶¹ A sigla ROM refere-se ao termo *Ready-Only Memory* que traduzida para o português significa memória de apenas leitura.

6 PROPOSTA DE APLICAÇÃO SIG 3D

Este Capítulo descreve e discute a proposta de aplicação SIG 3D, que está dividida em: aquisição de dados geométricos; elaboração da base de dados; modelagem geométrica; armazenamento em banco de dados e uma discussão sobre a aplicação SIG 3D para *campus* universitário.

6.1 AQUISIÇÃO DE DADOS GEOMÉTRICOS

A aquisição de dados para criação da base de dados da área de estudo foi realizada a partir de técnicas como varredura a laser e aerofotogrametria. Os dados vetoriais e matriciais utilizados nesta pesquisa foram provenientes do último levantamento aerofotogramétrico oficial do município de Salvador para aquisição das imagens na escala urbana 1:1.000, realizado entre 9 de agosto de 2016 e 13 de fevereiro de 2017 respectivamente⁶².

A Cidade (compreendendo a área continental, área insular e adjacências do município de Salvador - BA) foi sobrevoada por uma aeronave equipada com câmera métrica digital modelo UltraCam Lprime da fabricante Vexcel, gerando o total de 4.906 fotografias georreferenciadas. A altimetria foi gerada a partir de um levantamento com sensor laser aerotransportado. Esses levantamentos permitiram a elaboração do Conjunto de Dados Geoespaciais Vetoriais (CDGV)⁶³ do município de Salvador. O mesmo segue as normas de estruturação de dados ET- EDGV Salvador e a norma de aquisição de dados ET-ADGV, uma vez que a primeira define as categorias, classes de objetos e respectivos atributos, enquanto que a segunda indica as regras gerais para a construção das geometrias e as regras topológicas mínimas.

Para compor a base de dados da área compreendida pelo *campus* Federação Ondina da UFBA (articulação SICAD 149.454, 149.463, 149.464, 156.222, 156.231, 156.232, 156.224, 156.223, 156.234), foram utilizadas as geometrias das seguintes categorias da ET-EDGV Salvador, disponibilizadas em formato de geoserviço WFS que possibilita ao usuário realizar

⁶² É importante ressaltar que nos anos de elaboração deste trabalho 2021/2022/2023 algumas áreas dentro do *campus* já haviam sofrido alterações, que não aparecem nas imagens (por terem sido capturadas em 2017), indicando a necessidade constante de atualização dos dados.

⁶³ O CDGV é um produto resultante da restituição estereofotogramétrica, que consiste no Banco de Dados Geográfico da Cidade de Salvador (informações extraídas do *website* <http://cartografia.salvador.ba.gov.br/>).

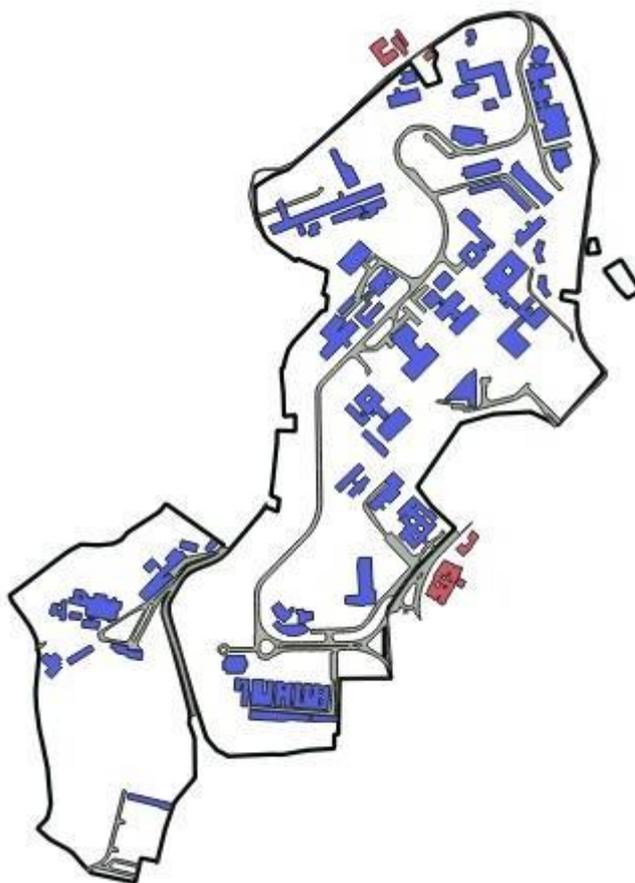
algumas operações como edição, seleção e filtragem, compatível com escala 1:1.000:

- Edificação (EDF);
- Estrutura de mobilidade urbana (EMU) – acessos e escadarias; e
- Classes base do mapeamento topográfico em grandes escalas (CBGE) – estacionamentos, meio fio, passeio, canteiro central, trechos de arruamento.

Estes dados foram agrupados de acordo com as categorias previstas na norma CityGML 2.0 da seguinte forma: as edificações foram mantidas no módulo edificações, e os dados que pertencem as classes EMU e CBGE foram organizados de acordo com as classes *TrafficArea* e *AuxiliarTrafficArea* do módulo transportes, previstas no CityGML, que estão detalhadas na seção 6.3.

A Figura 38 mostra as 67 edificações que compõem a área de estudo contendo as edificações localizadas dentro e fora da poligonal (cujos casos serão explicados na seção 6.2) bem como o arruamento principal.

Figura 38 - Edificações e arruamento da área de estudo

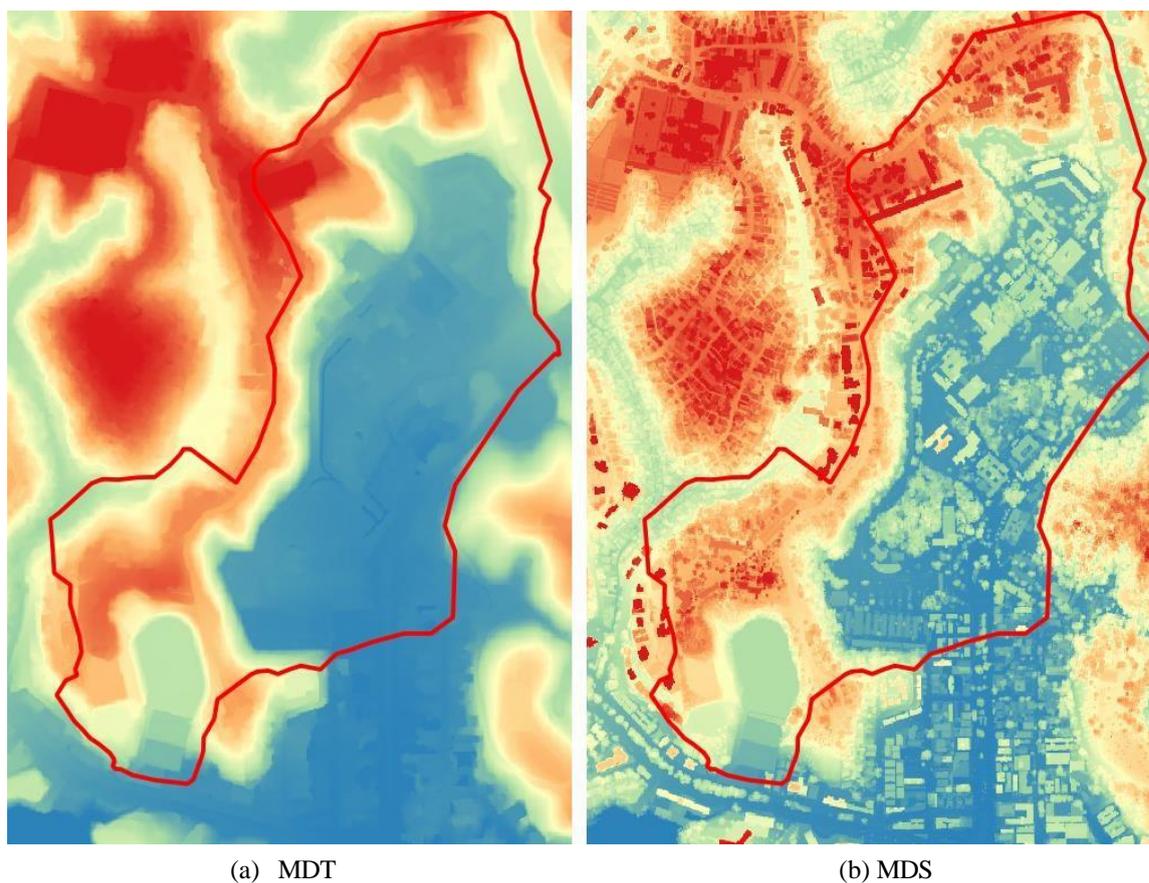


Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Também utilizou-se a ortofoto em formato de geoserviço WMS (formato que possibilita apenas visualização), proveniente do voo aerofotogramétrico do mapeamento cartográfico de Salvador do ano de 2017 (com escala de uso previsto de 1:1.000). A resolução espacial é de 0,10 m, a resolução espectral correspondente às bandas: R, G, B, IR e PAN e a resolução radiométrica: 16 bits. O MDT que representa as alturas do terreno (Figura 39a) e o MDS⁶⁴ que representa as alturas dos elementos localizados acima do terreno, como edificações, vegetação, entre outros, (Figura 39b), estão em formato TIFF.

Foi utilizada a poligonal de referência da área de estudo obtida a partir de um levantamento topográfico planialtimétrico, cadastral, e georreferenciado, do *campus* Federação Ondina, na escala de 1:500, realizado em julho de 2010.

Figura 39 - MDT e MDS da área de estudo



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

⁶⁴ A ortofoto, MDT e MDS estão disponíveis no *website* <http://cartografia.salvador.ba.gov.br/>.

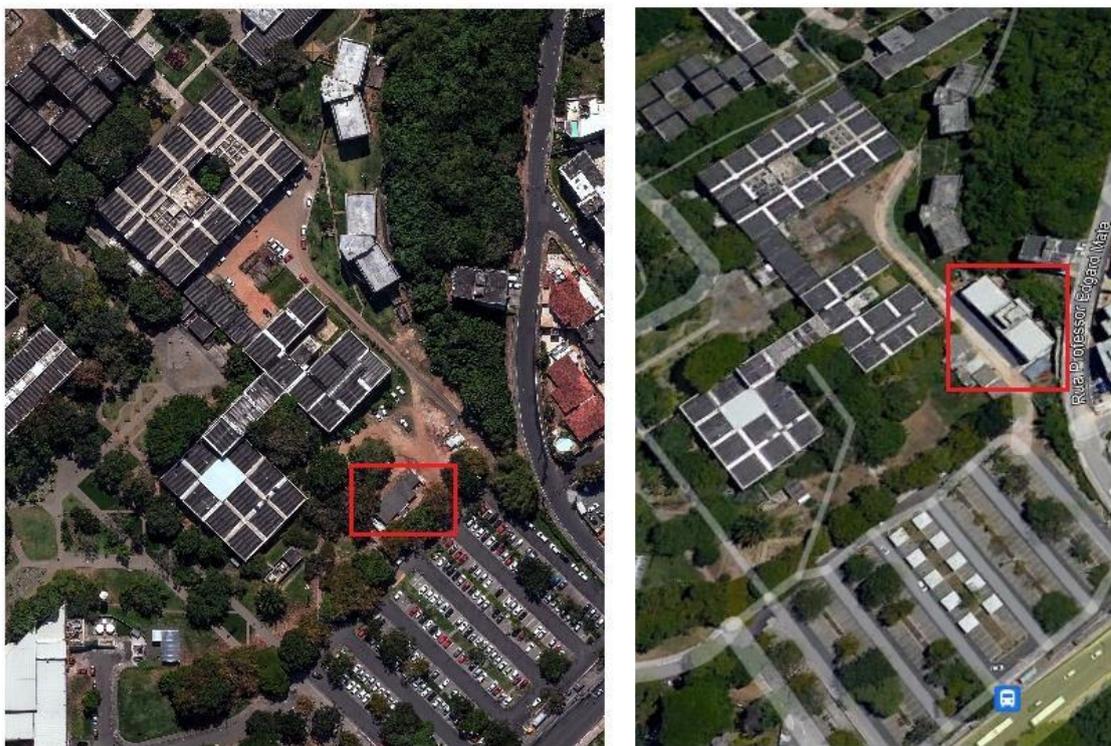
6.2 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS

A partir dos dados obtidos no *website* da Cartografia Salvador foi dado início ao processo de seleção e organização dos mesmos para compor a base de dados da área de estudo. Para isso, foram planejadas idas ao campo para verificação de feições que estavam em desacordo com as imagens. Essas atividades ocorreram em novembro e dezembro de 2021.

Utilizando o QGIS, foi organizada a base de dados a partir da verificação de todas as edificações e checagem de suas geometrias e visualização das demais camadas das categorias de estudo (vetoriais e matriciais). Os dados apresentam como sistema de referência o SIRGAS 2000/UTM zona 24S.

Com as visitas, foi possível verificar que alguns prédios, como o Cienam III e a nova biblioteca de São Lázaro, não aparecem na imagem de 2017, pois foram construídos posteriormente, em 2019, enquanto outra construção foi verificada apenas na imagem de 2017. Esses foram visualizados em campo e confirmados na imagem do Google Earth de 2021 (Figuras 40 e 41), e estão em destaque na cor vermelha. É possível perceber que na ortofoto de 2017, imagem da esquerda, o prédio do Cienam III, ainda não havia sido construído (Figura 40a), enquanto que na imagem do Google Earth de 2021 ele já aparece (Figura 40b). Na Figura 41a, também pode ser observado que em 2017 a nova biblioteca de São Lázaro não havia sido construída, mas em 2021 ela aparece na imagem do Google Earth (Figura 41b). A outra mudança é uma construção visualizada na imagem em 2017 (Figura 40a), mas não foi vista em campo e não consta na imagem de 2021 do Google Earth, provavelmente se trata de uma tenda (instalação provisória) que foi montada para dar suporte a outra construção e foi removida ao final da obra (Figura 40b).

Figura 40 - Alterações de construções na área de estudo



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Figura 41 - Novo prédio construído em São Lázaro



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Outra questão se refere às edificações residenciais e/ou comerciais que foram construídas indevidamente dentro da poligonal que pertence a área da Universidade, conforme evidenciado com um retângulo vermelho, na Figura 42.

Figura 42 - Edificações construídas em área proibida



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Também existem casos de edificações (Figuras 43 e 44) e terrenos (Figura 45) que pertencem a UFBA, mas estão fora da poligonal, como é o caso do Hospital de Medicina Veterinária, Prédios da PROAE e DCE.

Figura 43 - Hospital de Medicina Veterinária, construído fora da poligonal



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Figura 44 - Prédios da PROAE e DCE, construídos fora da poligonal



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

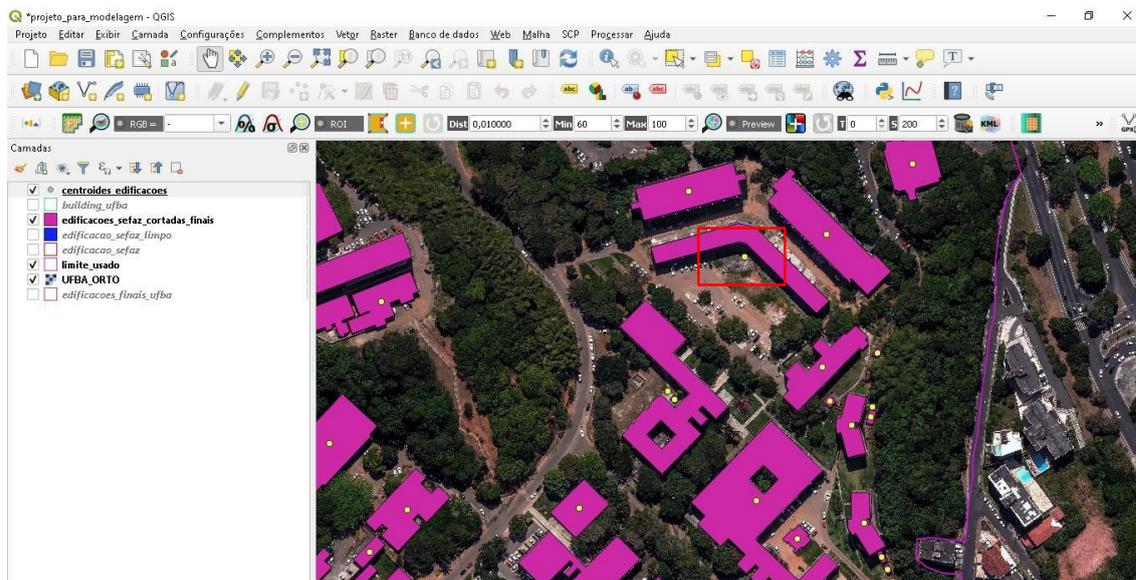
Figura 45 - Terrenos que pertencem a Universidade



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Após a verificação das geometrias das edificações, foi realizada a aquisição das alturas médias dos *footprints*. Para isso, também foi utilizado o QGIS no qual foi possível atribuir centroides para cada edificação de modo a permitir a obtenção do valor da altura para aquele ponto a partir do modelo digital de superfície e do modelo digital de terreno. Algumas edificações apresentaram erro na localização do centroide (conforme Figura 46) obtido de forma automática, sendo necessário posicioná-lo no centro da edificação manualmente.

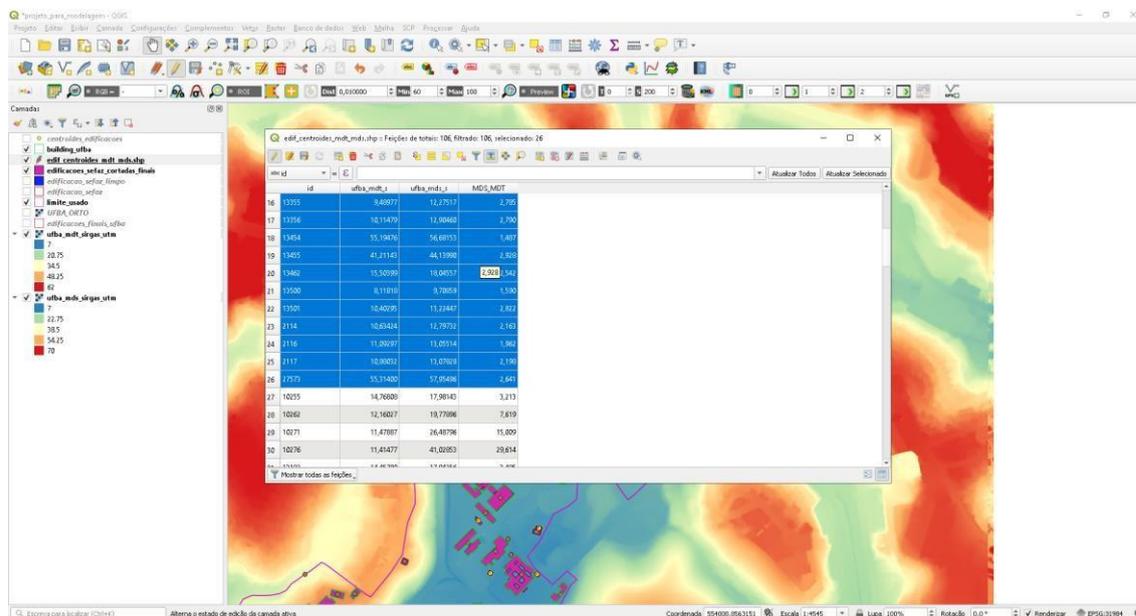
Figura 46 - Erro na atribuição do centroide das edificações



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

O processo de atribuir a altura média das edificações através do MDT e do MDS foi realizado com a normalização do MDS, que consiste em obter a diferença de altitude do MDS em relação ao MDT (Figura 47).

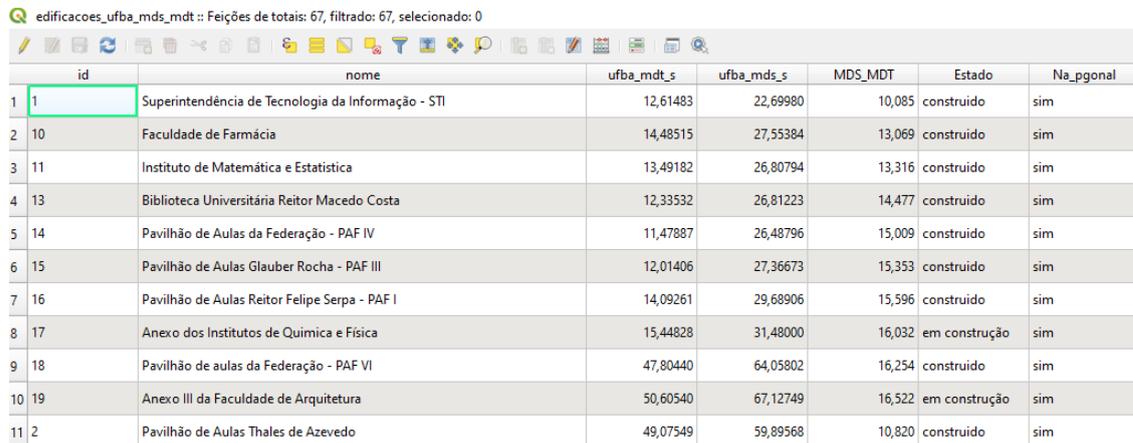
Figura 47 - Alturas das edificações a partir da normalização do MDS



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Por fim, foram inseridas informações em formato CSV⁶⁵ para as edificações como: nome da edificação, estado da construção (construído ou em construção) e localização da edificação (dentro ou fora da poligonal), conforme verificado na Figura 48.

Figura 48 - Tabela de atributos do arquivo *shapefile*



id	nome	ufba_mdt_s	ufba_mds_s	MDS_MDT	Estado	Na_pgonal
1	Superintendência de Tecnologia da Informação - STI	12,61483	22,69980	10,085	construido	sim
2	10 Faculdade de Farmácia	14,48515	27,55384	13,069	construido	sim
3	11 Instituto de Matemática e Estatística	13,49182	26,80794	13,316	construido	sim
4	13 Biblioteca Universitária Reitor Macedo Costa	12,33532	26,81223	14,477	construido	sim
5	14 Pavilhão de Aulas da Federação - PAF IV	11,47887	26,48796	15,009	construido	sim
6	15 Pavilhão de Aulas Glauber Rocha - PAF III	12,01406	27,36673	15,353	construido	sim
7	16 Pavilhão de Aulas Reitor Felipe Serpa - PAF I	14,09261	29,68906	15,596	construido	sim
8	17 Anexo dos Institutos de Química e Física	15,44828	31,48000	16,032	em construção	sim
9	18 Pavilhão de aulas da Federação - PAF VI	47,80440	64,05802	16,254	construido	sim
10	19 Anexo III da Faculdade de Arquitetura	50,60540	67,12749	16,522	em construção	sim
11	2 Pavilhão de Aulas Thales de Azevedo	49,07549	59,89568	10,820	construido	sim

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Após a elaboração da base de dados foi possível identificar que a área possui 67 edificações, conforme Quadro 7, que agregam:

- Unidades universitárias;
- Pavilhões de aulas;
- Restaurantes universitários;
- Bibliotecas;
- Banco;
- Demais construções (que se referem aos anexos das unidades universitárias e outros).

⁶⁵ O formato CSV é muito utilizado nos softwares SIG para informar valores de texto separados por vírgula.

Quadro 7 - Categorização das edificações da área de estudo

Tipo	Nome da edificação
Unidades universitárias	Escola Politécnica
	Escola de Dança
	Escola de Música
	Escola de Medicina Veterinária e Zootecnia
	Faculdade de Arquitetura
	Faculdade de Comunicação
	Faculdade de Farmácia
	Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas
	Instituto de Biologia
	Instituto de Ciência da Informação
	Instituto de Física
	Instituto de Geociências
	Instituto de Letras
	Instituto de Matemática e Estatística
	Instituto de Química
Instituto de Psicologia	
Pavilhões de aulas	Instituto de Humanidades, Artes e Ciências Prof. Milton Santos (IHAC)
	Pavilhão de Aulas Reitor Felipe Serpa (PAF I)
	Pavilhão de Aulas Alceu Hiltner (PAF II)
	Pavilhão de Aulas Glauber Rocha (PAF III)
	Pavilhão de Aulas da Federação (PAF IV)
	Pavilhão de Aulas da Federação (PAF V)
	Pavilhão de Aulas da Federação (PAF VI)
	Pavilhão de Aulas Raul Seixas (PRS)
	Pavilhão de Aulas Thales de Azevedo (antigo PASL)
Pavilhão de Aulas José Calazans	
Bibliotecas	Biblioteca Universitária de Ciências e Tecnologia Prof. Omar Catunda
	Biblioteca Universitária Isaias Alves
	Biblioteca Universitária Reitor Macedo Costa
Restaurantes universitários	RU de São Lázaro
	RU de Ondina
Bancos	Banco do Brasil
	Santander (atualmente desativado)
	Caixa Econômica Federal (atualmente desativado)

Tipo	Nome da edificação
Unidades administrativas	Pró-Reitoria de Desenvolvimento de Pessoas (PRODEP)
	Coordenação de Desenvolvimento Humano (CDH)
	Coordenação de Gestão de Pessoas (CGP)
	Pró-Reitoria de Ações Afirmativas e Assistência Estudantil
	Pró-Reitoria de Administração (PROAD)
	Coordenação de Gestão Administrativa (CGA)
	Coordenação de Arquivo e Documentação (CAD)
	Coordenação de Gestão de Segurança dos <i>Campi</i> (COSEG)
	Coordenação de Contabilidade e Finanças (CCF)
	Coordenação de Material e Patrimônio (CMP) e Setor de Gestão Administrativa e Financeira
	Superintendência de Avaliação e Desenvolvimento Institucional (SUPAD)
	Superintendência de Educação a Distância (SEAD)
	Superintendência de Meio Ambiente e Infraestrutura (SUMAI)
Demais edificações	Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente (Cienam I, II e III)
	Centro de Estudos da Arquitetura na Bahia (CEAB)
	Núcleo de Estudos Interdisciplinares sobre a Mulher (NEIM)
	Centro Interdisciplinar para o Desenvolvimento Social (CIEDS)
	Biotério
	Superintendência de Tecnologia da Informação (STI)
	Coordenação de Material e Patrimônio (CMP - antiga divisão de material)
	Hospital Veterinário
	Laboratório de Física Nuclear Aplicada
	Auditório do Instituto de Biologia
	Casarão do Alto de São Lázaro (atualmente faz parte da Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas)
	Centro de Educação Física e Esportes
	EDUFBA
	Galpões PROAD (SUMAI I e II)
	TELEUFBA
Diretório Central de Estudantes (DCE)	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6.3 MODELAGEM GEOMÉTRICA DO *CAMPUS*

Após a preparação da base de dados com auxílio do QGIS, procedeu-se com a modelagem geométrica das edificações do *campus* Federação Ondina, nos LOD1, 2 e 4 do CityGML, dos módulos transportes e terreno em LOD2. Para isso, após alguns testes em diferentes ferramentas, optou-se por utilizar o SketchUp e seu *plugin* CityEditor⁶⁶, uma vez que, o mesmo permite a modelagem nos níveis de detalhe pretendidos e a importação e exportação

⁶⁶ O CityEditor consiste em um *plugin* comercial, no entanto, a autora obteve uma licença pelo período de 1 ano, diretamente com a empresa alemã 3DIS GmbH.

do modelo nos formatos necessários.

6.3.1 Modelagem Geométrica das Edificações

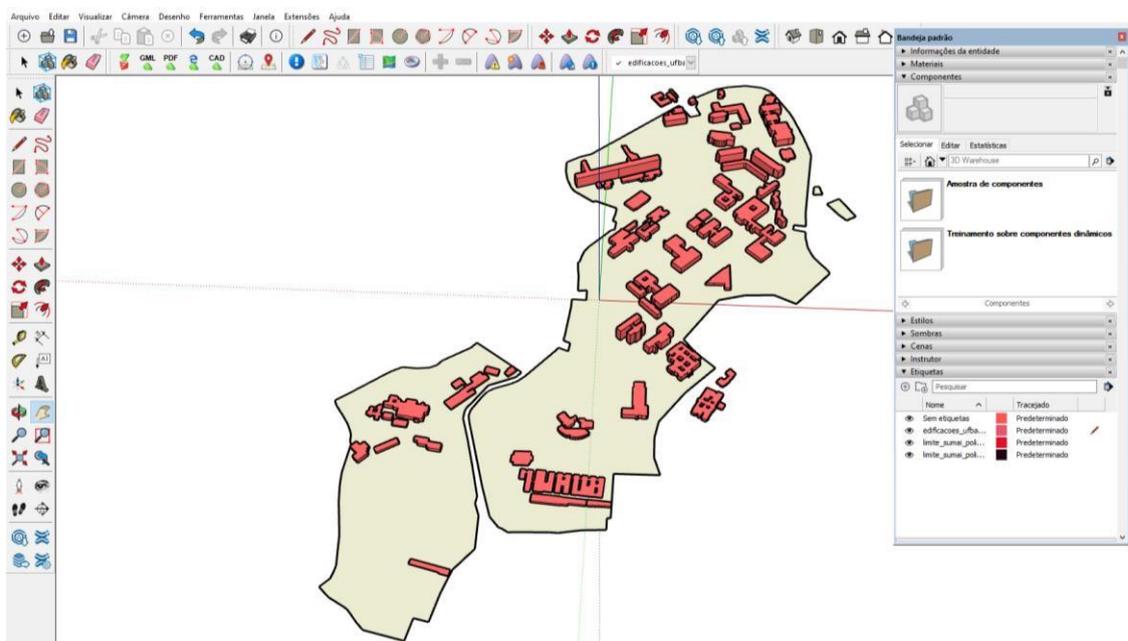
A modelagem geométrica em LOD1 das edificações consiste na extrusão dos *footprints*, a partir do valor correspondente à altura média das edificações. Sendo assim, existem algumas opções para realizar essa modelagem, desde formas manuais, inserindo altura de cada edificação, até a forma automática, com valores de todas as edificações de uma vez.

Optou-se pela modelagem manual, devido ao número reduzido de feições na área de estudo e pelo fato do CityEditor (*plugin* utilizado também para modelagem nos demais LOD) facilitar a modelagem, finalizando com a exportação do modelo para o formato CityGML.

O arquivo vetorial (em formato *shapefile*) das edificações foi importado diretamente pelo *plugin* CityEditor de acordo com o nível de detalhe pretendido. Em seguida, foi necessário atribuir um sistema de referência para os dados, que nesse caso foi o SIRGAS 2000/UTM 24. O *plugin* possibilita também delimitar a área de estudo a partir dos mapas base.

Para realização da modelagem geométrica em LOD1 das edificações foi utilizada a ferramenta *push pull* do SketchUp, para inserir a altura das edificações, uma de cada vez. A modelagem das edificações da área de estudo pode ser verificada na Figura 49.

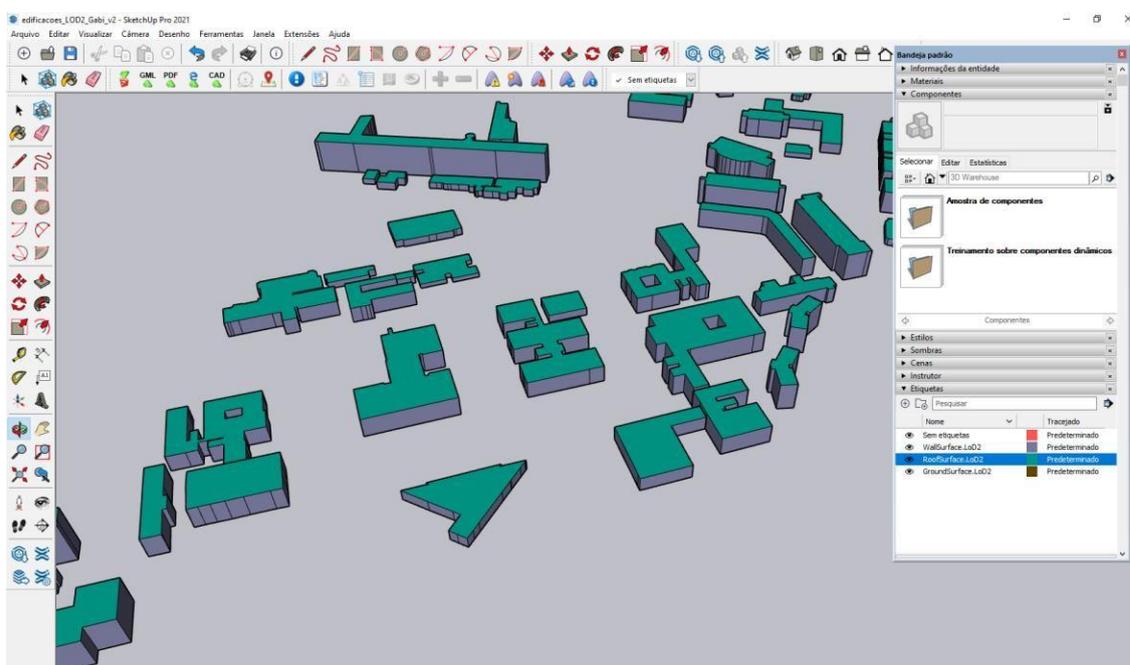
Figura 49 - Modelagem geométrica LOD1 no SketchUp



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Após a modelagem geométrica das edificações por meio da extrusão no SketchUp (LOD1), foi possível realizar a modelagem em LOD2. O LOD2 pressupõe a existência da classificação das edificações em superfícies de telhado, parede e piso (respectivamente *RoofSurface*, *WallSurface* e *GroundSurface*). Essa classificação no CityEditor é atribuída a partir das angulações pré-definidas que indicam o ângulo da superfície em relação ao terreno (para o telhado são consideradas as angulações no intervalo de 0° à 60° , parede de 80° à 100° e piso 160° à 180°)⁶⁷. O resultado da modelagem das edificações em LOD2 pode ser visualizado na Figura 50.

Figura 50 - Modelagem geométrica LOD2 no CityEditor



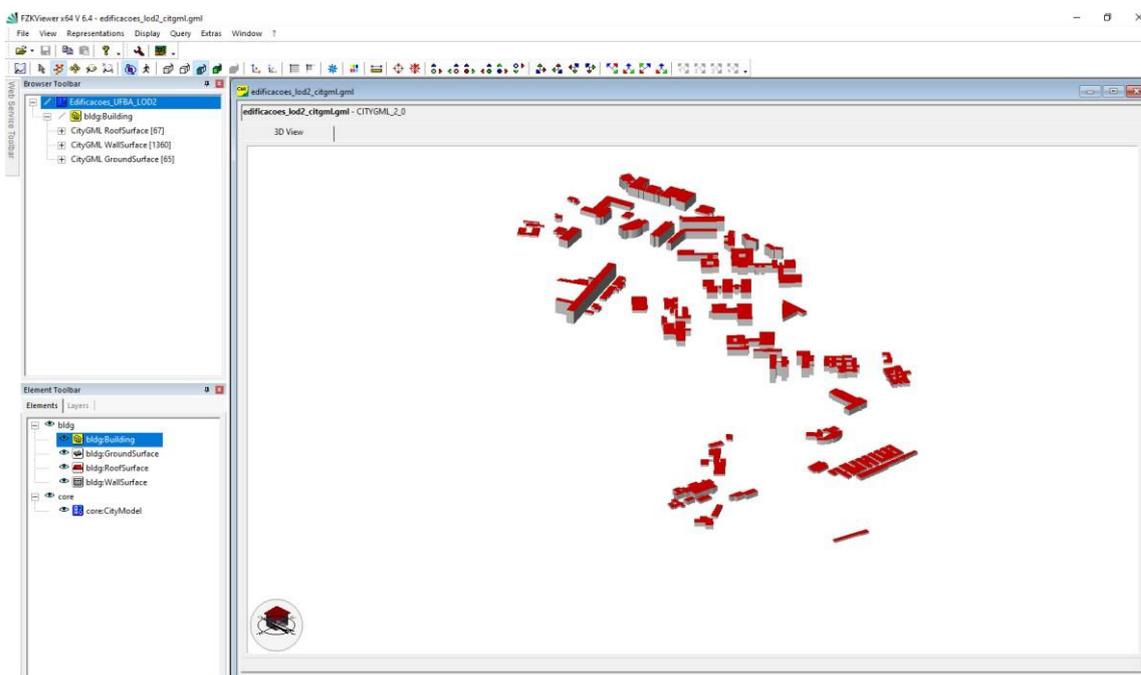
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

O modelo geométrico contendo as edificações pode ser exportado do CityEditor em diferentes formatos: CityGML, 3D-PDF, CAD ou versão *web* (com o WebGL). Na opção CityGML, é possível selecionar o nível de detalhe (LOD1, 2, 3 ou 4), e a opção da geometria adequada, que pode ser *CompositeSurface* ou *CompositeSolid*.

O modelo geométrico em formato CityGML com as edificações em qualquer LOD pode ser visualizado no FKZViewer, conforme Figura 51, que demonstra as edificações do *campus* em LOD2 (com as superfícies telhado, parede e piso).

⁶⁷ Esses valores são pré-estabelecidos no CityEditor, mas podem ser alterados a critério do usuário.

Figura 51 - Modelo geométrico visualizado no FZKViewer



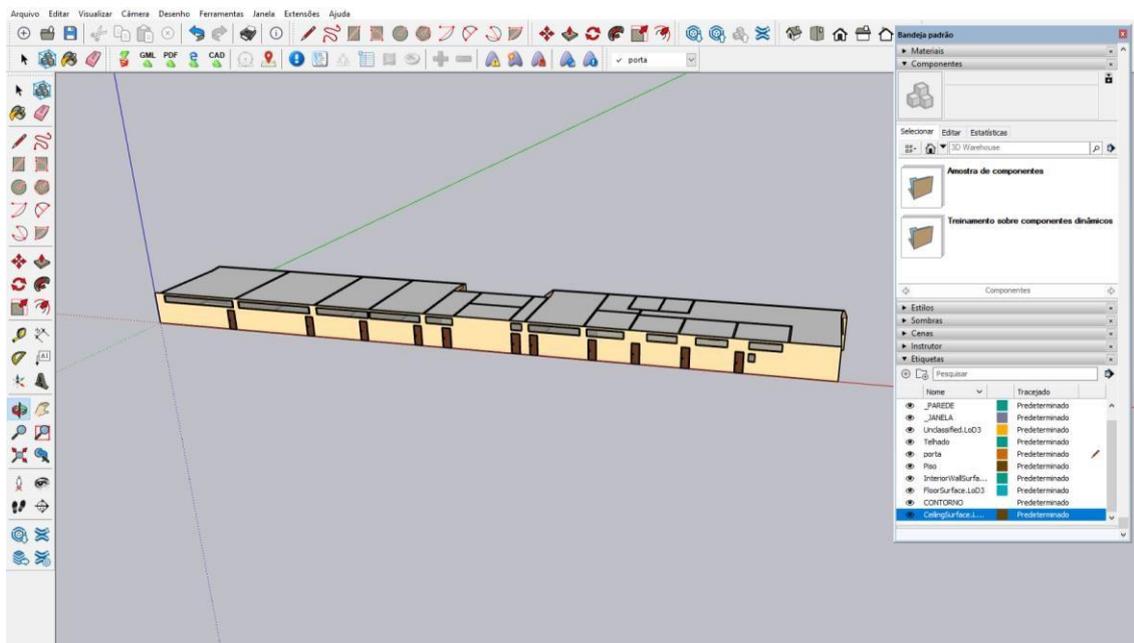
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Segundo a modelagem conceitual do CityGML, a modelagem interna de uma edificação (LOD4) contempla telhado, parede, piso, portas e janelas de cada uma das salas⁶⁸. A modelagem geométrica nesta etapa consistiu nas salas que pertencem ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (DETG) situadas no sexto andar da Escola Politécnica (representando 32 espaços).

Para a modelagem neste LOD, inicialmente foi necessário indicar o *GroupType* que pertence o objeto, neste caso é *Bulding* (para telhado, paredes e piso), *Door* (porta) e *Window* (janela). Em seguida, deve ser escolhido o *Surface Geometry Type*, que foi classificado como *MultiSurface* e, por fim, o *Boundary SurfaceType*, que neste LOD envolve a categorização de cada superfície de acordo com as classes *FloorSurface* (piso interno), *CeilingSurface* (telhado interno) e *InteriorWallSurface* (paredes internas), cujas superfícies são associadas à classe *Room*. A representação pode ser visualizada na Figura 52.

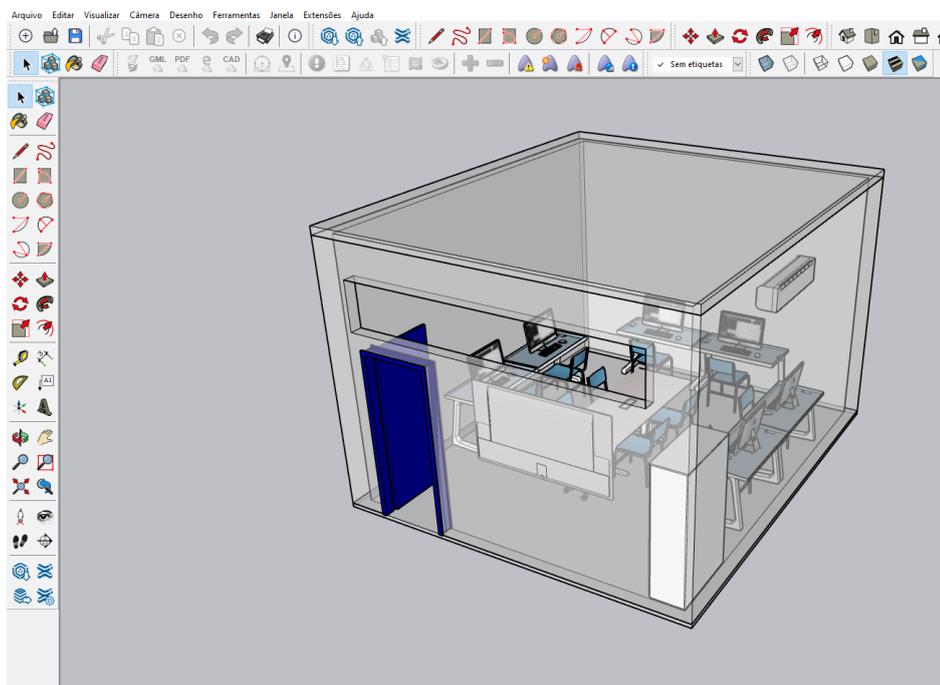
⁶⁸ As medidas das salas, corredores, portas e janelas foram obtidas a partir de uma planta baixa dos pavimentos da Escola Politécnica cedida por Magalhães (2020).

Figura 52 - Modelo geométrico LOD4 no CityEditor (classe *Room*)



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

A modelagem geométrica mais detalhada em LOD4 foi realizada em apenas uma sala que corresponde ao Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (localizado no sexto andar da Escola Politécnica da UFBA) e consistiu em atribuir a classificação do *GroupType*, como *BuildingFurniture*, aos móveis da sala (mesas, cadeiras, armário, televisão, computadores *desktop* e ar-condicionado). Também foi modelada a sala (com suas partes, telhado, paredes e piso) bem como a janela e a porta classificadas como um sólido através da classe *Room*. A representação pode ser visualizada na Figura 53.

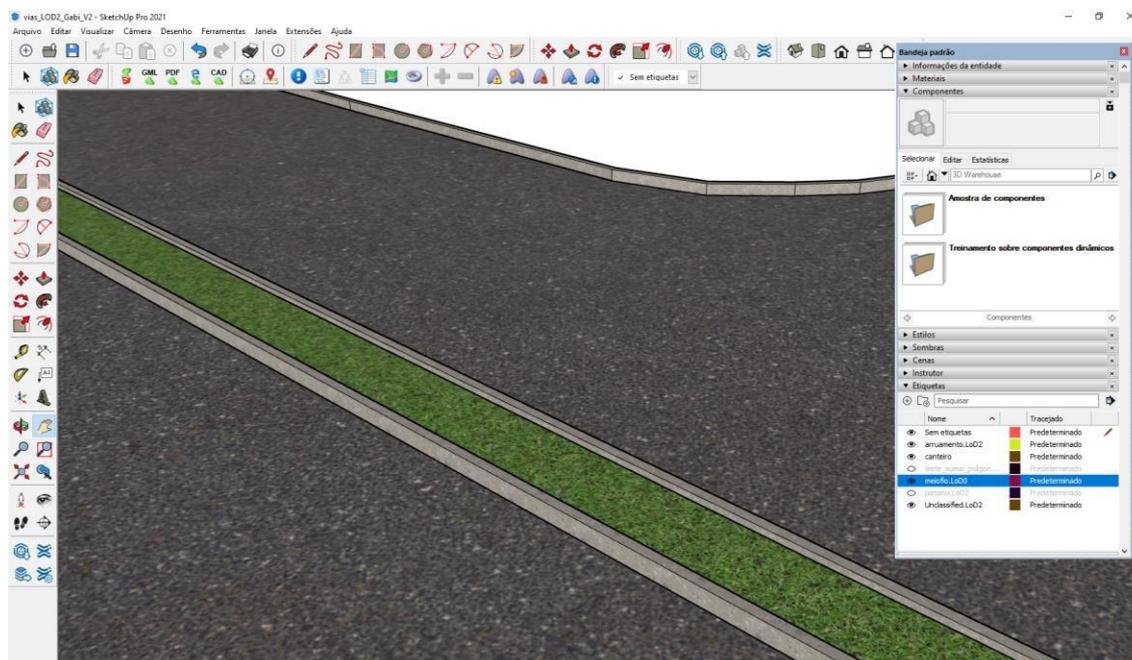
Figura 53 - Modelo geométrico LOD4 no CityEditor (classe *BuildingFurniture*)

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

6.3.2 Modelagem Geométrica do Sistema Viário

Para a modelagem do sistema viário, que representa o módulo transportes em LOD2 do padrão CityGML, conforme já citado na seção 5.3.2, os dados foram agrupados nas classes *TrafficArea* e *AuxiliaryTrafficArea*. A classe *TrafficArea* foi associada às faixas de circulação de automóveis e calçadas da área de estudo e a classe *AuxiliarTrafficArea* usada para meio-fio e canteiros centrais (com ou sem presença de vegetação). Na Figura 54 é possível observar um trecho da modelagem geométrica contendo os elementos: meio-fio, faixas de circulação de automóvel (com textura) e canteiro com presença de grama (também com textura).

Figura 54 - Trecho do modelo geométrico do Sistema Viário



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

6.3.3 Modelagem Geométrica do Terreno

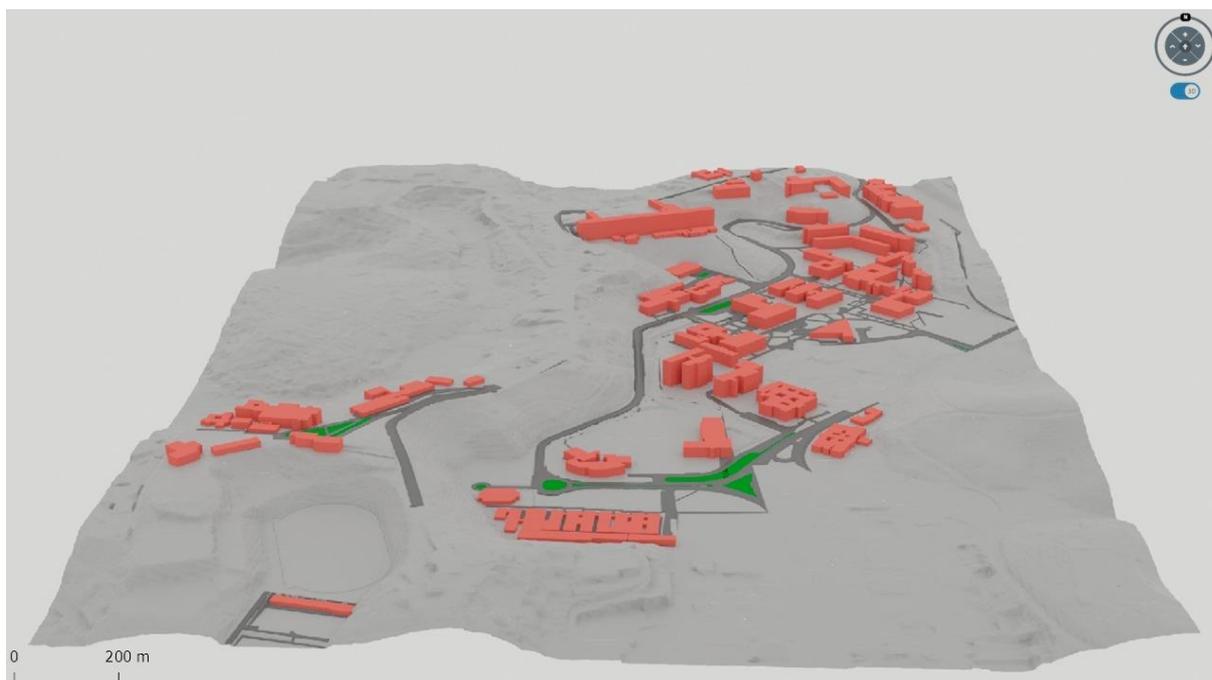
O terreno foi modelado a partir do modelo digital de terreno (MDT) obtido também no *website* da prefeitura de Salvador conforme explicado na seção 6.1 e foi categorizado como uma rede irregular triangular – *Triangulated Irregular Network* - TIN (*TINRelief*) na modelagem realizada no Sketchup e CityEditor.

Inicialmente o modelo do terreno era muito grande e pesado para compor a base e foi necessário realizar a retopologia (processo muito utilizado para otimizar a malha)⁶⁹. Em seguida, as edificações e o sistema viário precisaram ser ajustados sobre o terreno devido à grande diferença de declividade do mesmo, em alguns pontos.

O modelo geométrico da área externa do *campus* que integra as edificações em LOD1, os elementos do módulo transportes em LOD2 e o terreno está representado na Figura 55.

⁶⁹ A retopologia consiste geralmente em reduzir o número de polígonos garantindo a renderização e eficiência do modelo.

Figura 55 - Modelo geométrico contendo Edificações, Sistema Viário e Terreno



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

6.3.4 Discussão sobre a modelagem geométrica

Vários testes foram necessários para definir o software que realizasse a modelagem nos LOD pretendidos e que atendesse aos requisitos do CityGML. Desta forma, foi utilizado o software SketchUp e seu *plugin* CityEditor. A modelagem geométrica realizada com este *plugin* mostrou-se relativamente simples, uma vez que foi necessário indicar quatro elementos: o *Group Type* (a exemplo de *Building*, *BuildingPart*, *BuildingFurniture*, *Room*, *TrafficArea*, *AuxiliaryTrafficArea*), o LOD (1, 2, 3 ou 4), a *Surface Geometry* (*MultiSurface* ou *Solid*) e o *Boundary SurfaceType* (a exemplo *WallSurface*, *GroundSurface*, *RoofSurface*, *FloorSurface*, dentre outros).

Quanto aos aspectos mais peculiares da modelagem propriamente dita, é necessário um certo cuidado pois em LOD4 são divididas as faces internas e externas da edificação. Assim, a parte externa deve ser classificada em: *RoofSurface*, *GroundSurface* ou *WallSurface*, e a parte interna em: *FloorSurface*, *CeilingSurface* ou *InteriorWallSurface*.

Caso essa classificação não seja realizada, o modelo geométrico e semântico em CityGML não interpreta as partes internas como componentes daquela edificação usando o mecanismo *Xlink*⁷⁰.

No modelo geométrico em LOD4, foi necessário definir uma forma de fechamento das divisórias entre os gabinetes de professores que não eram prolongadas até o teto (este processo foi realizado utilizando a mesma espessura das divisórias). Assim, como a norma CityGML prevê, optou-se pelo fechamento com *ClorureSurface*, que representa uma alternativa quando as aberturas não caracterizam-se como portas nem janelas.

6.4 ARMAZENAMENTO DO MODELO EM BANCO DE DADOS 3D

Foi criado um banco de dados para a área de estudo, intitulado SIG3D_UFBA, utilizando os softwares PostgreSQL/PostGIS, PgAdmim e 3DCityDB⁷¹. Inicialmente, foi utilizado o PgAdmim para criação do banco e por meio da extensão PostGIS, o banco de dados foi conectado ao 3DCityDB⁷². Para conectar o banco criado foi necessário informar o *username*, *password* e nome do banco. Em seguida, foi possível inserir o arquivo contendo o modelo geométrico no LOD desejado em formato CityGML, por meio da opção *Importer/Exporter* do 3DCityDB. É importante ressaltar que o modelo deve ser validado antes de ser importado. Após a importação é apresentado um resumo do número de feições e suas classes. Neste caso, conforme Figura 56, o banco apresentou 136 feições da classe *Building*, 140 da classe *Opening*, 29 da classe *Room*, 1 da classe *TINRelief* e 5 da classe *TrafficArea*.

⁷⁰ O mecanismo *Xlink* é usado para referenciar as partes ao objeto, ou seja, usado por exemplo para indicar as partes que pertencem à determinada edificação.

⁷¹ Para mais informações sobre a função destes softwares neste trabalho consultar a seção 2.4.

⁷² Um tutorial que indica como é realizada a conexão do banco de dados criado no PgAdmim com o 3DCityDB, pode ser consultado em: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>.

Figura 56 - Importação do modelo geométrico no 3DCityDB

The screenshot shows the '3D City Database Importer/Exporter: RTG2016' application. The 'Connection' is set to 'RTG2016'. The 'Connection details' section includes fields for Description, Username (postgres), Password, Type (PostgreSQL/PostGIS), Server (localhost), Port (5433), Database (SIG3D_UFBA), and Schema (Use default schema). A 'Generate database report' button is visible at the bottom of the connection details.

The 'Console' window on the right displays the output of the database report, showing a list of tables and their row counts. Several tables are highlighted with red boxes:

Table Name	Count
#BUILDING	136
#BUILDING_FURNITURE	30
#BUILDING_INSTALLATION	0
#CITY_FURNITURE	0
#CITYMODEL	0
#CITYOBJECT	14502
#CITYOBJECT_GENERICATTRIB	340
#CITYOBJECT_MEMBER	0
#CITYOBJECTGROUP	0
#EXTERNAL_REFERENCE	0
#GENERALIZATION	0
#GENERIC_CITYOBJECT	0
#GRID_COVERAGE	0
#GROUP_TO_CITYOBJECT	0
#IMPLICIT_GEOMETRY	0
#LAND_USE	0
#MASSPOINT_RELIEF	0
#OPENING	140
#OPENING_TO_THEM_SURFACE	140
#PLANT_COVER	0
#RASTER_RELIEF	0
#RELIEF_COMPONENT	1
#RELIEF_FEAT_TO_REL_COMP	0
#RELIEF_FEATURE	0
#ROOM	25
#SOLITARY_VEGETAT_OBJECT	0
#SURFACE_DATA	407
#SURFACE_GEOMETRY	241556
#TEX_IMAGE	16
#TEXTUREPARAM	89168
#THEMATIC_SURFACE	14161
#TIN_RELIEF	1
#TRAFFIC_AREA	5

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

O uso do 3DCityDB associado aos demais softwares citados permite que esse banco de dados cumpra os requisitos do padrão CityGML, no qual as tabelas são criadas de forma automática e estabelecem as relações entre os objetos, de acordo com a modelagem conceitual. No processo de criação do banco de dados foram geradas 66 tabelas que são preenchidas automaticamente com valores após a inserção dos modelos geométricos e semânticos no banco de dados⁷³.

Uma vez que a classe base de todas as classes temáticas dentro do modelo de dados do CityGML é a classe abstrata *Cityobject*, os objetos armazenados no banco de dados são registrados na tabela raiz *Cityobject*. Esta tabela possui o atributo *Objectclass_id* que faz referência a uma entrada em *Objectclass*. Desta forma, a classe do objeto pode ser identificada. Além de *Cityobject*, todas as tabelas usadas para armazenar dados CityGML fornecem um atributo *Objectclass_id*.

⁷³ Alguns atributos previstos na norma do CityGML 2.0 foram inseridos manualmente nas tabelas, conforme descrito na seção 6.4.1.

Por se tratar de um banco objeto-relacional, as tabelas relacionam-se através de chaves primárias⁷⁴ e chaves estrangeiras. A relação entre os módulos e suas classes no padrão CityGML pode ser consultada em Kolbe *et al.* (2019)⁷⁵. Por exemplo, os objetos na tabela *Cityobject* possuem o mesmo ‘id’ (chave primária) da tabela *Building*. E a tabela *Cityobject* possui como chave estrangeira a coluna *Gmlid* que é a mesma coluna presente na tabela *Surfacegeometry*.

Desta forma, a tabela *Building* apresenta colunas que funcionam como chave primária, a exemplo do ‘id’ e outras que representam os atributos padrão segundo o CityGML como: classe; função; uso; ano de construção e demolição; tipo de telhado; altura média; número de pavimentos; altura de pavimentos acima e abaixo do solo. O conteúdo da coluna *Objectclass_id*, neste caso, está preenchido com o valor 26, que representa o atributo *Building* (ou seja, uma edificação em LOD1), segundo o diagrama UML do modelo conceitual.

A geometria no 3DCityDB pode ser armazenada como *MutiSurface*, *CompositeSurface*, *TriangulatedSurface*, *Solid*, *MultiSolid* ou *CompositeSolid*. E sua representação se dá por meio da tabela *Surfacegeometry*. Outra tabela relevante é a *thematic_surface* que apresenta as colunas *Lod1_multisurface_id*, *Lod2_multisurface_id*, *Lod3_multisurface_id* e *Lod4_multisurface_id* nas quais são inseridas informações apenas se os dados importados no modelo geométrico possuírem informações no respectivo LOD.

A classe e/ou tipo de superfície também podem ser identificados através da coluna *Objectclass_id* que representa a edificação e suas partes, e varia de acordo com o LOD. Por exemplo: o valor 26 é usado para *Building*, 25 para *Building_part*, 33 para *RoofSurface*, 34 para *WallSurface* e 35 para *GroundSurface* (Figura 57). Essa coluna *Objectclass_id* está presente nas tabelas *Building*, *Cityobject*, *Surface_geometry*, *Thematic_surface* e *Bulding_installation*.

⁷⁴ As chaves primárias são colunas que permitem identificar cada linha na tabela como objeto único enquanto as chaves estrangeiras funcionam como colunas que se referem à chave primária em outra tabela.

⁷⁵ Para mais informações, consultar a documentação do 3DCityDB disponível no *website* <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/>.

Figura 57 - Tipos de superfície identificadas pela coluna *Objectclass_id*

id	objectclass_id	gmlid	gmlid_codespace
73	73	._edificacoes_offset_BD.UNzTJAVn7DDmEo4jr4q...	[null]
74	74	._edificacoes_offset_BD.H67RZ4zRbI900h0nuUZs	[null]
75	75	._edificacoes_offset_BD.5qQcPYM7kZTU4vuKxf...	[null]
76	76	._edificacoes_offset_BD.Q3UHPumpIEn9IOIGQya	[null]
77	77	._edificacoes_offset_BD.xlSIS9e6MMEUJggXkAM...	[null]
78	78	._edificacoes_offset_BD.MYPuPLI1vZOL3dLXOm...	[null]
79	79	ID_a11bce1a-adf3-4c0f-a00d-d14cc874a39a	[null]
80	80	ID_0cff2c99-cbaf-4eb0-9e1b-9bbc5484a45d	[null]
81	81	._edificacoes_offset_BD.ndI7Fp0HjkkQ8B3i6Uv	[null]
82	82	ID_af6d60eb-d3e3-4ebf-be7f-c4c9857546d3	[null]
83	83	._edificacoes_offset_BD.SM00Sv11WUJjPARqcxH...	[null]
84	84	ID_4b7a06f8-a1c2-49f9-85ca-857593a1610e	[null]
85	85	ID_e2555ec9-f5ba-49ad-af6e-8793b6df42da	[null]
86	86	ID_4eb125aa-7ceb-417f-968f-abb6b1bd98e1	[null]
87	87	ID_3909b102-2f19-4c2b-bd19-e5a5126f9bdb	[null]
88	88	ID_99596251-1d54-41d0-90fe-00197e2a972f	[null]
89	89	ID_682f6418-62d0-4753-b10a-0b05944de661	[null]
90	90	ID_769c538a-6919-44f6-9dca-9d780f0dd455	[null]
91	91	ID_858ada38-0f6c-4fb5-88fe-12075aa1ef5e	[null]
92	92	ID_09014d92-cd28-4949-9d8e-1b5e11a758d3	[null]
93	93	ID_b880c07c-1ae6-4d3e-bb06-b6092a0dc3de	[null]

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

No LOD4, a tabela *Room* é preenchida e apresenta a coluna *Objectclass_id* como chave estrangeira que servirá para relacionar-se à tabela *Opening*, que distingue as aberturas entre janelas e portas através dos atributos 38 e 39 respectivamente. No LOD4 destaca-se também a tabela *Building_furniture*, que representa os móveis de uma sala como mesas e cadeiras e identifica os elementos através dos campos *Objectclass_id* e *Room_id*, ambos atuam como chave estrangeira.

Por fim, ressalta-se que o 3DCityDB usa o índice R-tree⁷⁶ para otimizar pesquisas, melhorando a eficiência e recuperando dados tridimensionais. Ele permite que o sistema realize consultas espaciais em um local ou área delimitada e possibilita a inserção de novos dados e atualização dos dados já cadastrados (Kolbe *et al.*, 2019).

⁷⁶ O índice R-tree é utilizado em banco de dados para indexar e organizar objetos e informações espaciais para permitir maior eficiência nas consultas.

6.4.1 Inserção de atributos padrão do CityGML e atributos propostos como extensão

Inicialmente, esperava-se que os atributos inseridos no modelo CityGML fossem mantidos após serem exportados, através do CityEditor, e importados no 3DCityDB. No entanto, isso não aconteceu e foi necessário realizar a edição manualmente nas tabelas geradas no momento da criação do banco de dados. Os dados inseridos nas tabelas estão descritos a seguir:

No LOD1, as edificações foram classificadas em educação e administração. Para função/uso receberam os atributos⁷⁷: administrativo; educação e pesquisa; restaurante; biblioteca; hospital ou outros (usado para os bancos do *campus*), de acordo com a Figura 58. Quanto ao tipo de telhado (*RoofType*), foi atribuído o código que corresponde a um telhado plano em todas as edificações. No Apêndice B é possível verificar os códigos atribuídos a cada um destes elementos de acordo com o CityGML. Foram inseridas ainda informações do ano de construção, altura média e número de pavimentos das edificações⁷⁸.

Figura 58 - Tabela *Building* com inserção de atributos

id	function	function_code	usage	usage_code	year_of_construction	year_of_demolition	roof_type	roof_type_code	measured_height	measured_height_above	stores_above
30	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
31	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
32	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
33	2070	[null]	2070	[null]	2010-10-05	[null]	1000	[null]	11	[null]	4
34	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
35	2070	[null]	2070	[null]	[null]	[null]	1000	[null]	12	[null]	4
36	2070	[null]	2070	[null]	2010-10-05	[null]	1000	[null]	20	[null]	7
37	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
38	2070	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	1000	[null]	8	[null]	3
39	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
40	2070	[null]	2070	[null]	1960-10-05	[null]	1000	[null]	27	[null]	8
41	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
42	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
43	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
44	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
45	2070	[null]	2070	[null]	1980-10-05	[null]	1000	[null]	15	[null]	5
46	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
47	2070	[null]	2070	[null]	1980-10-05	[null]	1000	[null]	12	[null]	4
48	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
49	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
50	2190	[null]	2190	[null]	2010-10-05	[null]	1000	[null]	9	[null]	3

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

⁷⁷ Todos esses atributos são previstos na norma CityGML a partir do *codelist*.

⁷⁸ A altura média foi obtida por meio da normalização do MDS conforme explicado na seção 6.2. O número de pavimentos foi obtido dividindo-se a altura por três.

No LOD4, os elementos das edificações foram classificados novamente em educação e administração. Para função/uso da classe *Room*, os espaços receberam os atributos: cozinha; banheiro; escadas; cantina; varanda; sala de conferências; hall de entrada; recepção; elevador; sala de informática; auditório; biblioteca; sala de aula; laboratório; sala de equipamentos ou escritório, conforme Figura 59. Foram acrescentados ainda os atributos previstos na modelagem conceitual como número de cadeiras e mesas, disponibilidade de computador, projetor e climatização. Na classe *Building_Furniture* para uso e função, os elementos receberam atributos compatíveis com: mesas de computador, ar-condicionado, mesa, cadeira, cadeira de escritório, televisão, computador e armário, conforme lista de códigos no Apêndice B.

Figura 59 - Tabela *Room* com inserção de atributos

id	usage_codes	building_id	lod4_multi_us	lod4_solid_us	Name	N_cadeiras	N_mesas	Computador	Projetor	Climatizacao
1	1020	1585	[null]	[null]	Copa	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
2	2020	1585	[null]	[null]	Secretaria DETG	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
3	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Vivian-Fernanda-Mauro	3	3	true	[null]	true
4	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Elio	3	1	true	[null]	true
5	1600	1585	[null]	[null]	LABGEO	30	10	true	true	true
6	1510	1585	[null]	[null]	Corredor	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
7	3330	1585	[null]	[null]	LABTRANS	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
8	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Denise-Silvia	3	2	true	[null]	true
9	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Fabiola-Suzana	2	2	true	[null]	true
10	3330	1585	[null]	[null]	LABFOTOSR	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
11	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Patricia-Julio	3	2	true	[null]	true
12	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Artur-Marcory	3	3	true	[null]	true
13	3330	1585	[null]	[null]	CARTOLAB	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
14	2080	1585	[null]	[null]	Sala de Instrumentos	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
15	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Marcela-Juan	3	2	true	[null]	true
16	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Elmo-Jorge	3	2	true	[null]	true
17	3390	1585	[null]	[null]	Gabinete de Ilice-Lazaro	2	2	true	[null]	true
18	2330	1585	[null]	[null]	CETRAMA	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
19	3330	1585	[null]	[null]	CETRAMA	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
20	3330	1585	[null]	[null]	CETRAMA	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
21	3330	1585	[null]	[null]	CETRAMA	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Em relação ao módulo transportes, a tabela mais importante é a *Traffic_area* que permite a distinção entre os elementos da classe *TrafficArea* ou *AuxiliaryTrafficArea* por meio dos valores da coluna *Objectclass_id* que atua como chave estrangeira também presente na tabela *Cityobject*. Foram usados os códigos: [47] para indicar que o objeto pertence à classe *TrafficArea* e o código [48] para a classe *AuxiliaryTrafficArea*. Também utilizou-se os valores inseridos de acordo com os códigos⁷⁹ CityGML na coluna função referentes aos elementos:

⁷⁹ Os códigos quando inseridos no texto desta tese estão referenciados entre colchetes a fim de serem facilmente identificados.

faixa de circulação de automóveis [1], calçada [20], meio-fio [1220] e canteiro central com vegetação [1020].

6.4.2 Consultas SQL realizadas no banco de dados

Para atender a modelagem conceitual e demonstrar o potencial do banco de dados em realizar consultas SQL, foram elaboradas três consultas, que podem ser verificadas a seguir:

a) Consulta 1 – Identificar a capacidade das salas de aula e a disponibilidade de equipamentos

Para realizar esta consulta foi criada a tabela chamada “*classroom*”, prevista na modelagem de dados e possui as seguintes colunas de acordo com o modelo conceitual da Figura 37: id, capacidade, climatização, computador, n_cadeiras, n_mesas, nome, projetor, rede e tamanho. Estas colunas foram preenchidas com os dados correspondentes às três salas de aula do sexto pavimento (sala 6.03.02, 6.03.03 e 6.03.04).

A consulta realizada permitiu identificar que a sala 6.03.02 é maior, tendo capacidade para 70 pessoas mas possui 60 cadeiras, enquanto que as outras duas salas (6.03.03 e 6.03.04) possuem capacidade para 45 pessoas e 40 cadeiras cada uma. Quanto aos equipamentos disponíveis, nenhuma das três apresenta ar-condicionado, mas todas possuem computador, projetor e internet (conforme Figura 60).

Figura 60 - Consulta das informações das salas de aula

The screenshot shows the pgAdmin 4 interface with a SQL query executed in the Query Editor. The query is: `SELECT * FROM citydb.classroom;` The results are displayed in a table with the following data:

id	capacidade	climatizacao	computador	n_cadeiras	n_mesas	nome	projetor	rede	tamanho
1	70	false	true	60	1	6.03.02	true	true	92.66
2	45	false	true	40	1	6.03.03	true	true	61.25
3	45	false	true	40	1	6.03.04	true	true	59.32

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

b) Consulta 2 - Identificar as disciplinas alocadas por horário em uma determinada sala

Para realizar esta consulta SQL foram usadas três tabelas⁸⁰. A primeira foi a tabela “*classroom*”, já utilizada na consulta 1. A segunda tabela necessária foi criada com o nome “*disciplina*” e apresenta as seguintes colunas: *id*, *cod* e *nome*. E a terceira tabela nomeada “*alocacao_disciplina*” possui as seguintes colunas: *id*, *disciplina_id*, *classroom_id*, *dia_semana* e *horario*. Em todas as três tabelas, o *id* funcionou como chave primária. Os campos “*disciplina_id*” e “*classroom_id*” da tabela “*alocacao_disciplina*” foram usados como chave estrangeira. A tabela “*alocacao_disciplina*” funcionou como uma tabela associativa de junção das informações. A importância da existência de tabelas como essa é ressaltada principalmente pela escalabilidade do banco⁸¹ de dados, visto que as disciplinas mudam de sala a depender do semestre e essa informação poderá ser editada futuramente.

Na Figura 61 é possível identificar o resultado da consulta SQL que mostra o nome das disciplinas (Topografia e Geoprocessamento) e seus respectivos códigos (ENGA50 e ENGA52) que estão alocadas na sala 6.03.02 na segunda e terça-feira. Observa-se que a disciplina ENGA50 está alocada das 8 às 10 h na segunda e terça-feira na sala 6.03.02 enquanto ENGA52 está alocada das 10 às 12 h na terça-feira na mesma sala.

⁸⁰ As consultas SQL foram realizadas com base nas tabelas criadas como extensão CityGML para a aplicação SIG 3D (ou seja, além das 66 tabelas geradas automaticamente na criação do banco de dados). Essas novas tabelas, inserções de dados e relacionamentos entre elementos e tabelas foram criados via *script*.

⁸¹ Neste caso, ter um modelo de dados escalado significa que ele é capaz de suportar cargas adicionais de dados de forma eficiente, adaptando-se às necessidades do usuário ao longo do tempo.

Figura 61 - Consulta das disciplinas alocadas em uma sala

The screenshot shows the pgAdmin 4 interface. On the left, the Object Explorer displays a tree view of database objects, with 'classroom' expanded to show 'Columns (10)'. The main window displays a SQL query in the Query Editor:

```

12 where classroom.nome = '6.03.02'
13
14
15
16 select
17 disciplina.nome,
18 disciplina.cod,
19 classroom.nome,
20 alocacao_disciplina.dia_semana,
21 alocacao_disciplina.horario
22 from citydb.classroom
23 inner join citydb.alocacao_disciplina on classroom.id = alocacao_disciplina.classroom_id
24 inner join citydb.disciplina on disciplina.id = alocacao_disciplina.disciplina_id
25 where classroom.nome = '6.03.02'
26
27
28 INSERT INTO citydb.alocacao_disciplina(
29 disciplina_id, classroom_id, dia_semana, horario)
30 VALUES (3, 1,'terca','10 as 12');
31
32
33

```

Below the query, the Data Output tab shows the results of the query, which are highlighted with a red box:

	nome	cod	nome	dia_semana	horario
1	Topografia	ENGA50	6.03.02	segunda	8 as 10
2	Topografia	ENGA50	6.03.02	terca	8 as 10
3	Geoprocessamento	ENGA52	6.03.02	terca	10 as 12

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

c) Consulta 3 - Identificar os softwares mais comuns que estão instalados nos computadores e seus requisitos básicos

Para consultar alguns softwares instalados nos computadores, foi criada a tabela “*software_list*” com base na modelagem conceitual, que apresenta os seguintes atributos: id, nome do software, configuração mínima de CPU, GPU, RAM e ROM necessários e o tipo de licença.

Na Figura 62, é possível verificar no retorno da consulta, os softwares disponíveis neste laboratório e seus requisitos mínimos. Os softwares mais básicos como o Word, Excel e Notepad++ precisam de: 2,5 GHz de CPU, não demandam processamento gráfico (GPU), 4 GB de RAM e 250 de ROM. Outros softwares como o QGIS, AutoCAD e PhotoScan, demandam mais processamento e memória sendo necessário as especificações: 3,5 GHz de CPU, 4 GB de GPU, 16 GB de RAM e 1 TB de ROM. Também foi possível identificar os tipos de licença, sendo que apenas Notepad++ e QGIS são código aberto e os outros quatro são proprietários.

Figura 62 - Consulta a tabela lista de softwares

The screenshot shows the pgAdmin 4 interface. The left pane displays the database structure, including the 'citydb' schema and the 'software_list' table. The main pane shows a SQL query with the following content:

```

6 INSERT INTO citydb.classroom(
7   capacidade, climatizacao, computador, n_cadeiras, n_mesas, nome, projetor, rede, tamanho)
8   VALUES (40, false, true, 40, 1, '6.03.04', true, true, 59.32);
9
10
11 create table citydb.software_list (
12   id serial primary key,
13   min_cpu numeric,
14   min_gpu numeric,
15   min_ram smallint,
16   min_rom smallint,
17   nome varchar (100) not null unique,
18   tipo_licenca varchar (20)
19 );
20
21
22 Select * from citydb.software_list;
23
24
25 INSERT INTO citydb.software_list(
26   min_cpu, min_gpu, min_ram, min_rom, nome, tipo_licenca)
27   VALUES (3.5, 4, 16, 1, 'photoscan', 'proprietaria');
28
29
30

```

The 'Data Output' pane displays the following table:

id	min_cpu	min_gpu	min_ram	min_rom	nome	tipo_licenca
1	1	2.5	0	4	word	proprietaria
2	2	2.5	0	4	excel	proprietaria
3	3	2.5	0	4	notepad++	cod aberto
4	4	3.5	4	16	qgis	cod aberto
5	5	3.5	4	16	autocad	proprietaria
6	6	3.5	4	16	photoscan	proprietaria

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

6.4.3 Discussão sobre a modelagem semântica

Foram identificados problemas com os atributos semânticos vinculados ao modelo geométrico no CityEditor. Verificou-se que ao exportar o modelo geométrico e semântico em formato CityGML e importá-lo no 3DCityDB alguns problemas eram relatados na caixa de comandos. Desta forma, optou-se por inserir os dados de forma manual, diretamente no PostgreSQL, conforme foi detalhado na seção 6.4.1.

A etapa de armazenamento de um modelo geométrico e semântico pode ser um tanto complexa, apesar de alguns processos ocorrerem automaticamente, devido ao grande número de ferramentas a serem utilizadas. Por exemplo, o 3DCityDB é usado para importar e exportar o modelo, o PgAdmin e PostgreSQL/PostGIS para verificar os dados semânticos armazenados e realizar as consultas SQL e o Google Earth ou o 3DCityDB-Web-Map-Client para visualizar o modelo após ser exportado.

O volume de dados pode ser um desafio no processo de armazenamento dos mesmos no 3DCityDB, pois há uma quantidade considerável de relacionamentos entre os objetos que são definidas a partir das chaves primárias e estrangeiras. Para identificar todas as classes e relacionamentos de cada módulo é necessário dedicar tempo para estudo da documentação do 3DCityDB.

Inicialmente o banco de dados foi criado com 66 tabelas que representam as classes e relacionamentos referentes aos módulos do CityGML. Como nesta tese, foi proposta uma extensão das classes para atender ao objetivo da aplicação 3D, outras tabelas foram criadas com seus respectivos atributos, conforme modelo conceitual da Figura 37, como as tabelas “*classroom*”, “*lab*”, “*office*”, “*other_room*”, “*computer*” e “*software_list*”. Também foi necessário criar tabelas que atuaram como uma tabela associativa, a exemplo da tabela “*alocacao_disciplina*”.

Estas tabelas foram criadas via *script* com o comando *create table* e a inserção de valores com o comando *insert into values*. Um exemplo de *script* utilizado para criação de tabela e inserção de valores, pode ser observado no Apêndice C.

6.5 APLICAÇÃO SIG 3D PARA O CAMPUS FEDERAÇÃO ONDINA

Conforme indicado no Capítulo 5, a aplicação SIG 3D do *campus* universitário Federação Ondina abrange os módulos terreno, edificações e transportes do CityGML 2.0. Entretanto, a ênfase desta pesquisa está no módulo edificações e a partir dos requisitos estabelecidos na seção 5.2 e da modelagem conceitual da seção 5.5 foi apresentada uma proposta de aplicação SIG 3D do *campus*.

As seções anteriores do Capítulo 6, buscaram explicar as etapas necessárias para o desenvolvimento da aplicação SIG 3D, como a aquisição de dados, elaboração da base de dados, modelagem geométrica e o armazenamento dos dados no banco. Nesta seção 6.5, o foco é demonstrar como as tecnologias foram utilizadas através de exemplos de consultas e análises espaciais a partir da modelagem conceitual da extensão proposta.

A princípio esperava-se que a visualização e análise dos modelos geométricos e semânticos da aplicação SIG 3D fossem realizadas via *web*. No entanto, foram verificados problemas (discutidos nas seções 6.5.2 e 6.5.3) que dificultaram tanto a visualização destes modelos quanto a realização das análises espaciais. Sendo assim, optou-se por demonstrar as

possibilidades e limitações das ferramentas Google Earth e 3DCityDB-Web-Map-Client para visualização dos modelos na *web* e utilizou-se o Blender para apresentar exemplos de consultas e análises espaciais propostas para o SIG 3D.

6.5.1 Tecnologias utilizadas na aplicação SIG 3D

Para esta aplicação SIG 3D foram utilizados softwares de modelagem 3D (SketchUp e Blender) e outras ferramentas disponíveis a partir do próprio pacote 3DCityDB (conforme Quadro 8). Estas ferramentas fazem parte do *back-end* e *front-end*⁸² da aplicação:

Quadro 8 - Softwares utilizados na aplicação SIG 3D

Software	Uso do software	Logomarca do software
Sketchup e <i>plugin</i> CityEditor	Usado para modelagem geométrica dos módulos edificações em LOD1,2 e 4, terreno e transportes em LOD2 do padrão CityGML	
PostgreSQL e PostGIS	Utilizado na criação e implantação do banco de dados	
3DCityDB	Usado para conexão do banco de dados criado e adaptação do modelo conceitual de acordo com as especificações do CityGML	
Google Earth e 3DCityDB-Web-Map-Client	Plataformas utilizadas para visualização dos modelos geométricos e semânticos na <i>web</i>	
Blender	Software usado na visualização dos resultados esperados de consultas, criação de rotas e análises espaciais propostas que não foram possíveis de visualizar nas plataformas <i>web</i>	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

⁸² O *back-end* se refere às tecnologias usadas para processamento e armazenamento dos dados enquanto o *front-end* é usado para apresentação e interação do usuário com o sistema.

6.5.2 Consultas da aplicação SIG 3D

As consultas foram elaboradas de acordo com os requisitos e com os casos de uso propostos. A primeira funcionalidade esperada para a aplicação consiste na visualização das geometrias das edificações em LOD1 e 2, que pode ser realizada no Google Earth ou no 3DCityDB-Web-Map-Client. O Google Earth consiste em uma ferramenta mais simples de visualização do que o 3DCityDB-Web-Map-Client, uma vez que, este último utiliza extensões como o Cesium. Outra diferença entre eles é que para verificar informações semânticas dos objetos no 3DCityDB-Web-Map-Client é necessário que as mesmas tenham sido inseridas anteriormente na criação do modelo ou importadas diretamente com a URL para visualização. Inicialmente para visualizar o modelo geométrico da camada escolhida no 3DCityDB-Web-Map-Client é inserida a URL com extensão MasterJSON⁸³. Este arquivo é obtido após a exportação do mesmo no 3DCityDB em um dos formatos: *Footprint*, *Extruded*, *Geometry* e *COLLADA/glTF*. Caso o usuário pretenda visualizar e/ou consultar informações semânticas deste modelo será necessário inserir a URL correspondente à planilha que contém os atributos temáticos de cada objeto.

Desta forma independente da plataforma *web* escolhida, a visualização pode ser realizada a partir de quatro opções⁸⁴: “*Footprint*, *Extruded*, *Geometry* e *COLLADA/glTF*”. O *Footprint* (Figura 63a) representa o perímetro externo das edificações projetadas no terreno e a opção *Extruded* visualiza o volume dos edifícios (Figura 63b).

⁸³ Essa extensão indica que o arquivo está no formato JSON (*JavaScript Object Notation*).

⁸⁴ Em todas as opções de visualização, o terreno no Google Earth é mostrado como plano.

Figura 63 - Visualização das edificações (*Footprints e Extruded*) no Google Earth



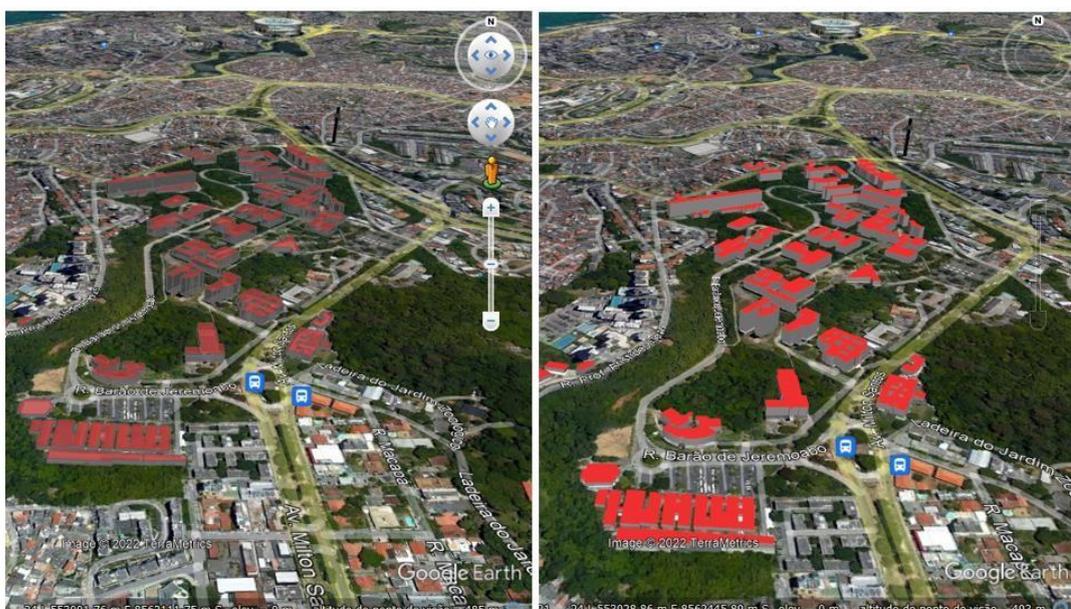
a) *Footprint*

b) *Extruded*

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

A visualização das edificações com a opção *Geometry* permite a identificação dos diferentes tipos de superfície do LOD2 (telhado, parede e piso) de acordo com Figura 64a e a opção *COLLADA* apresenta os elementos da geometria com o suporte de texturas da superfície (Figura 64b).

Figura 64 - Visualização das edificações (*Geometry e COLLADA/glTF*) no Google Earth



a) *Geometry*

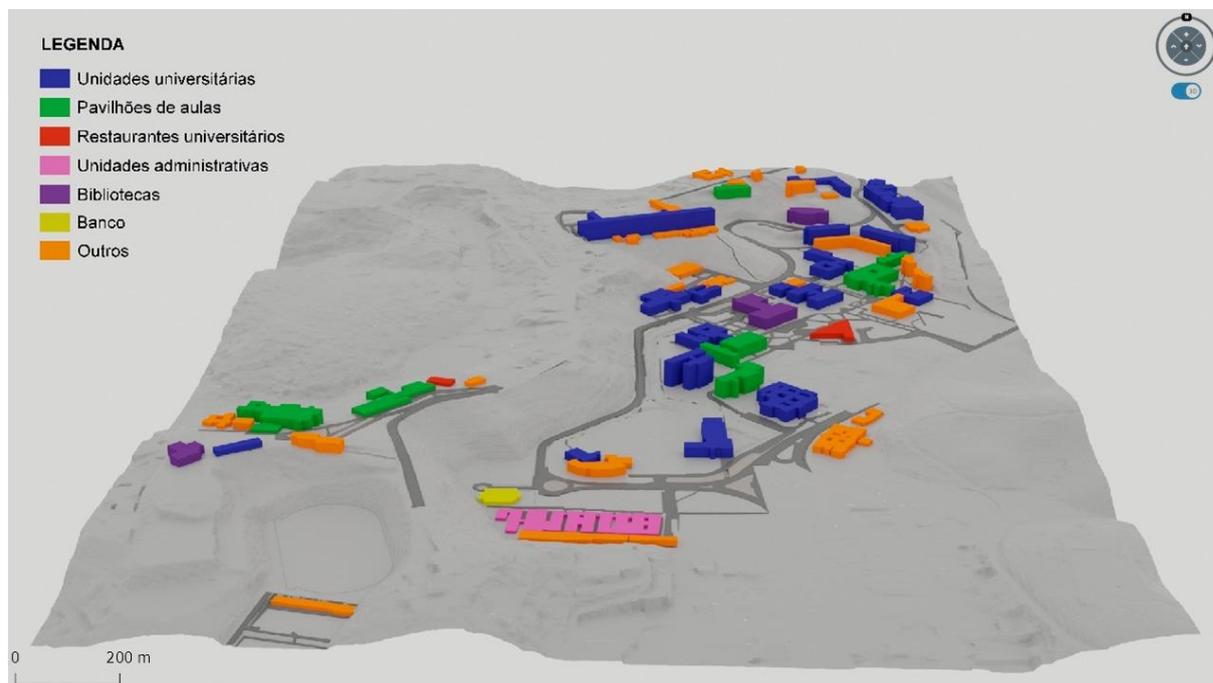
b) *COLLADA/glTF*

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

a) Consulta aos usos/funções das edificações em LOD1

Outra funcionalidade da aplicação SIG 3D consiste na identificação dos usos e funções das edificações. Para consultar esta informação de cada edificação poderiam ser utilizados o Google Earth ou o 3DCityDB-Web-Map-Client. No entanto para visualizar simultaneamente os usos/funções de todas as edificações, estas ferramentas mostraram limitações (ou seja, só permitiram a visualização de um objeto por vez). Foi utilizado então o Blender para visualizar as 67 edificações da área de estudo, em LOD1, (de acordo com a Figura 65), contendo 15 unidades universitárias, representadas na cor azul, as unidades administrativas na cor rosa, os pavilhões de aula na cor verde, os restaurantes na cor vermelha, o banco em amarelo, e demais edificações que representam os anexos, em laranja. É importante destacar que apesar do Blender permitir a modelagem geométrica das edificações de acordo com as necessidades propostas, ele não associa semântica diretamente aos objetos. Assim, foi utilizada uma legenda, de modo a abarcar estas informações.

Figura 65 - Usos e funções das edificações da área de estudo no Blender

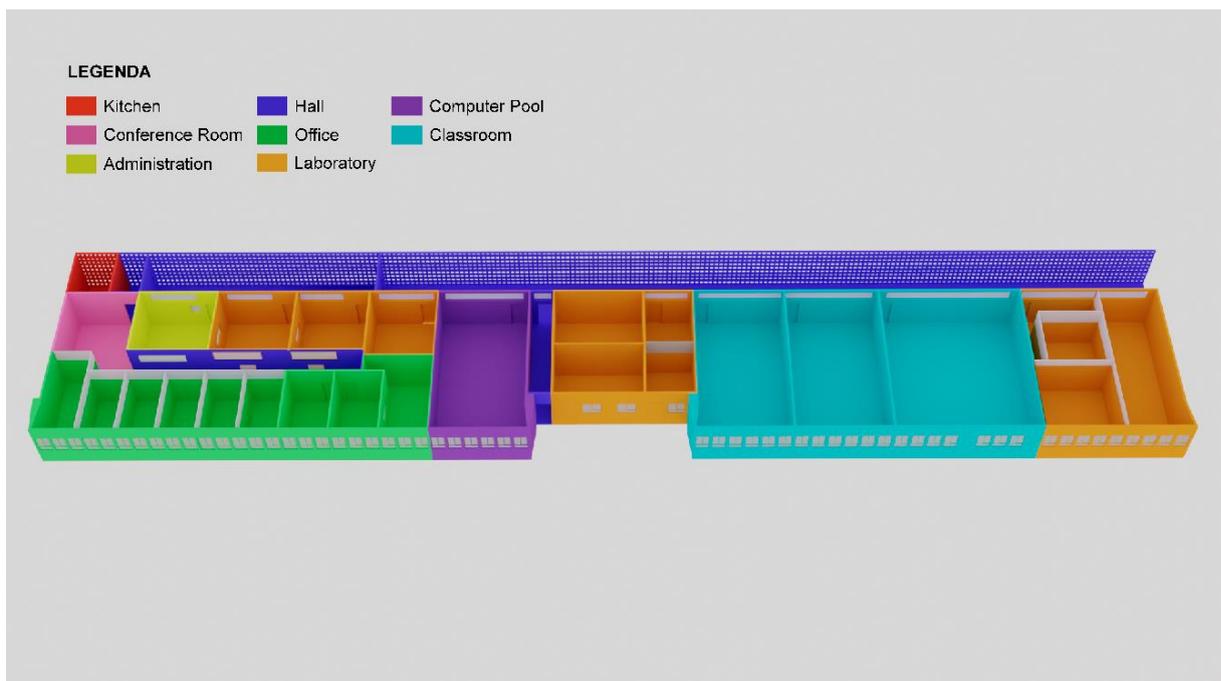


Fonte: Elaborada pela autora (2024).

b) Consulta aos usos/funções dos espaços no LOD4

A representação dos espaços internos em LOD4 também consiste em uma das funcionalidades da aplicação SIG 3D conforme os requisitos elaborados. Desta forma, parte do sexto pavimento da Escola Politécnica contendo 32 espaços, foi representado conforme Figura 66. Estes espaços foram categorizados de acordo com a modelagem conceitual proposta, e correspondem à: três salas de aula (*classroom*) na cor azul claro, uma sala de computadores (*computer pool*) em roxo, nove gabinetes de professores (*office*) em verde, onze espaços que são usados como laboratórios e seus anexos (*lab*) em laranja e oito espaços categorizados como outros (*other_rooms*), sendo cinco corredores (cor azul escuro), uma copa (vermelho), uma sala de reuniões (rosa) e a secretaria do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia – DETG (amarelo).

Figura 66 - Usos e funções dos espaços em LOD4 no Blender



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

6.5.3 Análises espaciais da aplicação SIG 3D

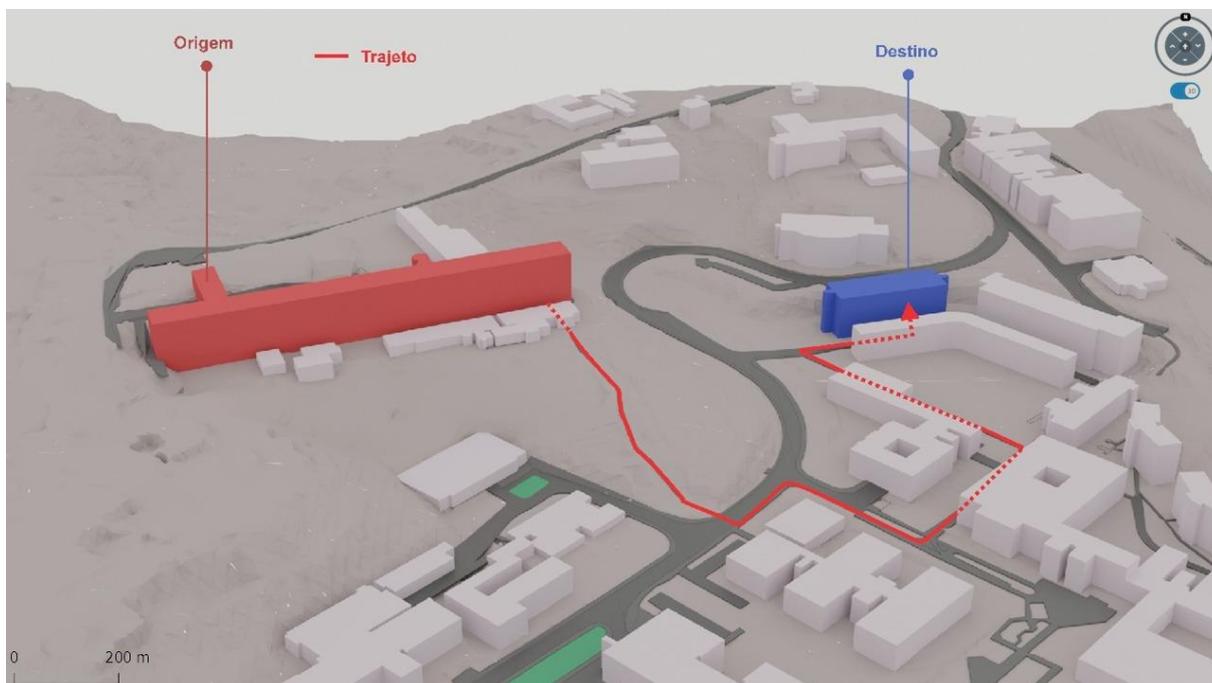
Um dos princípios fundamentais de um SIG envolve a capacidade de realizar análises espaciais entre objetos. Foram realizadas as seguintes análises espaciais baseadas nos requisitos e funcionalidades propostas: a representação de rotas indicando os deslocamentos dos alunos entre edificações do *campus* e a identificação das áreas suscetíveis a um risco em potencial dos

laboratórios da Escola Politécnica. Esperava-se que as plataformas *web* disponíveis para visualização dos modelos CityGML (Google Earth e 3DCityDB-Web-Map-Client) permitissem estas análises. Como não foi possível obter esse nível de detalhamento nas plataformas mencionadas, optou-se, mais uma vez, por utilizar o Blender para demonstrar a importância destas análises (de acordo com as Figuras 67, 68, 69, 70 e 71) .

a) Análise de possíveis rotas entre edificações

As aulas dos cursos de Engenharia da Escola Politécnica da UFBA ocorrem em vários outros prédios do *campus* como: PAF VI, Instituto de Física, Faculdade de Arquitetura, Instituto de Geociências, dentre outros. Sendo assim, a Figura 67 apresenta um exemplo de análise com a indicação das edificações nas quais ocorrem as aulas das disciplinas: ENG446 (Introdução à Engenharia) com aulas ministradas na Escola Politécnica (origem), FIS122 (Física II) com aulas no Instituto de Física (destino) bem como os trajetos a serem realizados pelos alunos matriculados nestas disciplinas.

Figura 67 - Rota proposta entre Escola Politécnica e Instituto de Física



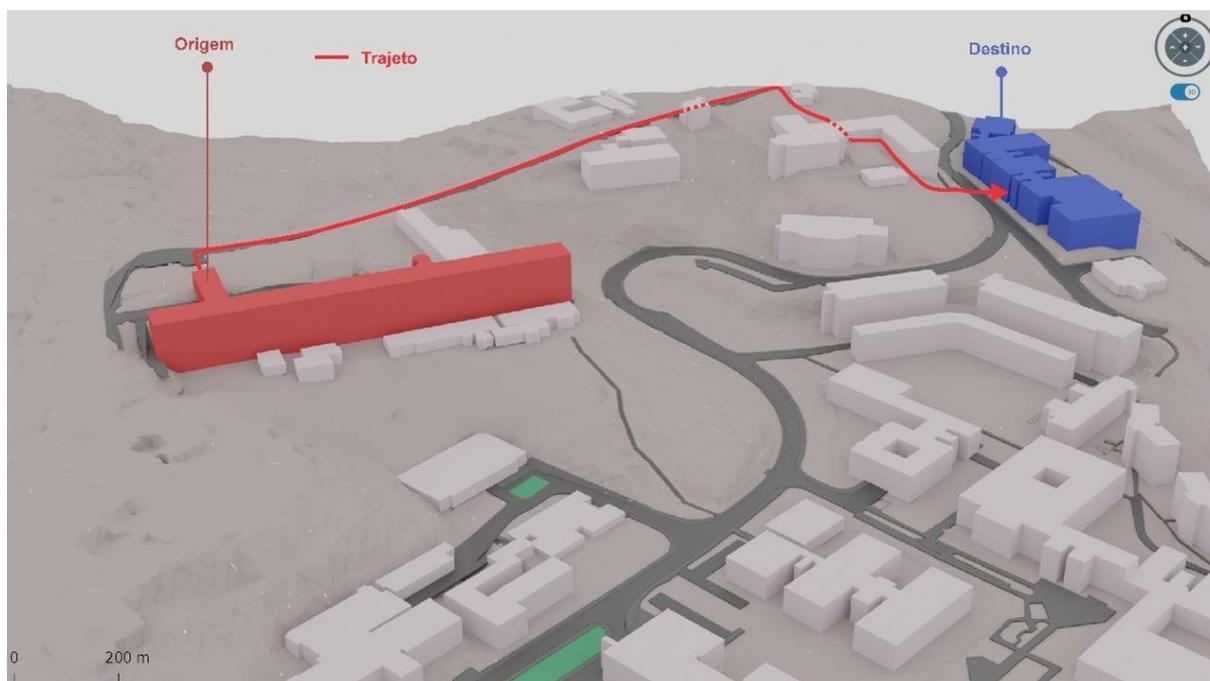
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Neste caso, o objetivo foi simular o trajeto realizado por um aluno matriculado nestas disciplinas e apontar por meio deste trajeto, opções de rotas. Para isso, caso o aluno faça o trajeto a pé, ele teria que após assistir a primeira aula, descer a escada da Escola Politécnica

com extensão de aproximadamente 150 metros (153 degraus/aproximadamente 50 metros de desnível), e caminhar 220 metros até o Instituto de Física. Este trajeto dentro do *campus* indica um desafio principalmente se o aluno possuir questões de mobilidade reduzida temporária ou permanente. Ao se tratar das consideráveis variações de inclinação do terreno no *campus* é ressaltada a importância das análises em três dimensões.

Na Figura 68, pode ser observado o resultado de outra análise, sendo que as aulas da disciplina ENGA54 (Mecânica dos solos) ocorrem na Escola Politécnica e GEOA01 (Introdução à Geologia) no Instituto de Geociências. Aqui o cenário envolve o deslocamento de alunos, da Escola Politécnica (origem), onde ocorrem as aulas de ENGA54, passando pela Faculdade de Arquitetura (apenas como acesso) até chegar no Instituto de Geociências (destino), para aulas de GEOA01. Este trajeto, apesar de ser o mais rápido, mostra-se problemático devido à segurança, uma vez que, seria necessário caminhar pela via principal (Rua Caetano Moura), por fora do *campus*, trazendo possíveis riscos aos alunos⁸⁵.

Figura 68 - Rota proposta entre Escola Politécnica e Instituto de Geociências



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

b) Análises de rotas de evacuação no sexto pavimento da Escola Politécnica

A Escola Politécnica é a unidade universitária que abriga o maior número de cursos de

⁸⁵ Este trajeto é considerado perigoso devido ao risco de assaltos que ocorrem na região principalmente à noite.

graduação da UFBA, sendo os cursos de Engenharia: Civil, de Minas, Elétrica, Mecânica, Química, Sanitária e Ambiental, de Computação, de Produção, de Controle e Automação de Processos, de Agrimensura e Cartográfica e Tecnólogo em Transportes. Também possui mais de 40 laboratórios⁸⁶ nos quais são realizadas inúmeras pesquisas e que inclusive atuam na prestação de serviços.

Alguns destes laboratórios possuem um potencial maior de risco para quem frequenta estes ambientes, como por exemplo, os laboratórios de Engenharia Química, que possuem riscos associados aos produtos químicos tóxicos e inflamáveis, e os laboratórios de Engenharia Mecânica, que podem afetar a estrutura do prédio e/ou trazer problemas quanto aos ruídos. Uma ferramenta que pode ser útil para mensurar esse risco é o *buffer*, que neste caso indica áreas suscetíveis ao risco, a partir de valores pré-determinados.

A Escola Politécnica possui uma estrutura bem peculiar o que representaria problemas em caso de evacuações de emergência. Por exemplo, o primeiro, o segundo, o terceiro e o quarto andar são pavimentos abaixo do nível do solo e possuem saída apenas por um dos lados da edificação. O quinto está no nível do terreno e o sexto, sétimo e oitavo acima. O quinto andar é o único que possui duas saídas (uma com escada e outra com rampa) mas no momento, só uma saída está sendo utilizada.

Sendo assim, em condições ideais, os laboratórios com maior potencial de risco deveriam ser construídos/alocados nos andares com maior facilidade de circulação/locomoção das pessoas, caso uma evacuação seja necessária. A possibilidade de identificar a localização destes laboratórios em um pavimento, bem como estimar o tempo necessário para evacuar as pessoas em diferentes pavimentos evidencia mais uma vez o diferencial da terceira dimensão nas análises.

Em geral, os laboratórios presentes na Escola Politécnica apresentam risco por utilizarem substâncias químicas (como ácidos corrosivos, solventes orgânicos e compostos tóxicos) e substâncias inflamáveis (acetona, éter, hidrocarbonetos) dentre outros. O uso destas substâncias pode gerar explosões e incêndios. Nesta tese, foram feitas simulações com risco de incêndio.

⁸⁶ Para obter a lista completa dos laboratórios da Escola Politécnica acessar: <http://www.eng.ufba.br/centros-laboratórios>.

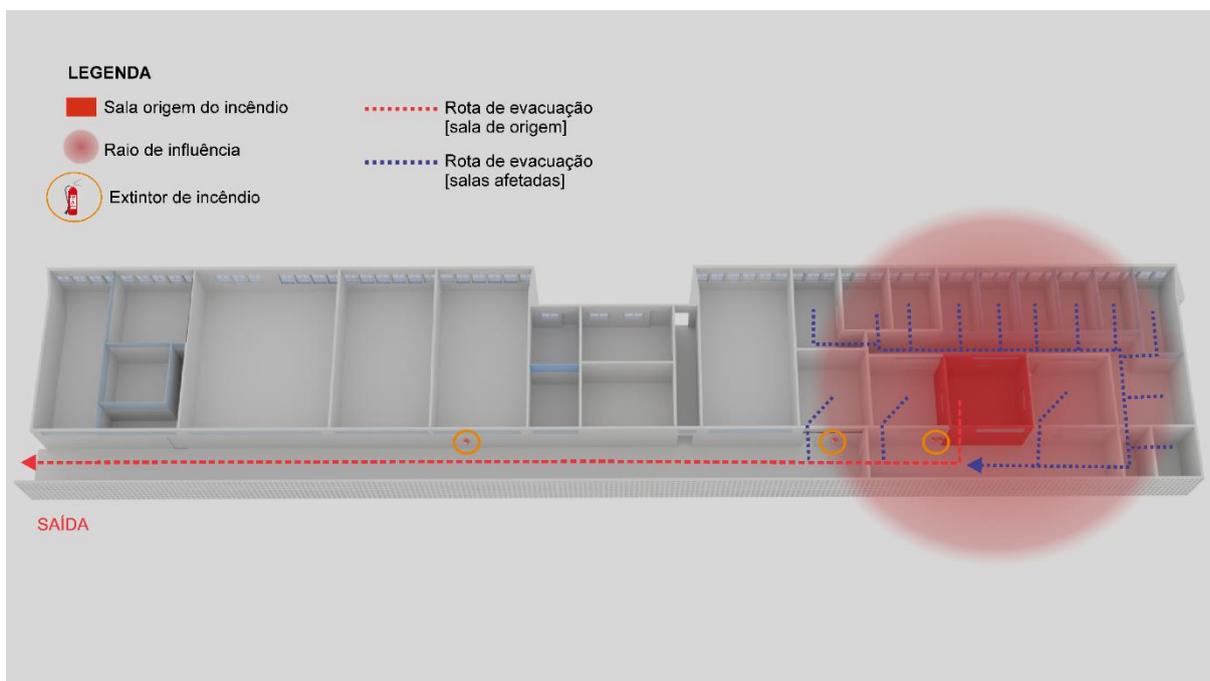
Desta forma, foram propostos três cenários de risco de incêndio para diferentes salas, localizadas no sexto pavimento, bem como a indicação dos possíveis espaços afetados caso não fosse contido o foco de incêndio. Em todos os três cenários, a sala na cor vermelha representa a sala de origem com potencial risco de incêndio, e o raio de influência (círculo com transparência vermelha) foi projetado considerando 10 m. Observa-se a localização dos quatro extintores de incêndio nas paredes das salas deste pavimento (sendo três classe A e apenas um classe B⁸⁷). Verificam-se linhas pontilhadas na cor azul, que representam as rotas que seriam realizadas pelas pessoas presentes nas diferentes salas no momento da emergência, e as linhas pontilhadas na cor vermelha, que indicam as rotas de evacuação para saída das pessoas da área de risco em direção à saída da edificação.

No primeiro cenário (Figura 69), a sala em questão (CARTOLAB⁸⁸) é usada como um laboratório com 6 computadores e por este motivo possui risco de incêndio. Caso haja um evento deste, poderia afetar rapidamente outros dois laboratórios (localizados ao lado dele), oito gabinetes de professores (localizados atrás desta sala e que não possuem outra saída), a sala de reuniões e a secretaria do Departamento. Assim, o potencial de pessoas em risco seria de aproximadamente 29 pessoas, considerando a ocupação típica de cada sala. Neste caso, os professores que estivessem em seus gabinetes deveriam percorrer o corredor interno que possui aproximadamente 21 m de comprimento e o corredor principal com aproximadamente 67 m com destino à única saída do sexto andar (localizada no centro do pavimento). Por outro lado, existem dois extintores de incêndio posicionados exatamente na porta desta sala, o que poderia impedir que este cenário se agravasse.

⁸⁷ Os extintores classe A são utilizados para combater incêndios em materiais sólidos, como papel, madeira e tecido. Enquanto que os extintores classe B são usados para combater incêndios em líquidos inflamáveis, como óleo, gasolina e graxa.

⁸⁸ Laboratório de Cartografia e GIS (CARTOLAB).

Figura 69 – 1º cenário de risco de incêndio



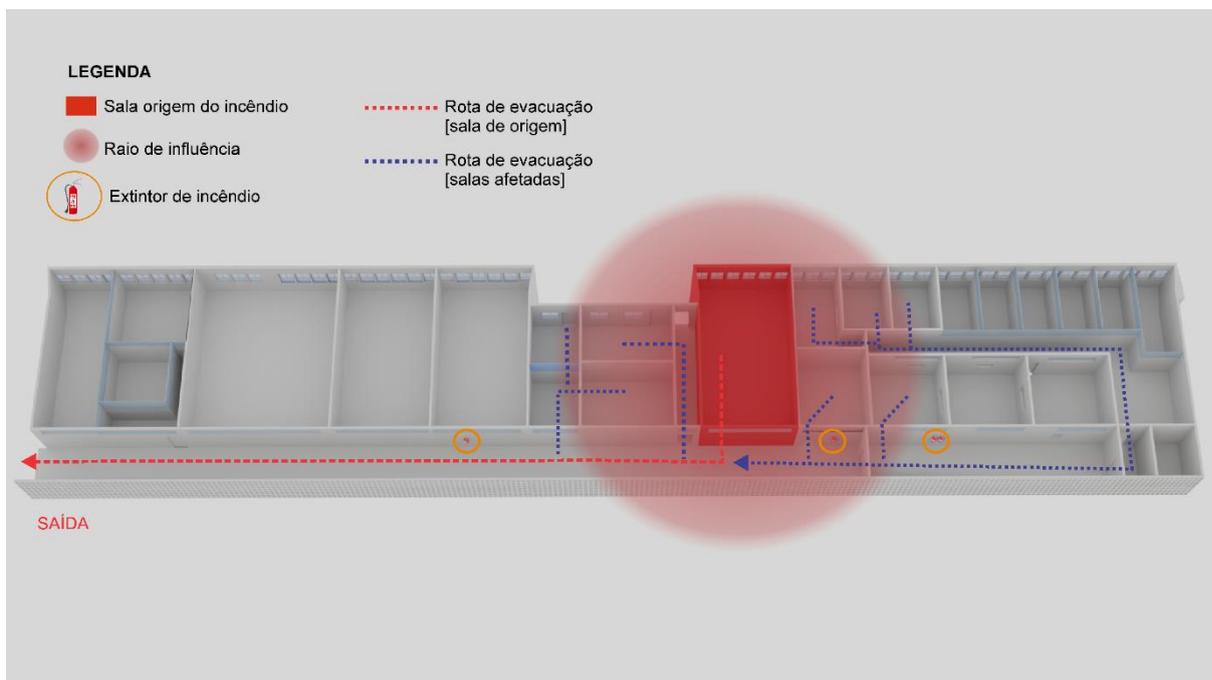
Fonte: Elaborada pela autora (2024).

No segundo cenário de risco de incêndio, foi considerada a sala que corresponde ao LABGEO⁸⁹ (Figura 70), que é uma sala de computadores utilizada na maioria das vezes para atividades de ensino. A sala possui 20 computadores e com potencial de risco maior de incêndio. A sala só apresenta uma porta de saída localizada na parte frontal. Geralmente é utilizada em sua capacidade máxima com 30 pessoas, o que em caso de risco de incêndio seria um problema para evacuar um grande número de pessoas por apenas uma porta. Neste cenário, professores de três salas poderiam ser impactados e precisariam ser evacuados pela mesma rota do primeiro cenário. E outros dois laboratórios também estariam na área de risco, o Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto e o LTGEO⁹⁰. Ao todo, por volta de 42 pessoas poderiam ser afetadas. Quanto à localização dos extintores, verifica-se que a sala ao lado possui um extintor classe A, que poderia ser útil neste caso.

⁸⁹ Laboratório de Geoprocessamento Theodoro Sampaio (LABGEO).

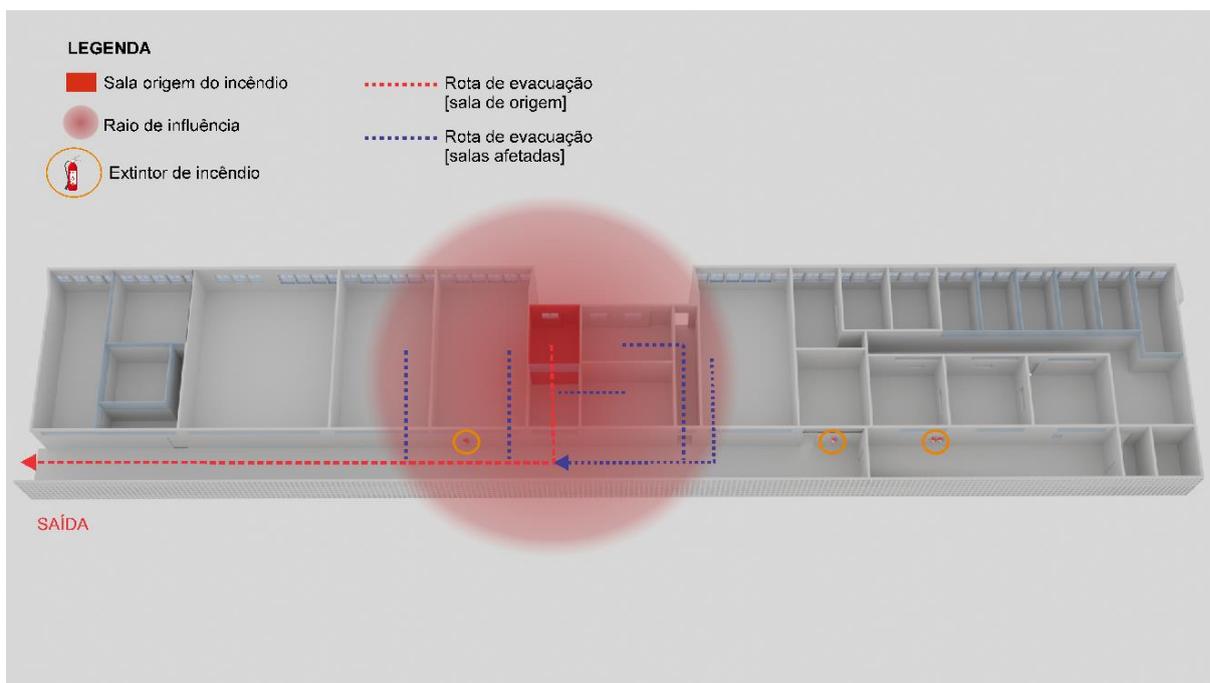
⁹⁰ Laboratório de Topografia e Geodésia (LTGEO).

Figura 70 - 2º cenário de risco de incêndio



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

No terceiro cenário de risco de incêndio, foi usada uma sala que corresponde ao LTGEO (Figura 71), sala que funciona como laboratório e possui alguns computadores. A principal questão seria o grande número de possíveis pessoas afetadas com um incêndio nesta sala, pois a área de risco abrangeria duas salas de aula com capacidade para 40 alunos cada, uma sala de instrumentos que poderia ampliar o fogo (devido ao grande número de baterias de equipamentos) e o LABGEO que possui capacidade de cerca de 30 alunos e 20 máquinas, como já mencionado. Dos três cenários, este seria o que envolve maior número de pessoas, mas em contrapartida poderia ter uma evacuação mais rápida, pelo fato da rota a ser percorrida ser menor, e é a sala mais próxima da saída do prédio (considerando as outras duas).

Figura 71 - 3^o cenário de risco de incêndio

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

6.5.4 Discussão sobre a aplicação SIG 3D - Potencialidades e desafios

Espera-se que os estudos realizados nessa pesquisa e as aplicações propostas para o SIG 3D venham contribuir com a gestão universitária da Escola Politécnica e da UFBA, já que representa uma forma alternativa à que atualmente ocorre no planejamento de espaços para realização das atividades fundamentais de ensino, pesquisa e extensão na Universidade.

Esta aplicação pode auxiliar no processo de gestão principalmente devido ao grau de complexidade de um *campus* universitário que é um ambiente muito dinâmico. Um *campus* universitário possui uma alta rotatividade de equipamentos, os laboratórios podem apresentar mudanças em decorrência das pesquisas em andamento e conseqüentemente os riscos atrelados a eles podem mudar.

Nesse sentido, as ferramentas de um SIG 3D mostram-se eficazes para auxiliar na visualização das informações em três dimensões e facilitar a tomada de decisões cotidianas e excepcionais, como por exemplo: em que sala priorizar a ocorrência de determinada disciplina levando em consideração questões de acessibilidade que são cada vez mais recorrentes; como controlar/reduzir a disseminação do ruído emitido por alguns laboratórios quando localizados próximos às salas de aula; ou ainda, como identificar a proximidade de salas de aula/gabinetes

de professores com laboratórios nos quais existe algum tipo de risco como vazamento de gases tóxicos e/ou de incêndio.

Também é importante ressaltar os desafios encontrados no processo de desenvolvimento desta aplicação principalmente referente à obtenção dos dados da instituição, a realização da modelagem geométrica e identificação dos principais problemas da Universidade que se beneficiariam da aplicação 3D.

Quanto à obtenção dos dados da instituição, os problemas estão relacionados principalmente à falta de informação de fácil acesso nos *websites* das unidades administrativas, o que dificulta o processo de aquisição dos atributos necessários para o uso na aplicação 3D. Quanto ao gerenciamento dos espaços na Universidade, destaca-se que é de responsabilidade da instituição controlar questões básicas como a estrutura física da unidade, otimizando os espaços para atender às demandas. No entanto, muitas vezes isso não acontece e esta tese visa contribuir com a tomada de decisão neste processo por meio das análises espaciais possíveis de serem realizadas com esta aplicação 3D.

No que se refere ao processo de modelagem, os principais desafios que surgiram no desenvolvimento desta aplicação 3D foram: a aquisição de um software que possibilitasse a modelagem nos LOD pretendidos do CityGML (essa questão foi solucionada com a licença do *plugin* CityEditor para o SketchUp); a necessidade de utilizar vários softwares diferentes, já que, cada um possui uma função neste processo, implicando no manuseio de um número elevado de ferramentas para alcançar o objetivo desejado; a perda das informações semânticas após o modelo ter sido exportado do CityEditor e importado no 3DCityDB e conseqüentemente precisar inserir manualmente os dados; e ainda, os problemas ocorridos para visualização das consultas e análises espaciais nas plataformas *web* que tiveram que ser realizadas no Blender.

E por fim, destaca-se o esforço realizado no sentido de identificar quais dos desafios enfrentados pela Universidade poderiam ser solucionados pelas análises espaciais em três dimensões e que poderiam ser realizadas na ferramenta proposta.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Esta tese buscou discutir os desafios relatados na literatura acerca da modelagem numérica 3D de cidades (geométrica e semântica) apresentando diferentes técnicas de aquisição dos dados, variedade de softwares para modelagem geométrica e uso de padrões distintos. Dentre estes, destaca-se o fato de que apesar de haver várias opções de softwares capazes de realizar a modelagem, geralmente não apresentam opções de conversão no formato CityGML, inserção de informações semânticas nem visualização na *web*. E uma vez que é necessário utilizar mais de um software, acaba havendo perdas significativas de dados neste processo, além de retrabalho.

Além destas questões, foram apresentadas outras lacunas que estão relacionadas aos fatores: os modelos numéricos 3D de cidades, em sua maioria, abordam apenas as edificações e desconsideram outros módulos do CityGML; os modelos numéricos acabam envolvendo somente LOD1 e 2 que são menos detalhados; as aplicações voltadas para *campus* universitário englobam apenas visualização das geometrias e não abordam a modelagem com as ferramentas e objetivos de um SIG 3D; e ainda nota-se a subutilização destas ferramentas para gestão dos *campi* universitários.

Assim, esta tese buscou resolver o problema de pesquisa proposto: Quais requisitos funcionais são necessários para implementar uma aplicação SIG 3D para *campus* universitário levando em consideração a modelagem geométrica e semântica baseadas no padrão CityGML?

Verificou-se que o método aplicado *Desing Science Research* (DSR) permitiu que os objetivos propostos fossem alcançados a partir das etapas: identificação do problema, definição dos objetivos, criação do artefato, demonstração do uso, avaliação do artefato e comunicação.

Desta forma, o objetivo específico 1, proposto nesta tese: identificar os requisitos funcionais para elaboração de uma base de dados 3D de *campus* universitário foi atendido e discutido ao longo das seções: 5.1, que determinou os casos de uso da aplicação, seção 5.4 que abordou os requisitos funcionais do sistema (que foram definidos com base nos usuários em potencial do SIG 3D, que são discentes, docentes e gestores) e a seção 5.5 que tratou da modelagem conceitual proposta para o SIG 3D.

O objetivo específico 2: estabelecer os critérios necessários para a modelagem geométrica e semântica dos objetos (edificações, sistema viário e terreno) de acordo com o

padrão CityGML, garantindo a interoperabilidade entre modelos foi alcançado a partir do estudo das especificidades da norma CityGML 2.0, apresentadas no Capítulo 3. As questões relacionadas à forma de aquisição dos dados geométricos e semânticos que foram categorizados em edificações, sistema viário e terreno para compor a base de dados da área de estudo foram abordadas nas seções 6.1 e 6.2. Foi demonstrada a forma como ocorreu a modelagem geométrica de cada um destes módulos propostos bem como as dificuldades encontradas no processo (seção 6.3).

O objetivo específico 3: armazenar o modelo geométrico e semântico, baseado no padrão CityGML, em um banco de dados, foi atendido à medida que o trabalho apresentou uma proposta para o armazenamento do modelo geométrico contendo os objetos (edificações, sistema viário e terreno) e inseriu dados semânticos compatíveis com o LOD pretendido em cada classe. Isso foi possível através do 3DCityDB que permitiu a importação do modelo geométrico e posteriormente a inserção da semântica.

Por fim, o objetivo específico 4: propor uma aplicação SIG 3D, para *campus* universitário, a partir da modelagem geométrica e semântica baseada no padrão CityGML para otimização dos usos dos espaços no *campus* foi também alcançado e minuciosamente detalhado no Capítulo 5 que abordou a modelagem conceitual da aplicação evidenciando as classes que já fazem parte do CityGML e as classes que foram propostas como extensão bem como seus atributos.

Desta forma, considera-se que os objetivos específicos foram solucionados e contribuíram para alcançar o objetivo geral que trata de fornecer subsídios para a implementação de um SIG 3D, no contexto de um *campus* universitário, a partir da modelagem geométrica e semântica, baseada no padrão CityGML.

É importante destacar que a aplicação SIG 3D proposta nesta tese focou na capacidade que o sistema apresenta para auxiliar o gestor em sua tomada de decisões e para isso propõe como requisitos: consultar capacidade de salas de aula e disponibilidade de equipamentos das mesmas; identificar disciplinas alocadas por horário em cada sala das unidades universitárias; identificar os usos e funções dos espaços de todas as edificações do *campus* e, em particular, dos espaços de um pavimento da Escola Politécnica, e reconhecer áreas suscetíveis aos riscos oferecidos por laboratórios.

Nesta tese, partiu-se do pressuposto que um sistema que possibilita consulta à

informações como: usos de um espaço, horários das disciplinas alocadas em determinada sala de aula, tipo de risco associado a um laboratório e localização de saídas de emergência são ferramentas de fundamental importância para uma tomada de decisão mais consciente do gestor de um *campus* universitário. A este gestor compete por exemplo decidir onde alocar as disciplinas em determinadas edificações a fim de reduzir os deslocamentos realizados pelos alunos ou saber onde construir um laboratório tendo em vista o tipo de risco que ele representa para os usuários destes espaços, levando em consideração a posição estratégica de saídas de emergência e localização de extintores, utilizados em caso de incêndio.

Esperava-se que ferramentas como o Google Earth e o 3DCityDB-Web-Map-Client fossem suficientes para atender às demandas da aplicação SIG 3D (via *web*) permitindo a demonstração de uso das funcionalidades que envolveram: a visualização de geometrias em diferentes LOD e seus atributos; a realização de consultas para os objetos das classes previstas na modelagem conceitual e as análises espaciais que possibilitassem a representação de rotas de deslocamento entre edificações e rotas de evacuação em um pavimento da Escola Politécnica. No entanto, as ferramentas mostraram-se insuficientes para atender a estas necessidades (por exemplo, visualizar simultaneamente os usos/funções de diversas edificações da área de estudo, permitindo apenas a visualização de um objeto por vez) e foi utilizado o Blender para demonstração do potencial da aplicação SIG 3D.

Diante do exposto, ficou evidente que apesar de haver muitos softwares disponíveis que possibilitam a construção de modelos geométricos e semânticos no padrão CityGML ainda há alguns desafios a serem considerados, principalmente em relação ao SIG 3D. Alguns destes desafios estão relacionados a: dificuldade em obter dados mais detalhados compatíveis com LOD4, a demanda por softwares que muitas vezes não são gratuitos, a complexidade técnica que exige mão-de-obra especializada com habilidades específicas de áreas como Ciência da Informação Geográfica, banco de dados, modelagem numérica 3D de cidades, programação, etc.

Em contrapartida, ressalta-se a importância da continuidade de pesquisas que avancem neste sentido, para o desenvolvimento de interfaces que atendam aos pressupostos de um SIG 3D, uma vez que estes apresentam inúmeras vantagens em comparação aos sistemas bidimensionais. Estas vantagens referem-se principalmente a: possibilidade em utilizar recursos de textura e aparência agregando informações valiosas em estudos mais detalhados; ao grande número de aplicações nas quais a tridimensionalidade representa um diferencial como cadastro

imobiliário 3D, estimativa de demanda de energia, planejamento urbano, resposta a emergências e gerenciamento de desastres, dentre outros.

Acredita-se que a proposta de aplicação 3D desta tese (construída como artefato do tipo método) demonstrou as vantagens de um SIG 3D para gestão dos *campi* universitários. O artefato foi testado e validado, na medida em que evidenciou-se a importância de uma ferramenta que disponha de dados básicos permitindo consultas simples a respeito dos espaços que todo *campus* apresenta como: salas de aula, laboratórios, gabinetes de professores, salas de computadores etc, e que seja capaz de representar simulações possíveis em determinado contexto, como demonstrado neste caso, com os cenários de incêndio realizados no sexto pavimento da Escola Politécnica. Este contexto deixa claro que o gestor deve estar munido de informações precisas que auxiliem no momento da tomada de decisões.

Com os resultados apresentados nesta tese, considera-se que não há, até o presente momento, uma interface pronta para atender aos requisitos de um SIG 3D, ou seja, que possibilite ao menos a realização de consultas e análises espaciais com modelos geométricos e semânticos em formato CityGML. No entanto, muitas pesquisas estão caminhando neste sentido e espera-se que esta tese tenha fornecido suporte para implementação de SIG 3D em universidades de acordo com suas demandas e expectativas⁹¹.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O artefato desenvolvido nesta tese permitiu a proposição de uma aplicação SIG 3D com base em modelagem geométrica e semântica no padrão CityGML para um *campus* universitário. Entretanto foi proposto como protótipo e poderá ser implementado com funções específicas a critério dos gestores e necessidades dos usuários.

Recomenda-se que os estudos futuros busquem desenvolver as seguintes áreas:

- É necessário avançar na discussão do conceito de SIG 3D, já que ainda não há um consenso entre autores sobre a denominação e características de um SIG 3D e muitos acabam se referindo apenas à modelagem geométrica e semântica;
- Sejam realizados estudos com ênfase na modelagem numérica 3D de cidades,

⁹¹ Os dados geoespaciais e modelos CityGML produzidos nesta tese estão disponíveis publicamente no endereço <https://github.com/Elainegomes2024/GIS3D>. Estes dados serão repassados para os gestores do *campus* Federação Ondina de modo que possam ser utilizados posteriormente nas mais diversas aplicações.

comparando os modelos geométricos e semânticos nas versões 2.0 e 3.0 CityGML, uma vez que a maioria dos softwares ainda não apresenta recursos para modelagem na nova versão do CityGML;

- Estudos que viabilizem a geração de modelos geométricos e semânticos em formato CityGML nos softwares disponíveis no mercado sem haver perda de dados;
- Estudos que identifiquem os problemas relacionados aos atributos, viabilizando a inserção automática da semântica dos objetos no 3DCityDB sem perda de dados;
- Alternativas para visualizar na *web* os modelos geométricos e semânticos que permitam realizar consultas e análises espaciais típicas de um SIG 3D;
- Estudos que foquem em demandas específicas dos *campi* universitários visto que nesta tese foi retratada uma pequena parte e pode ser muito mais explorado;
- Recomenda-se que estas ferramentas desenvolvidas sejam testadas pelos próprios gestores dos *campi* universitários a fim de avaliar se atendem as suas reais necessidades.

REFERÊNCIAS

3D INFORMATION SYSTEMS (3DIS). **CityEditor user's manual**. Bocholt: 3DIS, 2016. [125] p.

AGUGIARO, G.; ROBINEAU, J. L.; RODRIGUES, P. Project CI-ENERGY: towards an integrated energy urban planning system from a data modelling and system architecture perspective. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART DATA AND SMART CITIES*, 2., 2017, Puebla. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. p. 5-12.

AKMALIA, R.; SETAN, H.; MAJID, Z.; SUWARDHI, D. Representing 3D model of building from TLS data scanning in CityGML. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, Johor Bahru, v. 71, n. 4, p. 47–51, 2014.

ALMEIDA FILHO, N. Revisão do marco normativo da UFBA no contexto da autonomia. *In: UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA (UFBA). Estatuto e regimento geral*. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2010. p. 5-13.

AMORIM, A. L. Estabelecendo requisitos para a Modelagem da Informação da Cidade (CIM). *In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO*, 4., 2016, Porto Alegre. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2016.

ANH, P.; CHUC, M. D.; HUNG, B. Q.; THANH, N. T. N. Development of Virtual Campus Using GIS Data and 3D GIS Technology: a case study for Vietnam National University, Hanoi. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE AND SYSTEMS ENGINEERING*, 9.; 2017, Hue. **Proceedings** [...]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017. p. 281-286.

BANSAL, V. K. Use of geographic information systems in spatial planning: a case study of an institute *campus*. **Journal of Computing in Civil Engineering**. Fairfax, v. 28, n. 4, 2014. p. 1-12.

BEIL, C.; KOLBE, T. H. CityGML and the streets of New York - a proposal for detailed street space modelling. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE*, 12., 2017, Melbourne. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. p. 2-9.

BILJECKI, Filip. **Level of detail in 3D city models**. 2017. Proefschrift (PhD degree in 3D GIS) - Delft University of Technology, Delft, 2017.

BILJECKI, F.; KUMAR, K.; NAGEL, C. CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, New York, v. 3, n. 13, p. 1-17, August 2018.

BILJECKI, F.; LEDOUX, H.; DU, X.; STOTER, J.; SOON, K. H.; KHOO, V. H. S. The most common geometric and semantic errors in CityGML datasets. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE*, 11., 2016, Athens. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016 a. p. 13–22.

BILJECKI, F.; LEDOUX, H.; STOTER, J.; VOSSSELMAN, G. (Biljecki *et al.*, 2016 b). The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)**. Hannover: Elsevier, v. 116, p. 42-54, 2016 b. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.003>.

BILJECKI, F.; LEDOUX, H.; STOTER, J. Generating 3D city models without elevation data. **Computers, Environment and Urban Systems**, New York, v. 64, p. 1–18, July 2017.

BILJECKI, F.; STOTER, J.; LEDOUX, H.; ZLATANOVA, S.; ÇÖLTEKIN, A. Applications of 3D City Models: state of the art review. **International Journal of Geo-Information**, Hannover, v. 4, p. 2842-2889, December 2015.

BOBKOWSKA, K.; SZULWIC, J.; TYSIAC, P.; ZIÓLKOWSKI, P. GIS three dimensional modelling with geo-informatics techniques. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE "ENVIRONMENTAL ENGINEERING", 10., 2017, Vilnius. **Proceedings** [...]. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Press (VGTU Press), 2017.

BORGES, K. A. V. **Modelagem de dados geográficos: curso de especialização em geoprocessamento**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. 66 p.

BUYUKDEMIRCI OGLU, M.; KOCAMAN, S. A 3D campus application based on city models and WEBGL. *In*: SYMPOSIUM "GEOSPATIAL TECHNOLOGY – PIXEL TO PEOPLE", 5., 2018, Dehradun. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018. p. 161-165.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 345 p.

CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: experiência na UFPR. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais** [...]. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. p. 3645-3652.

CHEN, K. W.; JANSSEN, P.; NORFORD, L. Automatic generation of semantic 3D City models from conceptual massing models. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES, 17., 2017, Istanbul. **Proceedings** [...]. New York: Springer, 2017. p. 84-100.

CHEN, K. W.; MEGGERS, F. Modelling the built environment in 3D to visualize data from different disciplines: The Princeton University Campus. **Journal of Digital Landscape Architecture**, Berlin, v. 5, n. 1, p. 227-234. May 2020.

COLUCCI, E.; NOARDO, F.; MATRONE, F.; SPANÒ, A.; LINGUA, A. High-level-of-detail semantic 3D GIS for risk and damage representation of architectural heritage. *In*: SYMPOSIUM "3D SPATIAL INFORMATION SCIENCE – THE ENGINE OF CHANGE", 4., 2018, Delft, **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018. p. 107-114.

COUTO, R. A. S. **O uso de ferramentas de geoprocessamento para o gerenciamento de bens patrimoniais e prediais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CREATING A SMART 3D CITY MODEL FROM START TO FINISH. [S. l.: s. n.], 2014. 1 vídeo (62 min). Publicado pelo canal CityEngineTV. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=MxT39BK1_iU. Acesso em: 29 abr. 2018.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Sistemas de banco de dados**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2005. 503 p.

EL-MEKAWY, M.; ÖSTMAN, A.; HIJAZI, I. A unified building model for 3D urban GIS. **International Journal of Geo-Information**, Hannover, v. 1, n. 2, p. 120-145, July 2012.

ENQING, J.; PEIXIANG, R.; HUANJIN, W.; YANPING, S. Discussion on construction method of smart campus basic platform based on 3D geographic information technology. *In: CHINESE AUTOMATION CONGRESS (CAC)*, 1., 2017, Jinan. **Proceedings** [...]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017. p. 7790-7794.

ESTEVEZ, J. C. **Planejamento e gestão do ambiente construído em universidades públicas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

FEITOSA, F. F. **Análise de Dados Espaciais: Baseadas na Localização**. Julho de 2015. 44 slides. Disponível em: <http://docplayer.com.br/49804260-Analise-de-dados-espaciais-baseadas-na-localizacao.html>. Acesso em: 26 maio 2022.

FENGHUA, W.; JIUDONG, Y.; JUN, D.; DEQING, G. The design and implementation of the 3-D campus geographic information system. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, 2., 2010, Hangzhou. **Proceedings** [...]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010. p. 4136-4139.

FLIEGNER, C.; BRÜNTJEN, M.-A.; FRISCH, J.; VON TREECK, C. Database development with “3DCityGML”- and “EnergyAde”- schema für CityDistrict-simulation modelling. *In: CENTRAL EUROPEAN SYMPOSIUM ON BUILDING PHYSICS*, 3., 2016, Dresden. **Proceedings** [...]. Dresden: Technische Universität Dresden, 2016. p. 235-241.

GEOESPAÇO. **Webinar de supermap**. Brasília: Geoespaço Smart Solutions, 2021. *E-book* (138 p.).

GOMES, J. M.; VELHO, L. **Computação visual: Imagens**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Matemática, 1995.

GROETELAARS, Natalie Johanna. **Criação de modelos BIM a partir de “nuvens de pontos”**: estudos de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

GRÖGER, G.; KOLBE, T. H.; NAGEL, C.; HÄFELE, K.-H. **OGC City Geography Markup Language (CityGML) encoding standard**. Wayland: Open Geospatial Consortium, 2012. 344 p.

GRÖGER, G.; PLÜMER, L. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Hannover, v. 71, p. 12–33, July 2012.

GUNEY, C. Rethinking GIS towards the vision of smart cities through CityGML. *In: INTERNATIONAL GEOADVANCES WORKSHOP, 3.*, 2016, Istanbul. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018. p. 121-129.

HERON FOR GRASSHOPPER. [S. l.: s. n.], 2014. 1 vídeo (15 min). Publicado pelo canal Brian Washburn. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Wy3xKMjfJKw&t=287s>. Acesso em: 10 jun. 2018.

HEVNER, A. R.; MARCH, S.T.; PARK, J. Design Science in Information Systems Research. **MIS Quaterly**. Minneapolis: MIS Research Center, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HIJAZI, H.; KRAUTH, T.; DONAUBAUER, A.; KOLBE, T. 3DCityDB4BIM: A system architecture for linking BIM server and 3D CityDB for BIM-GIS-integration. *In: ISPRS CONGRESS, 24.*, 2020, Nice. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2020. p. 195-202.

JESUS, E. G. V.; AMORIM, A. L.; GROETELAARS, N. J.; FERNANDES, V. O. Urban modeling for 3D GIS purposes from laser scanning: an implementation for university *campus*. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 22.*, 2018, São Carlos. **Proceedings** [...]. São Paulo: Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital, 2018a.

JESUS, E. G. V.; AMORIM, A. L.; GROETELAARS, N. J.; FERNANDES, V. O. Modeling cities for 3D_GIS purposes. *In: SYMPOSIUM “3D SPATIAL INFORMATION SCIENCE – THE ENGINE OF CHANGE”, 4.*, 2018, Delft. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018b. p. 135–142.

JULIN, A.; JAALAMA, K.; VIRTANEN, J. P.; POUKE, M.; YLIPULLI, J.; VAAJA, M.; HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H. Characterizing 3D city modeling projects: Towards a harmonized interoperable system. **International Journal of Geo-Information**, Hannover, v. 7, n. 55, p. 1-18, February 2018.

KAHRAMAN, I.; KARAS, I. R.; ALIZADEHASHARFI, B.; ABDUL-RAHMAN, A. A 3D campus information system – initial studies. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE, 8.*, 2013, Istanbul. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. p. 35-39.

KEMEC, S.; ZLATANOVA, S.; DUZGUN, S. A framework for defining a 3D model in support of risk management. *In: KONECNY, M.; ZLATANOVA, S. BANDROVA, T. Geographic information and cartography for risk and crisis management*. New York: Springer, 2010. p. 69–82.

KIM, T.; CHO, W.; MATONO, A.; KIM, K. PinSout: automatic 3D indoor space construction from point clouds with deep learning. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, 28*, 2020, Seattle. **Proceedings** [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2020. p. 211-214.

KOLBE, Thomas H.; NAGEL, Claus. HERRERUELA, Javier; KÖNIG, Gerhard; LORENZ, Alexandra; NADERI, Babak; KUNDE, Felix. **3D City Database for CityGML**. Berlin: virtualcitySYSTEMS, 2019. 342 p.

KOLBE, T. H.; KUTZNER, T.; SMITH, C. S.; NAGEL, C.; ROENSDORF, C.; HEAZEL, C. **City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard**. Arlington: Open Geospatial Consortium, 2021.

KUTZNER, T.; CHATURVEDI, K.; KOLBE, T. H. CityGML 3.0: New functions open up new applications. **Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science**, New York, v. 88, p. 43-61, February 2020.

LI, J.; YING, B.; YANG, W.; NING, Z.; CUI, W. The application of ArcGIS and SketchUp in the virtual campus construction: case of Shanxi Normal University. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA TECHNOLOGY*, 1.; 2011, Hangzhou. **Proceedings** [...]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011. p. 1778- 1780.

LI, W.; ZLATANOVA, S.; DIAKITE, A. A.; ALEKSANDROV, M.; YAN, J. Towards integrating heterogeneous data: A spatial DBMS solution from a CRC-LCL Project in Australia. **International Journal of Geo-Information**, Hannover, v. 9, n. 63, p. 1-30, January 2020.

LIMA, M. Q. C.; FREITAS, C. F. S. Modelagem paramétrica e os limites dos mecanismos tradicionais de regulação da forma urbana. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, Vancouver, v. 4, n. 1, p. 117–138, jan./jul., 2016.

LISBOA FILHO, J.; IOCHPE, C.; HASENACK, H.; WEBER, E. J. Modelagem conceitual de banco de dados geográficos: o estudo de caso do Projeto PADCT/CIAMB. *In: CENTRO DE ECOLOGIA (org.)*. **Carvão e Meio ambiente**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 440-458.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MADEIRA, J. M. P. **Administração pública**, 11. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 465 p.

MAGALHÃES, I. A. **Organização dos dados geoespaciais de edificações universitárias para ambiente SIGWEB**: estudo de caso cursos Politécnic/UFBA e avaliação do MEC - avaliação de infraestrutura da Escola Politécnica da UFBA com base em critérios de avaliação de cursos do MEC. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

MALINVERNI, E. S.; NATICCHIA, B.; GARCIA, J. L. L.; GORREJA, A.; URIARTE, J. L.; DI STEFANO, FRANCESCO. A semantic graph database for the interoperability of 3D GIS data. **Applied Geomatics**. Roma: Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, v. 14, n. 1, p. 53–66, March 2022.

MANZOLI, A. **Proposta de um SIG para planejamento e gestão de campus universitário**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research in information technology. **Decision Support Systems**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 251-266, December 1995.

MOSER, J.; ALBRECHT, F.; KOSAR, B. Beyond visualisation – 3D GIS analyses for virtual city models. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE, 5., 2010, Berlin. Proceedings [...]*. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2010. p. 143-146.

PEFFERS, K. TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**. London: Routledge Taylor & Francis Group, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2008. <http://dx.doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.

PISPIDIKIS, I.; TSILIAKOU, E.; KITSAKIS, D.; ATHANASIOU, K.; KALOGIANNI, E.; LABROPOULOS, T.; DIMOPOULOU, E. Combining methodological tools for the optimum 3D modelling of NTUA campus. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE, 13., 2018, Delft. Proceedings [...]*. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018. p. 57–63.

PRANDI, F.; DEVIGILI, F.; SOAVE, M.; DI STASO, U.; DE AMICIS, R. 3D web visualization of huge CityGML models. *In: GEOSPATIAL WEEK, 1., 2015, La Grande Motte. Proceedings [...]*. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015. p. 601–605.

PRIETO, I.; EGUSQUIZA, A.; DELGADO, F. J.; MARTÍNEZ, R.; CityGML como modelo de datos para la representación, intercambio y visualización de información sobre el patrimonio arquitectónico. **Virtual Archaeology Review**, Valencia, v. 3, n. 5, p. 48-52, Mayo 2012.

QUEIROZ, G. R.; FERREIRA, K. R. SGBD com extensões espaciais. *In: CASANOVA, M.; CÂMARA, G.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. (org.). Banco de dados Geográficos*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 267-303.

RAMLEE, S. S. S.; ABD RAZAK, N.; UJANG, U.; MOHD. SALLEH, S.; AZRI, S.; CHOON, T. L. Towards 3D smart campus via 3D city modelling. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMATICS AND GEOSPATIAL TECHNOLOGY, 6., 2019, Kuala Lumpur. Proceedings [...]*. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. p. 523-526.

REDWEIK, P.; TEVES-COSTA, P.; VILAS-BOAS, I.; SANTOS, T. 3D city models as a visual support tool for the analysis of buildings seismic vulnerability: the case of Lisbon. 2017. **International Journal of Disaster Risk Science**, New York, v. 8, n. 3, p. 308-325, September 2017.

RODRIGUES, J. I. J.; FIGUEIREDO, M. J. G.; COSTA, C. P. Web3D GIS for city models with CityGML and X3D. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION VISUALIZATION, 17, 2013, London. Proceedings [...]*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013. p. 384-388.

SACRAMENTO, I. C. C. **Proposta de sistema integrado IoT/GIS de baixo custo para apoio a gestão da segurança contra incêndios em campus universitário**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

- SALHEB, N.; OHORI, K. A.; STOTER, J. Automatic conversion of CityGML to IFC. *In: BIM/GIS INTEGRATION WORKSHOP AND 3D GEOINFO CONFERENCE*, 3.,15., 2020, London. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2020. p. 127-134.
- SALLES, João Carlos; MIGUEZ, Paulo. O Plano de Desenvolvimento Institucional da UFBA. *In: UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. Plano de Desenvolvimento Institucional 2018 – 2022*. Salvador: Edufba, 2017, 161 p.
- SANTANA, S.; MOURA, A. C. M.; ZYNGIER, C. The trends of geotechnology to support urban planning: new paradigms and challenges. **Journal of Earth Science and Engineering**, Hyderabad, v. 3, p. 484-496, 2013.
- SANTOS, A. P.; LEITE, D. P.; PEREIRA, I. A. A.; HIROOKINAGA, C. Digital city: the construction of public shapefiles as a teaching environment, research and extension. *In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL*, 20., 2016, Buenos Aires. **Proceedings** [...]. São Paulo: Blucher, 2016. p. 272-277.
- 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: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- SARAN, S.; OBERAI, K.; WATE, P.; KONDE, A.; DUTTA, A.; KUMAR, K.; KUMAR, A.S. Utilities of virtual 3D city models based on CityGML: various use cases. 2018. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, New York, v. 46, n. 6, p. 957–972, June 2018.
- SARAN, S.; WATE, P.; SRIVASTAV, S. K.; MURTHY, Y. V. N. K. CityGML at semantic level for urban energy conservation strategies. **Annals of GIS**, London, v. 21, n. 1, p. 27-41. March 2015.
- SCHILLING, A.; BOLLING, J.; NAGEL, C. Using glTF for streaming CityGML 3D City models. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEB3D TECHNOLOGY*, 21., 2016, Anaheim. **Proceedings** [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2016. p. 109-116.
- SILVA, D. S. S. **Banco de dados geográficos para gerenciamento da infraestrutura da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.
- SINGH, H.; GARG, R. D. Web 3D GIS application for flood simulation and querying through open source technology. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, New York, v. 44, n. 4, p. 485-494. August 2016.
- SOON, K. H.; KHOO, V. H. S. CityGML modelling for Singapore 3D national mapping. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE*, 12., 2017, Melbourne. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. p. 37–42.

SUWARDHI, D.; TRISYANTI, S.W.; AINIYAH, N.; FAJRI, M.N.; HANAN, H.; VIRTRIANA, R.; EDMARANI, A. A. 3D surveying, modeling and geo-information system of the new campus of ITB-Indonesia. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE*, 11., 2016, Athens. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016. p. 97–105.

TAMBANI, R. M. **O uso de sistema de informação geográfica na gestão de um campus: estudo de caso.** Universidade Estadual de Londrina. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia). Departamento de Geociências, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

TEMPLIN, T.; BRZEZINSKI, G.; RAWA, M. Visualization of spatio-temporal building changes using 3D Web GIS. *In: WORLD MULTIDISCIPLINARY EARTH SCIENCES SYMPOSIUM*, 4., 2019, Prague, **Proceedings** [...]. Bristol: IOPscience, 2019. p. 1-10.

TRISYANTI, S.W.; SUWARDHI, D.; MURTIYOSO, A.; GRUSSENMEYER, P. Low cost web-application for management of 3D digital building and complex based on BIM and GIS. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP LOWCOST 3D – SENSORS, ALGORITHMS, APPLICATIONS*, 6., 2019, Strasbourg. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. p. 371-375.

TSILIAKOU, E.; LABROPOULOS, T.; DIMOPOULOU, E. Transforming 2D cadastral data into a dynamic smart 3D model. *In: 3D GEOINFO CONFERENCE*, 8., 2013, Istanbul. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. p. 105-111.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA (UFBA). **Estatuto e regimento geral.** Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2010. 104 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **CampusMap.** Disponível em: <http://www.campusmap.ufpr.br/>. Acesso em: 27 abr. 2021.

UNIVERSITY OF MICHIGAN. **Maps student life campus information.** Disponível em: <https://maps.studentlife.umich.edu/>. Acesso em: 30 mar. 2021.

UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN. **UT maps.** Disponível em: <https://maps.utexas.edu/#/utm>. Acesso em: 15 jun. 2021.

VACCA, G.; FIORINO, D. R.; PILI, D. A WEBGIS for the knowledge and conservation of the historical buildings in Sardinia (Italy). *In: FOSS4G EUROPE*, 3., 2017, Marne La Vallée, **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. p. 171-178.

VALENCIA, J.; MUÑOZ-NIETO, A.; RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P. Virtual modeling for cities of the future. State-of-the art and future challenges. *In: VIRTUAL RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF COMPLEX ARCHITECTURES*, 2015, Avila. **Proceedings** [...]. Hannover: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, p. 179-185.

VAN DEN BRINK, Linda. STOTER, Jantien. ZLATANOVA, Sisi. UML-based approach to developing a CityGML application domain extension. *Transactions in GIS (online)*. Oxford : Blackwell Publishers, v. 17, n. 6, p. 920-942, 2013.

VITALIS, S.; OHORI, K. A.; STOTER, J. CityJSON in QGIS: Development of an open-source plugin. **Transactions in GIS**, Nova Jersey, v. 24, n. 5, p. 1147–1164, June 2020.

WENDEL, J.; SIMONS, A.; NICHERSU, A.; MURSHED, S. M. Rapid development of semantic 3D city models for urban energy analysis based on free and open data sources and software. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SMART CITIES AND URBAN ANALYTICS, 3., 2017, California: **Proceedings** [...]. New York: Association for Computing Machinery (ACM), 2017.

YAO, Z.; NAGEL, C.; KUNDE, F.; HUDRA, G.; WILLKOMM, P.; DONAUBAUER, A.; ADOLPHI, T.; KOLBE, T. H. 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**, New York, v. 3, n. 5, p. 1-26, May 2018.

ZLATANOVA, S.; RAHMAN, A. A.; PILOUK, M. Trends in 3D GIS development. **Journal of Geospatial Engineering**, Hong Kong, v. 4, n. 2, p. 71-80, December 2002.

ZLATANOVA, S.; STOTER, J.; ISIKDAG, U. Standards for exchange and storage of 3D information: challenges and opportunities for emergency response. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARTOGRAPHY AND GIS, 4., 2012, Bulgaria. **Proceedings** [...]. Bern: International Cartographic Association (ICA), 2012.

APÊNDICE A – DICIONÁRIO DE DADOS DAS CLASSES E ATRIBUTOS DA APLICAÇÃO SIG 3D

Classe *Office* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Office</i>	Refere-se as salas/gabinetes ocupados pelos professores, que podem ser individuais ou coletivas.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico da sala	integer
nome	Indica o nome do(s) professor(es)	text
contato	Indica o e-mail do(s) professor(es)	text

Classe *Lab* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Lab</i>	Compreendem os laboratórios destinados aos projetos de ensino, pesquisa e extensão nos níveis de graduação, mestrado e doutorado.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico do laboratório	integer
contato	Indica o e-mail do servidor (técnico e professor) responsável	text
nome	Indica o nome do laboratório	text
responsavel	Indica o nome do servidor (técnico e professor) responsável pelo laboratório	text
tipo_risco	Indica o tipo de risco do laboratório	text

Classe *Classroom* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Classroom</i>	Representam as salas nas quais são ministradas as aulas teóricas e práticas.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico da sala	integer
nome	Indica o nome da sala	text
disciplinas	Indica o código das disciplinas ministradas na sala	integer
tamanho	Indica a área da sala	real
capacidade	Indica o número de alunos que a sala comporta	integer
comp	Indica a disponibilidade de computador para o professor	boolean
proj	Indica a disponibilidade de projetor	boolean
n_mesas	Indica o número de mesas	integer
n_cadeiras	Indica o número de cadeiras	integer
climatizacao	Indica a disponibilidade de ar-condicionado	boolean
rede	Indica o número de pontos de rede	integer

Classe *Computerpool* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Computerpool</i>	São as salas que possuem computadores utilizados por exemplo em aulas práticas e cursos de extensão.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico da sala	integer
nome	Indica o nome da sala	text
disciplinas	Indica o código das disciplinas ministradas na sala	integer
capacidade	Indica o número de alunos que a sala comporta	integer
comp	Indica o número de computadores presentes na sala	integer
manut_comp	Indica o número de computadores em manutenção	integer
climatizacao	Indica a disponibilidade de ar-condicionado	boolean
rede	Indica o número de pontos de rede	integer
proj	Indica a disponibilidade de projetor	boolean

Classe *Room* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Room</i>	Compreendem as salas de aula da edificação.	Solid
Atributo	Descrição	Tipo
andar	Indica o andar no qual a sala está localizada	integer

Classe *Other_Room* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Other_rooms</i>	Correspondem aos ambientes não listados anteriormente como: auditórios, refeitórios, banheiros, depósitos, sala de reuniões, agremiações estudantis, etc.	Solid
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico do ambiente	integer
nome	Indica o nome do ambiente	text
tipo_risco	Indica o tipo de risco do ambiente	text
rede	Indica o número de pontos de rede	integer
climatizacao	Indica a disponibilidade de ar-condicionado	boolean

Classe *Computer* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Computer</i>	Representam as descrições das configurações individuais de cada computador.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico do computador	integer
tombo	Indica o número do tombo disponibilizado pela Universidade	text
CPU	Indica a velocidade do processador	real
GPU	Indica a quantidade de memória da placa de vídeo	integer
RAM	Indica a quantidade de memória RAM	integer
ROM	Indica a quantidade de memória ROM	integer
monitor	Indica o tamanho do monitor em polegadas	real
fabricante	Indica a empresa fabricante	text
aquisicao	Indica a data de aquisição do computador	date
garantia	Indica o prazo de garantia	date
OS	Indica o sistema operacional	text

Classe *Software_list* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Software_list</i>	Referem-se ao software instalado nos computadores.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código numérico do software	integer
nome	Indica o nome do software	text
min_CPU	Indica a quantidade mínima necessária de CPU	real
min_RAM	Indica a quantidade mínima necessária de memória RAM	integer
min_GPU	Indica a quantidade mínima de memória gráfica	real
min_ROM	Indica a quantidade mínima necessária de memória ROM	integer
tipo_licenca	Indica o tipo de licença	text

Classe *AbstractBuilding* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>AbstractBuilding</i>	Representam as edificações do <i>campus</i> .	MultiSurface
Atributo	Descrição	Tipo
nome	Indica o nome da edificação	text
funcao	Indica a função da edificação	integer
uso	Indica o uso da edificação	integer
ano_const	Indica o ano de construção da edificação	date
ano_demol	Indica o ano de demolição da edificação (se for o caso)	date
tipo_telhado	Indica o tipo de telhado da edificação	integer
altura_media	Indica a altura média da edificação	integer
n_pav	Indica o número de pavimentos da edificação	integer
alt_pav_acima_solo	Indica a altura dos pavimentos acima do solo	integer
alt_pav_abaixo_solo	Indica a altura dos pavimentos abaixo do solo	integer

Classe *Campus* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Campus</i>	Representa o campus universitário.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código do campus	integer
nome	Indica o nome do campus	text
cod_munic	Indica o código do município	integer
nome_munic	Indica o nome do município	text

Classe *Path* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Path</i>	Corresponde as áreas de circulação dentro da edificação.	MultiSurface
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código das áreas	integer

Classe *Entrance* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Entrance</i>	Corresponde aos pontos (nós) da rede arco nó.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código dos pontos	integer

Classe *Circulation* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Circulation</i>	Corresponde a uma rede arco nó que integra os caminhos percorriáveis dentro da edificação.	
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código da rede arco nó	integer

Classe *CPE* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>CPE</i>	Representam os equipamentos de proteção coletiva.	Multipoint
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código do equipamento	integer
tipo equip	Indica o tipo do equipamento	text

Classe *Door* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Door</i>	Referem-se as portas da edificação.	MultiSurface
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código da porta	integer

Classe *Opening* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Opening</i>	Referem-se as aberturas de uma edificação que podem ser janela ou portas.	MultiSurface
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código da abertura	integer

Classe *Window* e seus atributos

Classe	Descrição	Geometria
<i>Window</i>	Referem-se as janelas da edificação	MultiSurface
Atributo	Descrição	Tipo
cod	Indica o código da janela	integer

APÊNDICE B – LISTA DE CÓDIGOS DOS MÓDULOS CITYGML

Módulo *Building* – atributo *Class*⁹²

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>_AbstractBuilding</i>	Classe usada para representar as edificações em LOD1	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Scholls, education, research</i>	Indica as edificações que pertencem à classe educação	1100
<i>Administration</i>	Indica as edificações que pertencem à classe administração	1020

Módulo *Building* - atributo *Function e Usage*

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>_AbstractBuilding</i>	Classe usada para representar as edificações em LOD1	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Administration building</i>	Indica as edificações que possuem função/uso administrativo	1970
<i>Building for education and reseacrh</i>	Indica as edificações que possuem função/uso educacional	2070
<i>Restaurant</i>	Indica as edificações que possuem função/uso como restaurante	1240
<i>Library</i>	Indica as edificações que possuem função/uso como biblioteca	2190
<i>Hospital</i>	Indica as edificações que possuem função/uso como hospital	2310
<i>Other</i>	Indica as edificações que possuem outras funções/úsos. Neste caso foi usado para bancos	2700

Módulo *Building* – atributo *Rooftype*

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>_AbstractBuilding</i>	Classe usada para representar as edificações em LOD1	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Flat Roof</i>	Indica as edificações que possuem telhado plano	1000

⁹² Os códigos para atributo *class*, 1100 e 1020 são os mesmos para as classes.

Módulo *Building* – atributo *Function* e *Usage*

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>Room</i>	Classe usada para representar as edificações em LOD4	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Kitchen</i>	Usado para indicar cozinhas	1020
<i>Toilet</i>	Usado para indicar banheiros	1050
<i>Stairs</i>	Usado para indicar escadas	1060
<i>Canteen/ Common kitchen</i>	Usado para indicar cantinas	1140
<i>Terrace</i>	Usado para indicar varandas	1170
<i>Conference Room</i>	Usado para indicar salas de conferências	1320
<i>Reception</i>	Usado para indicar recepções	1330
<i>Entrance hall</i>	Usado para indicar hall de entrada	1510
<i>Elevator</i>	Usado para indicar elevadores	1520
<i>Conference hall</i>	Usado para indicar hall de conferências	1570
<i>Computer room</i>	Usado para indicar sala de informática	1600
<i>Restaurant</i>	Usado para indicar restaurantes	1780
<i>Auditorium</i>	Usado para indicar auditórios	1910
<i>Administration</i>	Usado para indicar salas administrativas	2020
<i>Library</i>	Usado para indicar bibliotecas	2040
<i>Classroom</i>	Usado para indicar salas de aula	3300
<i>Laboratory</i>	Usado para indicar laboratórios	3330
<i>Equipment room</i>	Usado para indicar salas de equipamentos	2080
<i>Office</i>	Usado para indicar escritórios	3390

Módulo *Building* – atributo *Function* e *Usage*

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>Building Furniture</i>	Classe usada para representar as edificações em LOD4	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Work bench</i>	Usado para indicar mesas de computador	1270
<i>Compressed air system</i>	Usado para indicar ar-condicionado	2560
<i>Desk</i>	Usado para indicar mesas	1230
<i>Chair</i>	Usado para indicar cadeiras	1300
<i>Office chair</i>	Usado para indicar cadeiras de escritório	1320
<i>TV</i>	Usado para indicar televisão	1610
<i>Computer</i>	Usado para indicar computadores	1960
<i>Cupboard</i>	Usado para indicar armários	1000
<i>Fire extinguisher</i>	Usado para indicar extintores de incêndio	2533

Módulo *Transportation* – atributo *Function* e *Usage*

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>TrafficArea</i>	Classe usada para representar transportes em LOD2	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Driving_lane</i>	Usado para indicar faixas de condução	1
<i>Crosswalk</i>	Usado para indicar faixas de pedestres	20
<i>Footpath</i>	Usado para indicar trilhas	2
<i>Cyclepath</i>	Usado para indicar ciclovias	3

Módulo *Transportation* – atributo *Function* e *Usage*

Classe do modelo conceitual	Descrição	
<i>AuxiliaryTrafficArea</i>	Classe usada para representar os transportes em LOD2	
Atributo	Descrição	Cod
<i>Green area</i>	Usado para indicar áreas verdes	1020
<i>Middle lane</i>	Usado para indicar faixas do meio	1030
<i>Parking bay</i>	Usado para indicar vagas de estacionamento	1100
<i>Kerbstone</i>	Usado para indicar meio-fio	1220

APÊNDICE C – EXEMPLOS DE SCRIPTS ELABORADOS PARA BANCO DE DADOS

```
create table citydb.classroom (  
    id serial primary key,  
    capacidade smallint,  
    climatizacao boolean,  
    computador boolean,  
    n_cadeiras smallint,  
    n_mesas smallint,  
    nome varchar (100) not null unique,  
    projetor boolean,  
    rede boolean,  
    tamanho numeric);
```

```
create table citydb.computerpool (  
    id serial primary key,  
    capacidade smallint,  
    climatizacao boolean,  
    computador boolean,  
    manut_comp smallint,  
    nome varchar (100) not null unique,  
    projetor boolean,  
    rede boolean,  
    pontos_rede smallint);
```

```
INSERT INTO citydb.classroom(  
    capacidade, climatizacao, computador, n_cadeiras, n_mesas, nome, projetor, rede,  
    tamanho)  
VALUES (40, false, true, 40, 1, '6.03.04', true, true, 59.32);
```