



**Pedro Rattes Pascoli**

**O *Digital Twin* no Planejamento e Gestão Urbana: Recurso chave para as atuais demandas climáticas, sociais e tecnológicas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcelo Roberto Ventura Dias de Mattos Bezerra

Rio de Janeiro  
Setembro de 2024



**Pedro Rattes Pascoli**

**O *Digital Twin* no Planejamento e Gestão Urbana:  
Recurso chave para as atuais demandas climáticas,  
sociais e tecnológicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Marcelo Roberto Ventura Dias de Mattos Bezerra**

Orientador

Departamento de Arquitetura e Urbanismo – PUC-Rio

**Prof. Rafael Silva Nunes**

Departamento de Geografia – PUC-Rio

**Prof. Cristiano Saad Travassos do Carmo**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Setembro de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

## **Pedro Rattes Pascoli**

Arquiteto e Urbanista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ e Centro Universitário Metodista Bennett, desde 2013. Especialista em Planejamento e Gestão da Cidade, 2011, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. Certificado como PDC – Permeculture Design Certificate, pelo Permaculture Research Institute e Universidade de Melburn, desde 2010.

### Ficha Catalográfica

Pascoli, Pedro Rattes

Digital Twin no Planejamento e Gestão Urbana: Recurso chave para as atuais demandas climáticas, sociais e tecnológicas. / Pedro Rattes Pascoli; Orientador: Marcelo de Mattos Bezerra – 2024.

110 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2024.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental - Teses. 3. Urban Digital Twin (UDT). 4. Resiliência Climática. 5. Gestão Participativa. 6. Ambiente de Informação Integrada (AII). 7. Inteligência Artificial (IA). I. Bezerra, Marcelo de Mattos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD:624

## **Agradecimentos**

Agradeço a Vida a mim proporcionada pelo meu pai Augusto e especialmente pela minha mãe Adriana. Agradeço suas influências biológicas e as experiências que me permitiram viver.

Agradeço minha família, que na concordância, ou na falta dela, me forneceu um cenário de discussão política e reflexão social que entrelaçaram meu dia a dia e minha carreira; o pensamento da cidade, do espaço antropizado e suas influências sociais e ambientais.

Agradeço imensamente a minha parceira Jessica por ser minha completude em todos os aspectos da vida, mas especialmente por manter a paixão pela discussão e realização acadêmica. Agradeço minha filha Caetana que nasceu no percurso deste mestrado, e contrapondo as fortes demandas, meu deu alegria para a realização e força para conclusão deste ciclo.

Agradeço a professores e colegas que me inspiraram, alimentaram e desafiaram ao longo da vida acadêmica e profissional: Augusto Ivan Pinheiro, Carolina Calvente, Claudia Escarlata, Demetri Anastassakis, Elisa Sesana, Gabriella Zubelli, Leonardo Mesentier, Leonardo Name, Leticia Fonti, Luis Carlos Toledo, Oren Tacher, Pedro Lobão, Petar Vrcibradic, Raul Bueno, Ricardo Esteves, Roberto Ainbinder, Simone Costa, Tatiane Carrer, Vicente Loureiro, e Washington Fajardo. Faço aqui um destaque especial aos amigos e professores que tive o prazer de encontrar nesse mestrado: Anne Aune, Antônio Roberto Barboza, Artur Willcox, Cecilia Herzog, Cícero Lima, Fernando Mac Dowell, Flavia Carvalho, Gabriella Lattari, Jessica Pizzarolo, Luiz Fabbriani, Luiz Claudio Castro, Maria Fernanda Lemos, Rafael Silva Nunes, Rogério Ribeiro de Oliveira, e especialmente meu orientador, Marcelo Mattos Bezerra que sempre mostrou confiança e entusiasmo com o tema proposto e levou o processo com leveza e precisão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001



## Resumo

Pascoli, Pedro Rattes; Bezerra, Marcelo Mattos (Orientador). **O *Digital Twin* no Planejamento e Gestão Urbana: Recurso chave para as atuais demandas climáticas, sociais e tecnológicas.** Rio de Janeiro, 2024. 110p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

A crescente presença da digitalização em todas as áreas de estudo e atuação, é igualmente evidente no Planejamento e Gestão Urbana (PGU). Globalmente, a complexa realidade das cidades atuais, marcada pelo contínuo crescimento populacional urbano e as já correntes consequências das mudanças climáticas, exige uma ampla requalificação urbana. Essa requalificação envolve uma nova gestão de informações, o enfrentamento de questões socialmente sensíveis e realização de intervenções físicas contundentes, cirúrgicas, contextualizadas e de eficácia imediata. Este trabalho explora o potencial protagonismo dos *Digital Twins* (DTs) nesta transformação “digital” das cidades. Através de pesquisa bibliográfica, e consultas a entidades especializadas, foi caracterizado o contexto do PGU, foi realizado um nivelamento conceitual dos DTs, e foram apresentadas as tecnologias envolvidas no seu desenvolvimento e aplicação. Através de estudos de caso, de exemplos notáveis, foi avaliada a aplicação dos DTs como estratégia para enfrentar os desafios identificados. Desta discussão emergiram alguns aspectos aderentes ao PGU atual: acesso intuitivo a informações ricas, precisas e atualizadas; integração tecnológica; gestão transparente e participativa; simulação verossímil de projetos e cenários de emergências climáticas. As conclusões deste trabalho sugerem o desenvolvimento do Ambiente de Informação Integrada (AII), uma plataforma colaborativa e multicamada que permite o acesso e a gestão de múltiplos atores através da integração de dados em uma organização física e ontológica. Essa ferramenta, concentra informação e processos, promove acessibilidade, minimiza os impactos sociais e ambientais, e gera eficiência temporal e de recursos.

## Palavras-chave

*Urban Digital Twin* (UDT); resiliência climática; gestão participativa; Ambiente de Informação Integrada (AII); inteligência artificial (IA);

## Extended Abstract

Pascoli, Pedro Rattes; Bezerra, Marcelo Mattos (Advisor). **The Digital Twin in Urban Planning and Management: A key asset for today's climatic, social and technological demands** Rio de Janeiro, 2024. 110p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The increasing presence of digitalization in all areas of study and work is equally evident in urban planning and management (UPM). Globally, the complex reality of today's cities, marked by continuous urban population growth and the ongoing consequences of climate change, demands extensive urban requalification. This requalification involves managing a vast amount of information, addressing socially sensitive issues, and carrying out forceful, surgical, contextualized, and immediately effective physical interventions. This work explores the potential role of Digital Twins (DTs) in this "digital" transformation of cities. Through bibliographic research and consultations with specialized entities, the context of the PGU was characterized, a conceptual leveling of the DTs was carried out, and the technologies involved in its development and application were presented. By studying notable case examples, the application of DTs as a tool to address the identified challenges was evaluated. Some aspects aligned with current UPM emerged from this discussion: intuitive access to rich, accurate, and up-to-date information; technological integration; transparent and participatory management; realistic simulation of projects and climate emergency scenarios. The conclusions of this work suggest the development of the Integrated Information Environment (IIE), a collaborative and multi-layered platform that allows access and management by multiple actors through data integration in a physical and ontological organization. This tool concentrates information and processes, promotes accessibility, minimizes social and environmental impacts, and generates temporal and resource efficiency.

In the early part of the last century, only 10% of the world's population lived in cities. However, by around 1950, when two-thirds of the global population still resided in rural communities, an increase in urbanization was observed. This process has intensified over the past two decades, and by 2007, we reached a significant milestone: for the first time, the urban population surpassed the rural population (UNITED NATIONS, 2019). With the urban population continuously

growing at a faster rate than the rural population, today approximately 56% of the global population – 4.4 billion people – resides in cities. By the end of the sustainable development agenda in 2030, the proportion of the population living in cities is expected to reach 60%. With projections indicating a continued increase in this percentage in the medium term, by 2050, after just one century of intense and progressive urbanization, the situation will be reversed, with two-thirds of the world's population living in urban areas. This will result in an additional 1.2 million square kilometers of urban area worldwide (THE WORLD BANK, 2020; UNITED NATIONS, 2019).

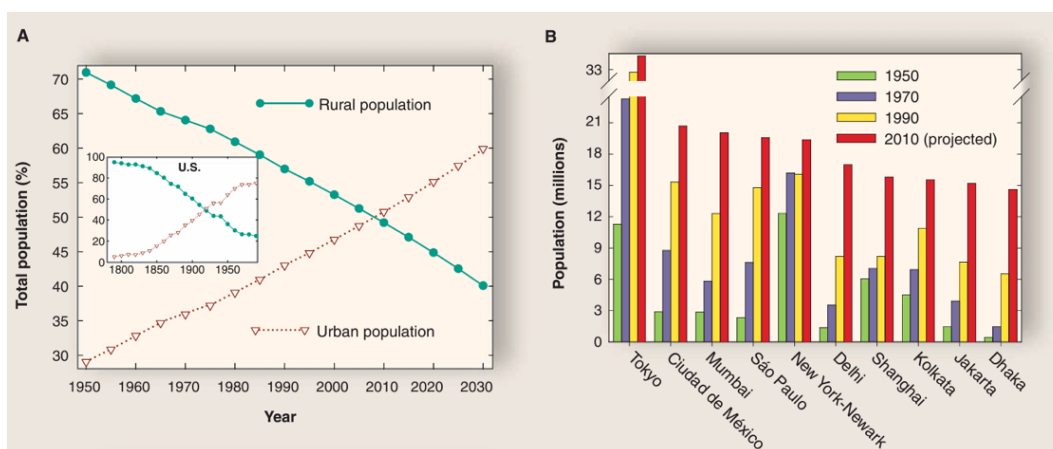


Figure1. A – World urban vs. rural population; B – Population Growth in major cities  
Source: GRIMM et al., 2008.

This data is illustrated above in Figures 1A, which shows the percentage change in the global urban and rural population between 1950 and 2030; and Figure 1B which illustrates the population growth in the 10 largest urban agglomerations between 1950 and 2010 (DESA - UNITED NATIONS, 2006). Between 1990 and 2000, the global urban population increased by 57 million people annually, rising to 77 million per year between 2010 and 2015 (UN-HABITAT, 2018).

Cities are at the forefront of innovation, consumption, and investment in both developed and developing countries, making them crucial for sustainable economic growth and development. They play a key role in addressing 21st-century challenges, including poverty, inequality, unemployment, environmental degradation, and climate change. With their high population density and concentration of investments, cities integrate economic, energy, environmental, scientific, technological, and social aspects of development, which are vital for creating comprehensive policies for sustainable development. Cities have the

potential to promote inclusive development, ensuring that no one and no place is left behind, positioning them as essential to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs).

However, cities also face significant challenges. They do not always perform optimally, and efforts to address urban issues do not always produce the desired outcomes. Often, poor decision-making is a result of inadequate, outdated, or unreliable data. Although cities generate over 80% of the world's GDP and can drive socially and environmentally sustainable development, they are also responsible for two-thirds of global energy consumption and 70% of greenhouse gas emissions. Rapid urban expansion exerts pressure on land use and natural resources (WORLD BANK, 2023).

Reliable data and metrics are essential for achieving the SDGs. Effective systems for data collection, analysis, and sharing enable cities to make informed policy decisions and systematically track progress, fostering urban prosperity and sustainable development for all. Defining what constitutes a city or urban area is crucial for tackling these challenges. Establishing clear guidance on definitions, measurements, and standardized frameworks is necessary to ensure harmonized and comparable data (UN-HABITAT, 2022). These standards should not replace existing administrative and statistical definitions but should adopt practical, cost-effective, and accurate monitoring methods at a supranational level. This approach will enable countries to consistently and comparably measure urban conditions, facilitating data aggregation at regional and global levels and enhancing the monitoring and reporting of SDGs (MOLINA; MOLINA, 2004).

In today's globalized world, the impacts of cities extend beyond political and economic domains to affect environmental conditions as well. Urban sprawl and the emergence of new urban centers mean that cities, regardless of their size, influence the global ecosystem. This interconnected reality necessitates a global perspective in urban planning and development (MOLINA; MOLINA, 2004; PATAKI et al., 2006; SETO; GÜNERALP; HUTYRA, 2012). Grimm et al. aim to illustrate this interdependence in Figure 2 with a diagram demonstrating the urban socio-ecosystem (bottom right corner) as both a driver (upward arrows) and a responder (downward and horizontal arrows) to environmental changes.

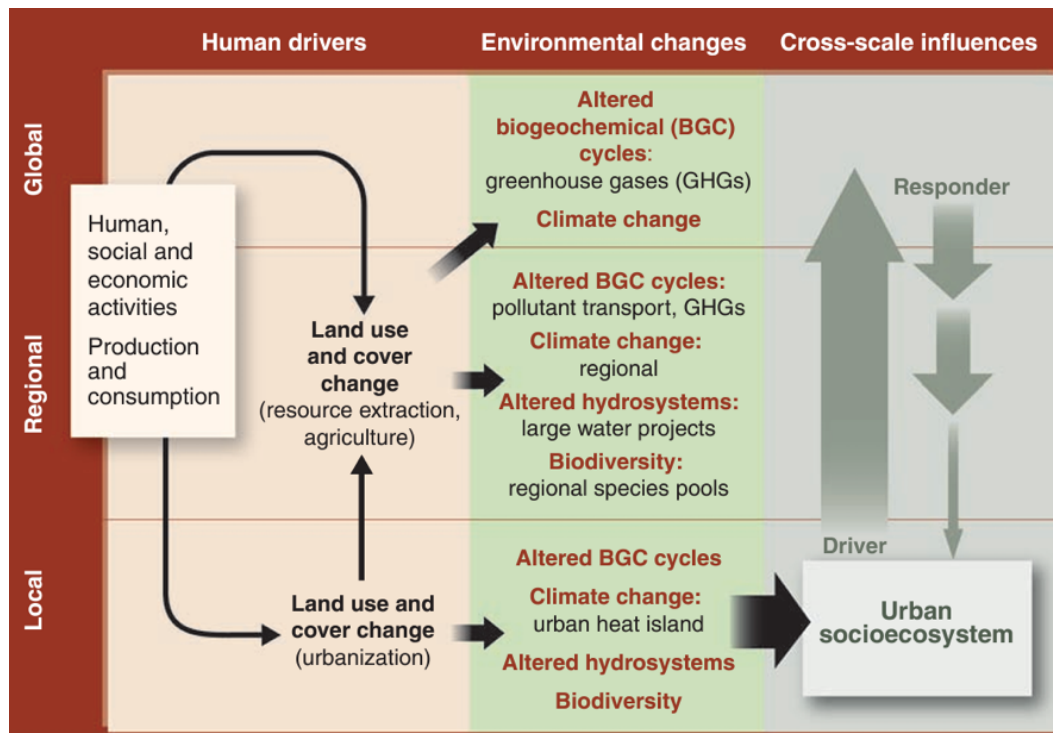


Figure 2. Urban socioecosystem as driver and responder of climate changes  
Credits: GRIMM et al., 2008

To confirm the main challenges of urban planning and management suggested by qualitative consultation with reports from international institutions and related professional representations, a quantitative survey was conducted on the following platforms: "Google Scholar", widely used to find academic articles in various fields of knowledge, yielding 1,840 results; "Science Direct", which provides access to thousands of peer-reviewed journals and books in various scientific areas, yielding 3,004 results; and "IEEE Xplore", focusing on engineering, technology, and computer science, yielding 1,054 results. The searches were conducted using the keywords: Urban Planning Challenges, all present in the title or abstract. The period selected (2014-2024) is aligned with the technological maturity and disseminated applications of the DTs (FULLER et al., 2020; TAO et al., 2019). The results of these surveys are described in percentage and numbers in Figure 3 and Table 1 respectively.

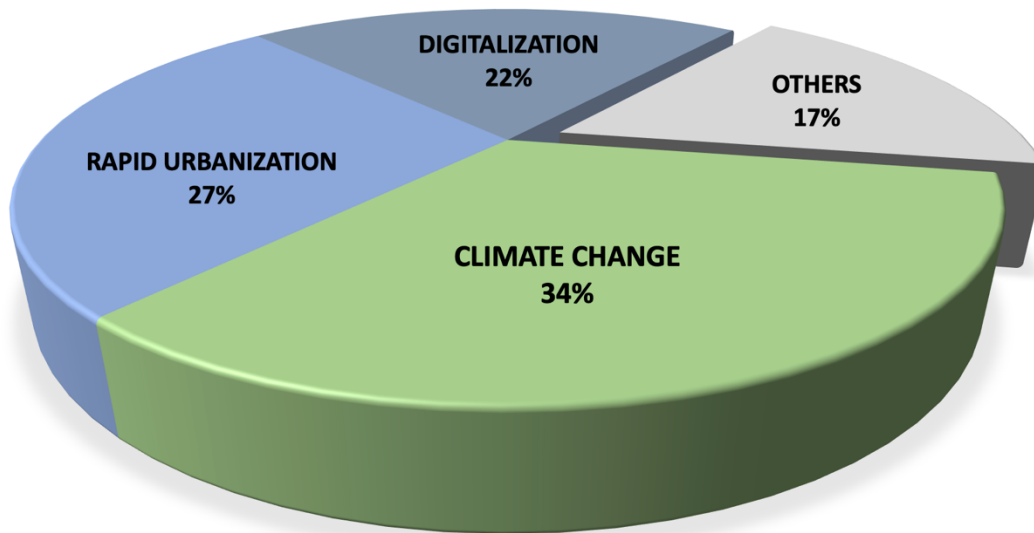


Figure 3. Categorization of Articles containing: *Urban Planning Challenges* (2014-2024)  
Credits: Developed by the Author

The literature review confirmed, as shown in Figure 4, the significant challenges facing urban planning. Climate change is a central theme in 34% of the publications, 27% are related to rapid urbanization, and digitalization is addressed in 22% of the studies, while all other topics combined account for only 17%.

Table 1. Articles on Urban Planning Challenges (2014-2024)

Urban Planning Challenges 5895	CLIMATE CHANGE 1864	Climate change resilience	293	DIGITALIZATION 1234	Collaborative Planning & Management	379
		Green infrastructure	232		Modeling & Predictive analytics	183
		Sustainable planning & ISUDUS/SDG	220		Digital universalism	134
		Energy efficiency & renewable energy	159		Data & Decision Making	111
		Urban crops and livestock	147		Smart City, ICT & IOT	97
		NBS & Biophilic Urbanism	111		AI & Generative tools	89
		Urban ecosystem services	108		Other related subjects	241
		Sustainable & active mobility	97	OTHERS 965	Lit review & discussions on planning challenges	269
		Urban water systems management	91		Planning concepts	171
		Territorial planning & ecosystems preservation	90		Pandemic / post pandemic	73
		Other related subjects	316		Urban health	49
	RAPID URBANIZATION 1502	Peri-urbanization & urbansprawl	232		City branding & tourism	25
		Transport Impact assessment & TOD	134		Cultural heritage & Planning	23
		Territorial & land use management	147		Decolonizing curriculum	7
		Housing	99		Gender responsive planning	5
		Outdated legislation & policy	97		Other unrelated subjects	343
		Planning as general addressment	97	<b>Classified Total</b>		<b>5565</b>
		Rezoning neighborhood retrofitting	96	EXCLUDED 330	Undefined or not accessible	148
		Informal Settlements	93		Not subject related	79
		Other related subjects	507		Repeated	103

Table 1 shows that specific topics such as Climatic Resilience, Green Infrastructure, ISUDUS/SDG, and Energy Efficiency under Climate Change; Peri-urbanization, Mobility, Land Management, and Housing under Rapid Urbanization; and Predictive Analysis, Digital Universalism, and Smart Cities under Digitalization met expectations. However, it is noteworthy that despite the anticipated mention of Collaborative Planning and Management, the topic stood

out prominently, being cited more than 100% more frequently than Predictive Modeling and Analysis (the second most cited under digitalization) and 30% more than Resilience to Climate Change, the second most cited theme overall.

Cities around the world are adopting digital technology for all different matters, in first hand because it is needed, in order to keep up with the growing volume and complexity of information, but also and specially because they are now able with the availability of such tools. The gathering of data has reached unprecedented levels, and a demand for accessibility and specially the management of this information comes parallel. DTs have become increasingly relevant in the field of urban planning and management due to their potential to transform the way cities are designed, monitored, and enhancing the efficiency and effectiveness of various processes. A DT is a virtual representation of a physical object, system, or process. In the context of urban planning and management, a DT represents an entire city or specific aspects of it, such as infrastructure, buildings, transportation networks, utilities, and environmental conditions. DTs play a crucial role in urban planning and management, offering numerous benefits (HURTADO; GOMEZ, 2021). Some of the key ways DTs are relevant in the context of urban planning and management are:

Data-driven decision-making: DTs create virtual replicas of real-world cities, gathering and integrating real-time data from various sources including sensors, Internet of Things (IoT) devices, satellite imagery, periodic surveys, and other urban existing infrastructure. This data-driven approach combined with advanced analytics and simulations enables urban planners and administrators to make informed decisions based on real-time and historical data, improving the accuracy and effectiveness of their strategies, optimizing city operations, improving services, and addressing challenges effectively (BATTY, 2018a).

Smart city implementation: DTs form the backbone of smart city initiatives. By integrating data from various smart systems, such as smart transportation, energy management, and public safety, DTs enable cities to optimize resource utilization, enhance public services, and create a more livable urban environment (WEIL et al., 2023).

Enhanced urban design and simulations: DTs allow urban planners to visualize, model and simulate various scenarios in the city, assess the potential impacts of their decisions on traffic flow, energy consumption, infrastructure

development, and other aspects before implementing physical changes, leading to more optimized and sustainable urban plans. By testing these scenarios virtually, planners can identify potential issues, evaluate the impact of different decisions, and create more efficient and sustainable city layouts (XIA et al., 2022).

Smart infrastructure management: DTs enable the monitoring of the condition of their infrastructure and assets in real-time allowing the anticipation and predictability on maintenance, repair and update. By using predictive analytics, city managers can proactively identify potential failures or inefficiencies in infrastructure, such as bridges, roads, water supply systems, and power grids, allowing them to proactively optimize the lifespan, address problems and reduce downtime and overall maintenance costs (FULLER et al., 2020).

Resilience and disaster management: DTs allow cities to simulate and prepare for potential natural disasters and emergencies. By simulating disaster scenarios, cities can identify vulnerable areas, develop emergency response plans, and implement measures to enhance overall resilience against natural calamities and other threats. By understanding the impact of such events beforehand, urban planners can develop more robust disaster response plans and build resilient infrastructures. As efficient for the simulations with the current city, answering measures, interventions and new design can very accurately been put to test. This is especially effective with the growing use of nature-based solutions witch act dually both in resilience to climatic emergencies and in immediate climate and natural environment enhancement (TAO et al., 2019).

Energy efficiency and environmental sustainability: DTs aid in developing sustainable urban environments by providing insights into energy consumption patterns, waste management, emissions and environmental impacts. This data-driven understanding can identify opportunities to enhance energy efficiency allows for the implementation of eco-friendly initiatives and urban policies that reduce carbon footprints and support sustainable growth by measuring their effectiveness through continuous monitoring (BOJE et al., 2020).

Citizen engagement and collaboration: DTs can be used as a communication tool to engage citizens in the planning and decision-making in urban planning processes. By offering interactive, accessible representations of the city's development plans, residents can visualize and better understand proposed changes and provide valuable feedback. This interaction allows urban planners to



create more inclusive and community-driven projects, leading to increased satisfaction and acceptance of urban development plans (DEMBSKI et al., 2020; WHITE et al., 2021).

Long-term planning and scalability: DTs provide a platform for long-term urban planning and growth. As cities evolve and expand, DTs can adapt to include new developments, ensuring that urban planning remains effective and responsive to changing needs. The environmental, and logistics models for example, can be easily run on possible future urban scenarios, supporting or guiding a change in the direction of on-going developments (KETZLER et al., 2020).

Urban mobility optimization: With the help of DTs, cities can model and analyze traffic patterns, public transportation usage, and pedestrian movement. This insight allows for the optimization of transportation networks, by predicting congestion points, and analyzing the impact of new transportation projects. This information can help optimize traffic flow, improve accessibility, reduce congestion, and improve overall transportation efficiency within the city (YEON et al., 2023).

In summary, DTs combine holistic and data-driven approach to urban planning and management, offering a powerful and versatile toolset that can revolutionize the way urban planning and management are carried out. By harnessing the power of advanced technologies and real-time data, simulations, and predictive analytics, cities can become more efficient, resilient, and sustainable, ultimately enhancing the overall quality of life for their residents.

It is not until very recently that the concept of DT came to the fore and gained momentum in the urban context. This is owing to its innovative potential to transform how the physical systems of smart cities can be managed and planned to improve their environmental performance. A smart city is a place where traditional networks and services are made more efficient with the use of digital solutions for the benefit of its inhabitants, environment and business (EUROPEAN COMMISSION, 2024). DT can be defined as “a virtual representation of a physical system (and its associated environment and processes) that is updated through the exchange of information between the physical and virtual systems” (VANDERHORN; MAHADEVAN, 2021). Or as defined by ISO 23247-1:2021: a data element representing a set of properties of an observable manufacturing element with synchronization between the element and its digital

representation. Further, the recent expansion of UDT is attributed to the knowledge gained from the development of smart cities (FERRÉ-BIGORRA; CASALS; GANGOLELLS, 2022). These are one the industries that have witnessed a recent surge in integrating the concept of DT (BOTÍN-SANABRIA et al., 2022). UDT is being globally deployed in smart cities and becoming a rich source of information on their physical systems (RUOHOMAKI et al., 2018) and the building blocks of their spatial forms. Most of these systems have already been modeled by the existing UDTs, particularly in the field of environmental sustainability. They indeed pertain to power grid, energy demand, renewable energy, mobility, public transportation, road infrastructure, water supply, sewage, noise pollution, flooding, and climatology (RUOHOMAKI et al., 2018; SCHROTTER; HÜRZELER, 2020). Further, UDT has been progressing and expanding in parallel with Artificial Intelligence (AI), IoT and Big Data (BD) in smart cities with respect to environmental sustainability (BIBRI et al., 2023; GOURISARIA et al., 2023; SHRUTI et al., 2022). UDT can transform the way smart cities can be modeled with respect to their physical systems in relation to environmental sustainability (FERRÉ-BIGORRA; CASALS; GANGOLELLS, 2022). As an integrated approach, an UDT plays a role in data-based management and environmental sustainability endeavors (PARK et al., 2019) while relying on AI, IoT, BD, and edge computing for data collection and processing (DEREN; WENBO; ZHENFENG, 2021).

As an outcome of this work, we propose the development of the Integrated Information Environment (IIE), a multisource and multilayer databank that would agglutinate and make available unlimited and multispectral information.

## **Keywords**

Urban Digital Twin (UDT); climate resilience; participatory management; Integrated Information Environment (IIE); artificial intelligence (AI)

## Sumário

1	Introdução	18
1.1	Por que Digital Twins e, por que agora?	22
1.2	Objetivos	23
1.3	Metodologias aplicadas e estrutura do trabalho	23
2	O que é um digital twin?	26
2.1	Definindo o Digital Twin	27
2.2	Diferentes áreas e aplicações dos Digital Twins	32
3	Desafios do planejamento e gestão urbana	36
3.1	Urbanização acelerada e crescimento populacional	40
3.2	Extremização climática e as cidades	43
3.3	Digitalização e transformação digital	46
4	O twin urbano	49
4.1	Tecnologias associadas	50
4.2	Potenciais do Digital Twin Urbano	62
4.3	Desafios para aplicação dos dts no PGU	69
5	Digital twins na prática	71
5.1	<i>Smart City Zurich</i> – Construindo um Digital Twin Urbano	72
5.2	Amsterdã e Milão – Gestão compartilhada	82
5.3	Rocinha – Conhecendo o não projetado	87
6	Conclusão	97
7	Referências bibliográficas	100

## Lista de figuras

Figura 1. A) População urbana/rural; B) Crescimento populacional.	19
Figura 2. Sócio-ecossistema urbano e mudanças ambientais.	21
Figura 3. Estrutura do trabalho	24
Figura 4. Modelo conceitual ideal para PLM.	26
Figura 5. Características mínimas de um Digital Twin	28
Figura 6. Características e recursos de um Digital Twin não específico.	29
Figura 7. Diagrama Descritivo de Sistemas Cyber-físicos	30
Figura 8. Diferenciando o Digital Twin.	31
Figura 9. Indústria Aeroespacial - DT+ Realidade aumentada	33
Figura 10. DT para monitoramento e gestão remota	33
Figura 11. Infográfico DT Logística	34
Figura 12. DT 5D Camadas não físicas	35
Figura 13. Macro temáticas dos desafios do PGU, 2014-2024.	38
Figura 14. Principais desafios e demandas atuais do PGU.	40
Figura 15. Aumento de Desastres Naturais 4 décadas.	44
Figura 15. Características (Layers) de um UDT	49
Figura 17. A) Pegasus TRK700 Evo e B) CityMapper-2.	54
Figura 18. Mesh 3D processada por ArcGIS Reality	55
Figura 19. Interface Autodesk Revit	56
Figura 20. Metadados em plataforma GIS.	57
Figura 21. Rede Neural Simples em TensorFlow	59
Figura 22. Interface Unity 3D.	60
Figura 23. Infográfico Plataformas de Nuvem	61
Figura 24. Estrutura de desenvolvimento de integração GIS e BIM.	68
Figura 25. Distribuição global dos DTs analisados	72
Figura 26. Interface Zürich Virtuall	73
Figura 27. Interface Zürich 4D.	74
Figura 28. Street Space 3D; cobertura, visualização e metadados	76
Figura 29. LoRa network – Imagem ilustrativa da rede LoRa	79
Figura 30. EnerGIS – modos de aquecimento disponíveis	81

Figura 31. EnerGIS – modo de aquecimento instalado	81
Figura 32. Projetos realizados por <i>crowdfunding</i> em Amsterdam 2018	85
Figura 33. Favela da Rocinha.	87
Figura 34. População em assentamentos informais.	88
Figura 35. Mapa da rede de ruas da Rocinha.	93
Figura 36. Reconstrução 3D texturizada e colorizada.	94
Figura 37. Representação tridimensional de cada cena de rua.	95
Figura 38. Resultados da análise local para cada cena de rua.	96
Figura 39. Principais recursos dos Urban Digital Twins	97
Figura 40. Esquema de Composição do All	99

## Lista de quadros

Quadro 1. Categorização Artigos Contendo: <i>Urban Planning Challenges</i>	54
Quadro 2. Desastres Naturais no mundo em 15 anos	59
Quadro 3. Hardware Utilizados na Digitalização de sistemas físicos	35

## 1 Introdução

No início do século XX, apenas 10% da população mundial vivia em cidades. No entanto, por volta de 1950, quando dois terços da população mundial ainda viviam em comunidades rurais, observou-se uma escalada na urbanização. Esse processo se acentuou nas últimas duas décadas e, ainda em 2007, atingindo um marco, a população nas cidades pela primeira vez superava a rural (UNITED NATIONS, 2019). Nos últimos 65 anos, houve uma notável mudança populacional das áreas rurais para as urbanas, com a população urbana global aumentando de 29,6% em 1950, para 54% em 2015. Entre 1990 e 2000, a população urbana global aumentou em 57 milhões de pessoas anualmente, subindo para 77 milhões por ano entre 2010 e 2015. Com a população urbana continuamente crescendo de forma mais acelerada que a rural, em 2024, cerca de 56% da população mundial - 4,4 bilhões de habitantes - vive em cidades. Ao fim da agenda para desenvolvimento sustentável em 2030, a parcela da população vivendo em cidades deve chegar a 60%. Com previsões de uma continua escalada deste percentual a médio prazo, em 2050, após apenas 1 século de intensa e progressiva urbanização, o quadro se inverterá com dois terços da população mundial ocupando áreas urbanas. Isto resultará em um acréscimo de 1,2 milhão de quilômetros quadrados de área urbana em todo o mundo (THE WORLD BANK, 2020; UNITED NATIONS, 2019).

Podemos observar esses dados ilustrados nas Figuras: 1A, que mostra percentualmente a mudança na população mundial urbana e rural entre 1950 e 2030 (DESA - UNITED NATIONS, 2006). No inciso é feito um destaque comparativo para os EUA de 1790 a 1990 (U.S. CENSUS BUREAU, 2007), exemplificando como a população urbana já superava a rural em países mais desenvolvidos, quase um século antes, em torno de 1920. Na Figura 1B, está ilustrado o crescimento populacional nas 10 maiores aglomerações urbanas entre 1950 e 2010, (DESA - UNITED NATIONS, 2006).

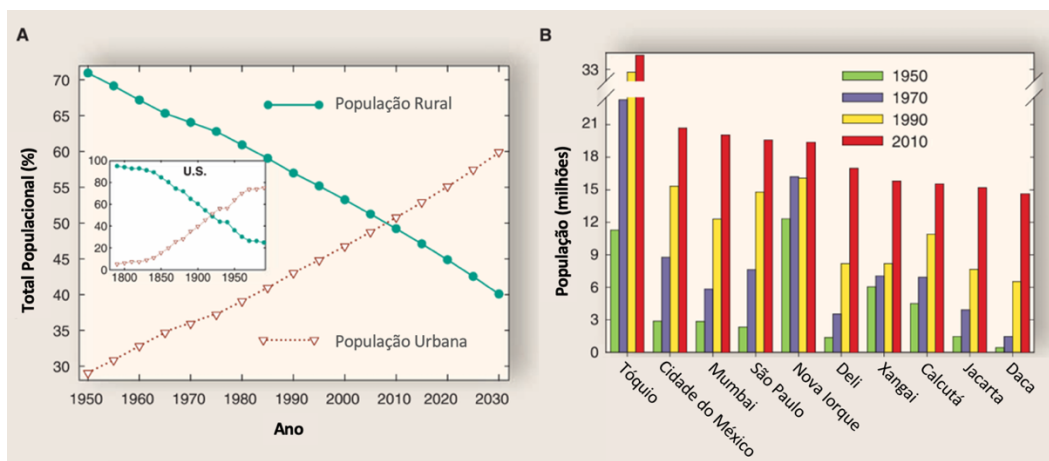


Figura 1. A) População urbana/rural; B) Crescimento populacional.  
Fonte: GRIMM et al., 2008.

As cidades, um dos fenômenos mais significativos do século XXI, evoluíram e se diversificaram em tamanho, forma, estrutura e composição, mantendo sua importância no desenvolvimento local e regional. Uma incrível invenção humana e, embora ofereçam soluções para muitos desafios da sociedade, também geram novos problemas desde suas primeiras manifestações. As cidades impulsionam a inovação, o consumo e o investimento, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, tornando-se fundamentais para o crescimento econômico sustentável e o desenvolvimento. As cidades são essenciais para enfrentar os desafios do século XXI, como pobreza, desigualdade, desemprego, degradação ambiental e mudanças climáticas. Devido à densidade populacional e à concentração de investimentos, as cidades integram elementos econômicos, energéticos, ambientais, científicos, tecnológicos e sociais, fundamentais para a formulação de políticas integradas de desenvolvimento sustentável. Com mais de 80% do PIB mundial sendo gerado nas cidades, a urbanização, quando bem administrada, pode contribuir para um desenvolvimento social e ambientalmente sustentável. As cidades podem promover um desenvolvimento inclusivo, garantindo que ninguém e nenhum lugar fiquem para trás, tornando-as chave para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018).

No entanto, as cidades também enfrentam desafios significativos. É necessário observar que já representam dois terços do consumo global de energia e são responsáveis pela emissão de 70% dos gases de efeito estufa. Além disso, a rápida expansão urbana tem exercido considerável pressão sobre o uso do solo e dos recursos naturais (WORLD BANK, 2023). As cidades nem sempre têm um

bom desempenho, e as ações para resolver problemas urbanos nem sempre produzem os resultados desejados. Frequentemente, a falta de dados confiáveis e atualizados resulta em más tomada de decisões (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018).

A globalização impacta não apenas os cenários políticos e econômicos, mas também as condições ambientais. A expansão urbana e o crescimento de novos centros urbanos significam que, qualquer cidade, independentemente do tamanho, influencia o ecossistema global. Essa realidade interconectada exige uma perspectiva global no planejamento e desenvolvimento urbanos. Seus impactos positivos e negativos historicamente têm abrangência local ou até regional dependendo de sua escala, no entanto, atualmente, vive-se uma realidade substancialmente mais complexa. A globalização não se resume mais aos cenários políticos e econômicos. Para além da comunidade científica, no presente, é indiscutível uma unidade climática global. Com o espraiamento urbano, o crescente número de novos núcleos e das dimensões das aglomerações humanas, qualquer cidade exerce influência em alguma escala como parte de um organismo global. Cada vez se tem mais consciência da contribuição das cidades e atividades urbanas para as mudanças climáticas, assim como a sua vulnerabilidade aos impactos dessas mudanças, incluindo aumento do nível do mar, eventos climáticos extremos e ondas de calor (MOLINA; MOLINA, 2004; PATAKI et al., 2006; SETO; GÜNERALP; HUTYRA, 2012). Grimm *et al.* (2018) buscam ilustrar esta interdependência na Figura 2, com um esquema demonstrando o socioecossistema urbano como impulsionador e respondente às mudanças ambientais. A mudança de uso do solo para construir cidades e sustentar suas populações, impulsiona alterações locais a globais nos ciclos biogeoquímicos, clima, hidrossistemas e biodiversidade. Grandes mudanças ambientais locais são mais impactantes do que aquelas que derivam das mudanças ambientais globais.



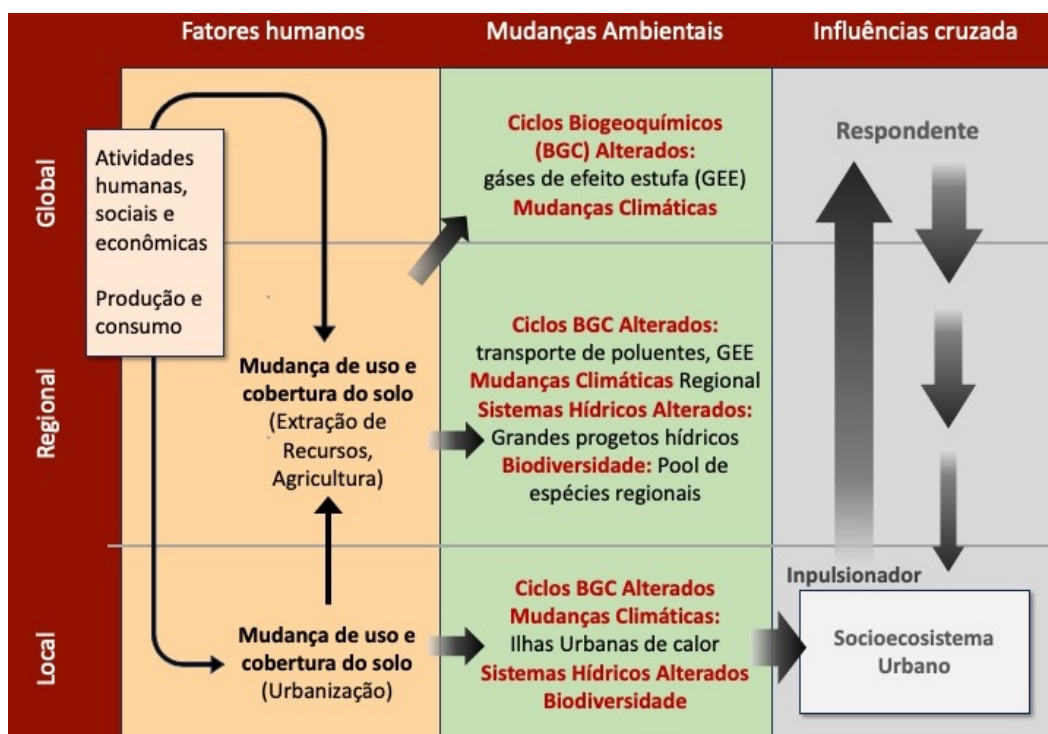


Figura 2. Sócio-ecossistema urbano e mudanças ambientais.  
Fonte: GRIMMet al., 2008.

Dados e métricas confiáveis são essenciais para alcançar os ODS. Sistemas eficazes de coleta, análise e compartilhamento de dados permitem que as cidades tomem decisões políticas informadas e acompanhem o progresso de forma sistemática, promovendo a prosperidade urbana e o desenvolvimento sustentável para todos. Definir o que constitui uma cidade ou área urbana é crucial para enfrentar esses desafios. Estabelecer orientações concretas sobre definições, medições e padrões unificados é necessário para garantir dados harmonizados e comparáveis. Esses padrões não devem alterar as definições administrativas e estatísticas existentes, mas adotar métodos de monitoramento pragmáticos, econômicos e precisos, em nível supranacional. Essa abordagem permitirá que os países meçam as condições urbanas de maneira consistente e comparável, facilitando a agregação de dados em níveis regionais e globais, e melhorando o monitoramento e o relatório dos ODS (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018).

Embora o grau de urbanização e capacidade de investimento variem entre os países, o planejamento urbano e a renovação urbana ainda podem ser sincronizados, conforme implícito no conceito de cidades inteligentes. Uma cidade inteligente integra tecnologia digital e soluções baseadas em dados para aumentar a eficiência dos serviços urbanos, melhorar a qualidade de vida e

promover a sustentabilidade. Ela utiliza *Internet of Things* (IoT), big data e inteligência artificial (IA) para otimizar a infraestrutura, a governança, e os serviços públicos (CARAGLIU; DEL BO; NIJKAMP, 2011; HOLLANDS, 2008). A tecnologia digital é considerada a chave para resolver problemas de urbanização e, as cidades inteligentes, que proporcionam um conceito inovador de desenvolvimento urbano, são cruciais para garantir a gestão científica e o desenvolvimento urbano sustentável (CAMERO; ALBA, 2019). Elas representam um produto da profunda integração de aplicações inovadoras de tecnologia da informação, de nova geração e desenvolvimento econômico e social urbano.

As particularidades de cada cidade ou região, são indiscutíveis, mas a interconectividade entre eventos em todo o globo ou entre diferentes atores sociais em uma mesma cidade, é evidente. Urbanistas, formuladores de políticas e a sociedade civil, devem trabalhar juntos para enfrentar esses desafios e criar cidades sustentáveis, inclusivas e resilientes para o futuro. Os desafios e suas soluções são particulares e, portanto, devem ser contextualizadas, atualizadas e especialmente dinâmicas, eficientes e contundentes (BULKELEY; TUTS, 2013).

Diante disto, este trabalho não se propôs a apresentar ou discutir quaisquer soluções, mas a verificar a potencialidade do Digital Twin<sup>1</sup> (DT) como um recurso, uma plataforma, ou um conjunto de ferramentas integradas que possa, independentemente do contexto específico, fundamentar as tomadas de decisão e, portanto, contribuir significativamente para a eficiência e assertividade nas várias disciplinas que permeiam o planejamento e a gestão urbana.

### **1.1 Por que Digital Twins e, por que agora?**

O conceito de DTs, embora não seja novo, tornou-se cada vez mais relevante no contexto atual de Planejamento e Gestão Urbana (PGU) devido aos impactos inegáveis das cidades nas mudanças climáticas, e vice-versa. À medida que as cidades continuam a se expandir e os riscos relacionados ao clima aumentam, urbanistas e governos precisam empregar ferramentas avançadas para modelar, prever e mitigar esses impactos. Os DTs oferecem um método dinâmico e robusto para simular esses impactos e facilitar decisões de planejamento

---

<sup>1</sup> ISO 23247-1: Elemento de dados que representa um conjunto de propriedades de um elemento físico com sincronização entre o elemento e sua representação digital.

informadas. As tecnologias que sustentam os DTs, como a IoT, *Reality Capture*, IA, *Machine Learning* e análise de big data, amadureceram significativamente. Além disso, a integração de Sistemas de Informação Geográfica (*Geographic Information System* – GIS) e Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM), aprimoraram a capacidade dos DTs de fornecerem uma representação abrangente e precisa dos ambientes urbanos, apoiando práticas de planejamento urbano mais eficazes e sustentáveis. Ademais, o advento da computação de alto desempenho e dos serviços de nuvem, tornou viável a execução de simulações complexas em escalas antes inatingíveis.

A combinação de urgência climática, prontidão tecnológica e a crescente complexidade dos ambientes urbanos, torna o uso de DTs uma estratégia poderosa para adereçar os desafios que as cidades enfrentam atualmente. À medida que nos esforçamos para criar cidades mais sustentáveis, resilientes e habitáveis, a adoção de DTs não é apenas benéfica, mas necessária para promover tomada de decisões fundamentadas e ações proativas.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a relevância e eficácia dos DTs como ferramenta facilitadora no planejamento e gestão urbana, frente as problemáticas apresentadas pelo atual contexto climático, tecnológico e social.

Especificamente, este trabalho se propõe a:

- Definir o atual contexto do planejamento e gestão urbana,
- Nivelar o conhecimento sobre os conceitos fundamentais dos DTs,
- Apresentar as tecnologias envolvidas no desenvolvimento e gestão dos DTs,
- Avaliar a performance de DTs referência e seus subprodutos em aplicação,
- Verificar a viabilidade técnica e econômica da aplicação dos DTs no PGU,
- Avaliar os DTs como recurso integrador de tecnologias atuais e emergentes,
- Verificar a possibilidade de os DTs estruturarem uma plataforma de acesso universal a informação rica, atualizada e multicamada.

## **1.3 Metodologias aplicadas e estrutura do trabalho**

Este trabalho tem caráter exploratório e propositivo no campo do planejamento e da gestão urbana. No seu desenvolvimento, foram realizadas revisões bibliográficas com análises quantitativa e qualitativa para caracterização do atual contexto do planejamento e da gestão urbana, definição conceitual e caracterização tecnológica dos DTs. Também foram realizados estudos de casos

para aprofundar o entendimento e avaliar o emprego de diferentes recursos dos DTs.

Esta dissertação está estruturada em seis seções como demonstrado na Figura 3.

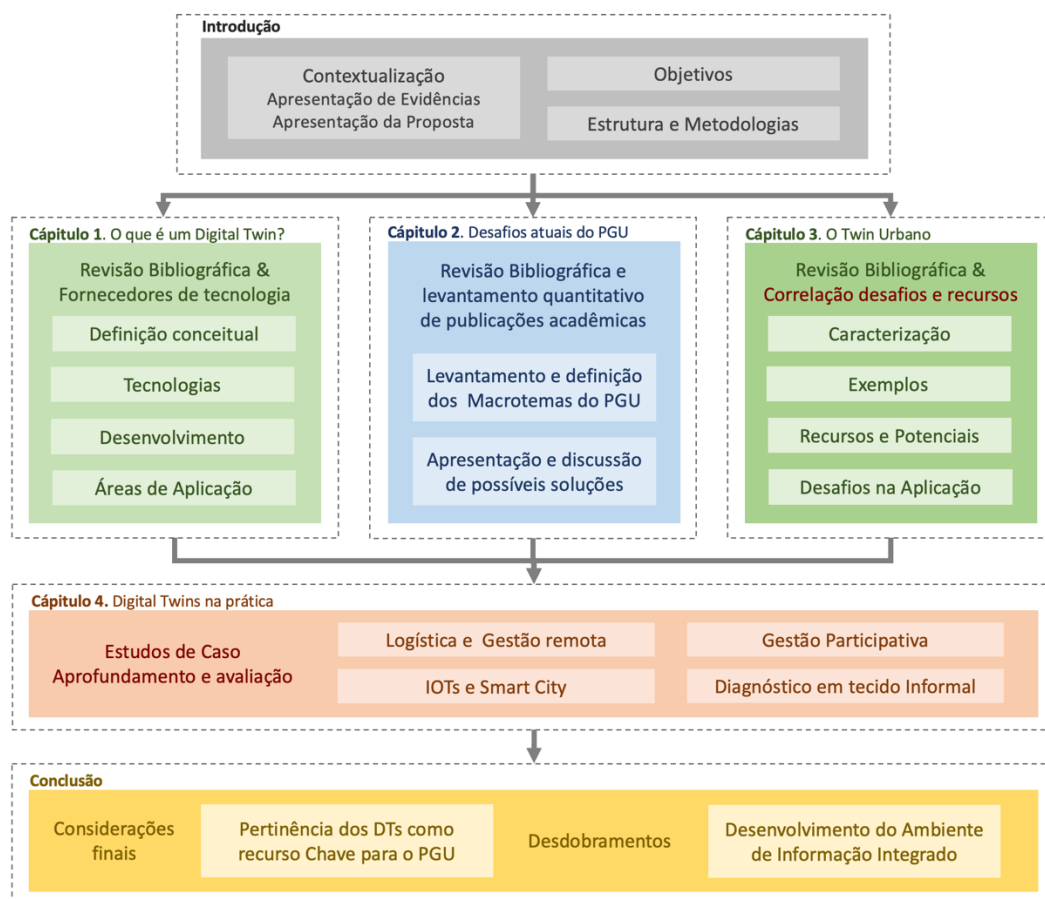


Figura 3. Estrutura do trabalho

Fonte: Elaboração própria

A introdução apresenta um enquadramento geral e atual do PGU, construindo a justificativa para este estudo. Em seguida, é introduzido o tema central do trabalho. Também são descritos os objetivos, as metodologias e a organização estrutural da dissertação.

Assumindo que profissionais de diversas áreas de formação estão envolvidos no PGU, é razoável considerar que os DTs não são de conhecimento comum. Desta forma, o capítulo 1 se dedica a um nivelamento conceitual e técnico. Foi conduzido um levantamento bibliográfico para reunir definições e conceitos fundamentais de um DT, com o objetivo de o diferenciar de outras representações digitais, bem como apresentar algumas de suas áreas de aplicação.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica realizada com o objetivo de, por meio de um levantamento quantitativo, confirmar as principais problemáticas do atual contexto do PGU. A partir desta definição, com a contribuição de publicações acadêmicas, entidades profissionais representativas e instituições internacionais de atuação reconhecida, os temas são aprofundados e possíveis soluções apontadas.

O terceiro capítulo, através de um levantamento da literatura mais específico, traz a caracterização do *Urban Digital Twin* (UDT), apresenta as tecnologias – equipamentos e softwares – utilizadas nas etapas de aquisição, desenvolvimento e gestão. Este capítulo traz ainda um contraponto entre recursos e desafios inerentes à sua aplicação.

Com o cenário e a proposta esclarecidos, no capítulo 4, são apresentados estudos de caso realizados sobre UDTs relevantes e ilustrativos, com tecnologias e serviços que sustentam o endereçamento eficiente das problemáticas do atual contexto do PGU, apontadas anteriormente nesta dissertação. Para estruturar esta argumentação, foi realizada uma subdivisão temática: cidades inteligentes e IoT; gestão participativa e transparência; e sensoriamento e diagnóstico em contexto heterogêneo. Na conclusão, são apresentadas considerações finais e, avaliada a viabilidade e relevância dos DTs no PGU assim como a adoção, por parte das autoridades gestoras, do Ambiente de Informação Integrada (AII).

## 2 O que é um Digital Twin?

O Gêmeo Digital, ou Digital Twin (DT)<sup>2</sup>, é mais do que uma simples representação digital; trata-se, de fato, da réplica mais fiel possível de um objeto, espaço, sistema ou processo físico de referência. Podemos afirmar que é um fenômeno resultante da evolução teórica e tecnológica, em resposta às demandas gerenciais e projetuais da última década. O conceito, apesar de apresentado inicialmente com outra terminologia, foi primeiramente descrito em dezembro de 2002 por Michael Grieves da University of Michigan, em uma apresentação para indústria. Na Figura 4, vemos a ilustração denominada “modelo conceitual ideal para gerenciamento do ciclo de vida do produto” ou, do original em inglês *Product Lifecycle Management (PLM)*, extraída desta apresentação.

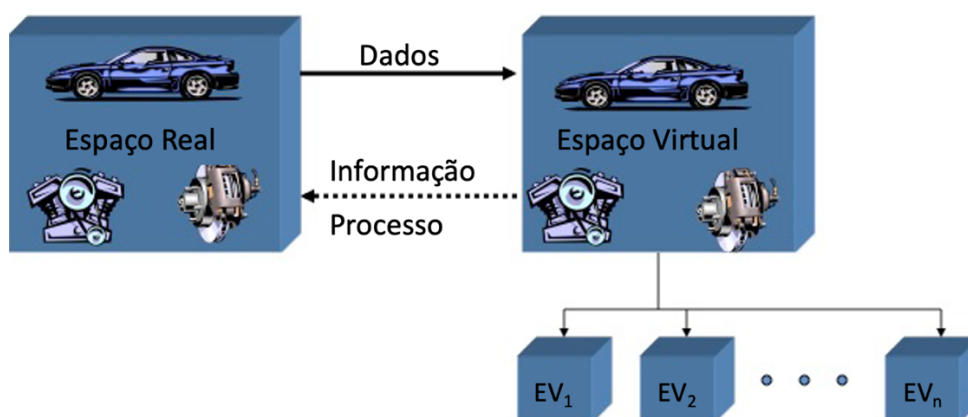


Figura 4. Modelo conceitual ideal para PLM.  
Fonte: GRIEVES, 2002.

O PLM tratava-se apenas de um diagrama, mas que já apresentava alguns dos principais conceitos aceitos ainda atualmente, sendo eles: o objeto físico (OF) e o objeto virtual (OV), a alimentação ou fluxo de dados para o OV a partir do OF, e o fluxo de informações do OV para o OF e sub espaços virtuais (GRIEVES, 2002). Desde então, os conceitos e suas tecnologias associadas evoluíram significativamente.

---

<sup>2</sup> Como é amplamente referido na academia e nas indústrias como uma nomenclatura estabelecida em seu idioma original, o inglês, continuará sendo assim mencionado neste trabalho.

## 2.1 Definindo o Digital Twin

A fundamentação deste modelo é que cada sistema consiste de dois sistemas, o sistema existente físico e um novo sistema virtual que contém “todas” as informações do sistema físico, resultando, então, em um espelhamento ou geminização dos sistemas virtuais com o que existe no espaço ou meio real, e vice versa (GRIEVES; VICKERS, 2017). A ideia central, então, é a coexistência e retroalimentação de objetos, ambientes ou espaços físicos e seus respectivos virtuais, de maneira continuada e bidirecional. Diferente de outros modelos digitais, o DT não é uma representação estática, momentânea, um retrato atrelado a um dado momento, mas sim uma contínua correlação e atualização sistemática ao longo do ciclo de vida de um produto. Desta forma, por mais complexo, detalhado e rico de informação, um modelo digital só pode ser considerado um DT, se houver um par físico ou real (SEGOVIA; GARCIA-ALFARO, 2022).

Apesar do conceito base já estabelecido, o termo referência foi amadurecendo junto com o avanço de estudos e aplicações na área. Alguns anos depois, o DT foi definido como *Mirrored Spaces Model* (GRIEVES, 2005), no ano seguinte sendo referido como *Information Mirroring Model* (GRIEVES, 2006). Somente em 2011, no livro chamado *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*, o conceito se expandiu significativamente e, mesmo se usando ainda o termo *Information Mirroring Model*, vemos a primeira menção do termo DT sendo anexada ao conceito, com o coautor Jhon Vickers se referindo desta maneira ao modelo (GRIEVES, 2011).

Devido ao sucesso descritivo, DT passa a ser o termo oficialmente usado para referência do conceito. A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), passa a adotar o termo em seus manuais e protocolos, dando publicidade e credibilidade global ao conceito (PIASCIK e.t. al, 2010; ERIC e.t. al, 2011; GLAESSGEN & STARGEL, 2012).

Esse conceito foi se atualizando, complexificando, ou mesmo se simplificando, de acordo com o objeto referência ou a indústria em questão. Com o avanço tecnológico universalizado, os DTs tendem a apresentar informações com precisão e complexidade igual ou superior ao gêmeo físico. Seguindo o conceito *up to date*, os DTs tornam possível o acesso à informações e

consecutivas análises, que não são viáveis e possíveis no OF. Inicialmente, a totalidade de informações no ambiente digital era utópica, porém, atualmente, começa-se a observar uma inversão nessa relação. Com frequência, os DTs podem apresentar ou dar acesso à informações além das contidas ou não acessíveis no ente original (SEGOVIA; GARCIA-ALFARO, 2022). Apesar de normatizado (ISO 23247-1:2021), a descrição ou definição do DT pode variar de acordo com a indústria, ou mesmo de acordo com o especialista que o refere. No entanto, é possível ilustrar conceitos básicos (Figura 5).

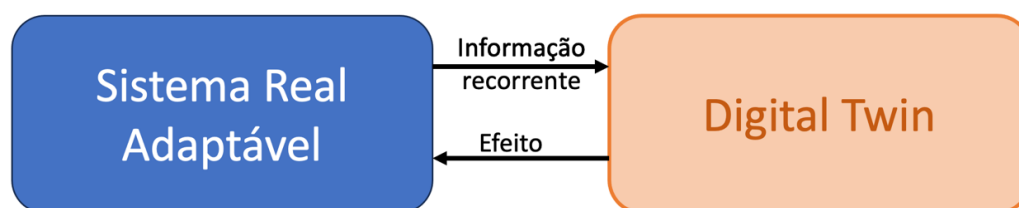


Figura 5. Características mínimas de um Digital Twin  
Fonte: Elaboração Própria.

Um DT pode ainda ser uma versão avançada e multifacetada, rica em detalhes, construída juntando informações em tempo real, tecnologias de sensores de precisão e métodos sofisticados de modelagem digital. Esse conceito tem suas raízes em sistemas ciber-físicos (CPS) e na IoT, e serve como uma ferramenta poderosa para entender completamente como algo físico funciona. Ele permite um monitoramento dinâmico e contínuo, análises complexas, densas e detalhadas além de permitir simulações realistas com parâmetros rigorosamente fieis ao objeto ou cenário real. Os DTs são uma extensão ou produto dos conceitos da Indústria 4.0, mas podem ser também o caminho para a Indústria 5.0, que adiciona os conceitos de sustentabilidade, resiliência e centrada nos seres humanos (NAHAVANDI, 2019). Essa mudança de paradigma, capacita e legitima os tomadores de decisão além de promover transparência para órgãos reguladores e público afetado (BARATA; KAYSER, 2024; JAGATHEESAPERUMAL; RAHOUTI, 2022; WANG et al., 2022).

Um DT é composto por um espaço real contendo um OF, um espaço virtual contendo um OV e, um link para fluxo de dados do espaço real para o espaço virtual e, fluxo de informações do espaço virtual para o espaço real (GRIEVES, M. 2014). O comportamento do OF é convertido em um OV e, ambos os componentes são interconectados com um alto nível de sincronização entre eles



(MATHUPRIYA et al., 2020; SEMERARO et al., 2021). A direção das informações é principalmente do OF para o OV. No entanto, o OV pode enviar dados e informações para o OF (MINERVA; LEE; CRESPI, 2020). O OV processa os dados, como histórico de manutenção e operação do OF, juntamente com dados dinâmicos em tempo real detectados e coletados de múltiplas fontes, descrevendo o status do OF e seu status ambiental circundante. O OV envia informações, por exemplo, para corrigir alguns estados ou erros, reinicializar uma máquina após uma interrupção ou sincronizar estados com outros robôs cooperativos. Ele pode produzir previsões adicionais para aprimorar a manutenção do sistema (BARRICELLI; CASIRAGHI; FOGLI, 2019). Essa conexão permite a troca de dados, o que por sua vez permite a convergência físico-digital (PIROMALIS; KANTAROS, 2022) (Figura 6).

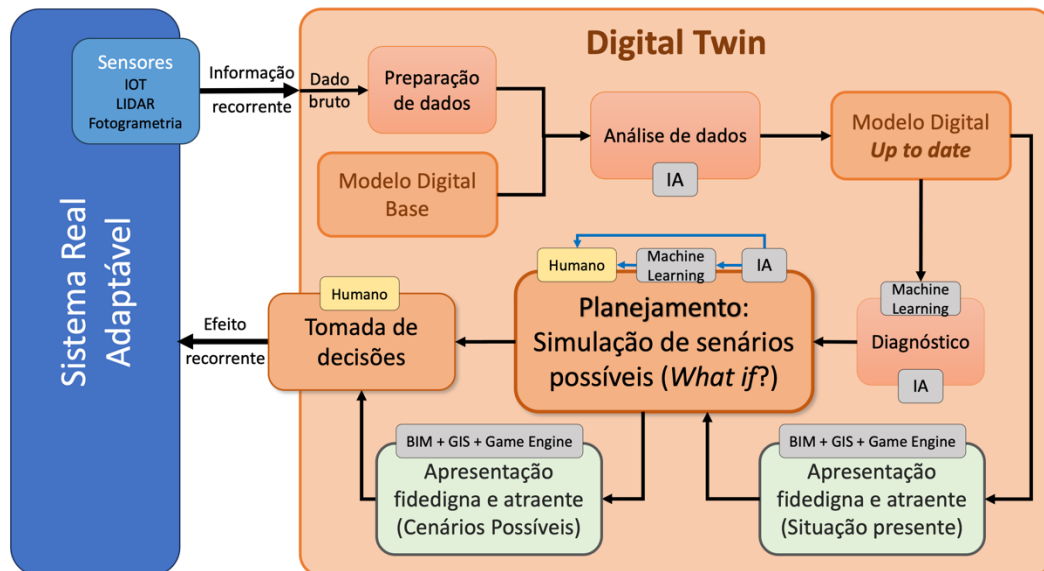


Figura 6. Características e recursos de um Digital Twin não específico.

Fonte: Elaboração Própria.

Como mencionado acima, os DTs são normalmente usados em CPS e redes, pois integram a simulação de um produto físico. Para isso, o DT modela as propriedades mecânicas, elétricas, de software e outras, para otimizar o produto físico com base nos dados em tempo real atualizados sincronizados dos sensores (figura 7) (LENG et al., 2021).



Figura 7. Diagrama Descritivo de Sistemas Cyber-físicos  
Fonte: WINTER, 2016

Um DT pode integrar diferentes leis físicas, bem como diferentes escalas ou probabilidades, refletindo o estado subjacente do OF. Isso pode ser baseado, por exemplo, em dados históricos do modelo físico (GLAESSGEN; STARGEL, 2012; TAO et al., 2019). Modelos de física diferentes cooperam com diferentes descrições de sistema, como aerodinâmica, dinâmica de fluidos, eletromagnetismo e tensões. Além disso, o uso de diferentes escalas adapta a simulação à profundidade requerida, em termos de restrições temporais. Os usuários podem navegar por diferentes partes do DT, visitando diferentes elementos de cada componente. Isso pode ser complementado com a adoção de diferentes modelos probabilísticos associados a cada bloco de construção, para aumentar as capacidades de previsão do DT. Click or tap here to enter text. Click or tap here to enter text. Click or tap here to enter text.

Alguns autores propõem a ideia de um DT cognitivo, que é inspirado nos avanços da ciência cognitiva (AL FARUQUE et al., 2021; EIRINAKIS et al., 2020). Isto, adiciona ao DT, uma percepção que forma preceitos úteis a partir de dados sensoriais brutos, assim como memória baseada na codificação e recuperação de conhecimento e, também, de raciocínio ao tirar inferências de observações, crenças e modelos, do aprendizado a partir de experiências, e resolução de problemas para alcançar objetivos. Mortlock et al., (2022) propõem o uso do aprendizado de gráficos como o caminho para criar funcionalidades cognitivas em DTs. O gráfico é construído usando modelos de dados que utilizam uma rede neural de gráficos.

### 2.1.1 Diferenciando o Digital Twin de outras representações digitais

Como descrito amplamente na literatura, os DTs são um desenvolvimento da tecnologia de modelagem e simulação, ultrapassando as limitações dessas técnicas ao integrar tecnologias de IoT e outros sensores e formas de atualizações instantâneas ou periódicas. A seguir, estão destacados os principais pontos de destinação para Modelos Digitais (MD), Sombras Digitais (SD) e Simulações (Figura 8).

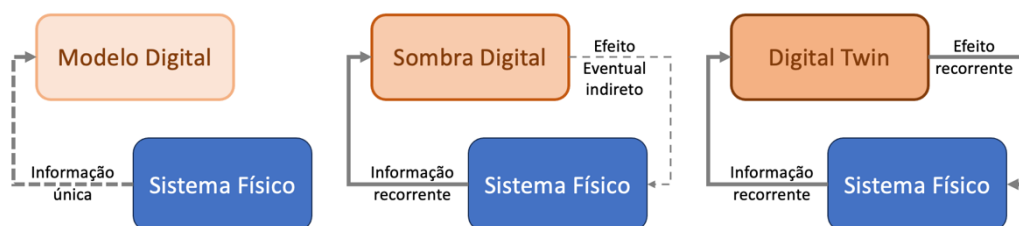


Figura 8. Diferenciando o Digital Twin.  
Fonte: Elaboração Própria.

A principal diferença entre os DTs, SDs e MDs é a natureza e direção do fluxo de dados entre os sistemas físicos e virtuais. Um modelo digital é uma versão digital de um OF existente ou planejado e não há troca automática de dados entre o modelo físico e o modelo digital. A partir da criação do modelo digital, uma mudança feita no OF não afeta o modelo digital (FULLER et al., 2020). No cenário de sombra digital, há fluxo de dados do OF para o modelo digital, mas não o inverso. Portanto, o modelo digital é atualizado com novas informações do mundo real, mas não o inverso. Em um DT, os fluxos de dados são regulares entre o OF existente e o objeto digital, apresentando uma integração total e bidirecional. Uma mudança feita no OF automaticamente leva a uma mudança no objeto digital e vice-versa (GRIEVES; VICKERS, 2017). Em DTs, o fluxo de dados é automático e sincroniza o objeto digital com o status atual do físico, enviando também informações de controle para ele. O elemento fundamental de um DT é a conexão entre sistemas digitais e físicos, que transportam dados e informações de controle entre eles. Com esses dados, um DT pode fornecer todas as informações necessárias sobre o sistema físico em tempo real, o que o caracteriza como um alvo ideal para DTs (TAO et al., 2019).

A grande diferença entre um DT e uma Simulação é a interconexão de dados que permite a troca de informações entre o OF e o OV, ou seja, uma simulação prevê estados futuros de um sistema físico com base em um conjunto de suposições iniciais (VANDERHORN; MAHADEVAN, 2021). No entanto, um

DT rastreia os estados atuais e passados do OF que está sendo usado em operação e está sendo simulados dentro do OV. Métodos de simulação tradicionais têm a capacidade limitada para avaliar o desempenho do sistema e considerar a parte física do sistema (LENG et al., 2021). Muitas vezes, os modelos computacionais usados para inferir o estado atual do OF são os mesmos modelos que podem ser usados na simulação para prever estados futuros. Os modelos de simulação podem fornecer informações adicionais para tomada de decisão, para otimizar operações futuras, prever mecanismos de degradação e prever futuras falhas. Portanto, simulações podem ser geradas com maior riqueza de informação e confiabilidade e, podem ser demonstradas com representações verossímeis em um DT, mas não constituem por si só um DT.

## **2.2 Diferentes áreas e aplicações dos Digital Twins**

Os DTs têm aplicações em diversas indústrias, como manufatura, gestão de energia, engenharias, indústria farmacêutica, medicina e cidades inteligentes (JONES et al., 2020).

Na indústria manufatureira, DTs simulam todo o processo de produção, permitindo que os fabricantes monitorem a saúde dos equipamentos, predigam falhas e otimizem operações. Isso leva a uma produtividade aumentada, custos de manutenção mais baixos, tempo de inatividade minimizado e qualidade do produto aprimorada por meio de insights e análises em tempo real (TAO et al., 2019).

No setor de saúde, DTs modelam dados de saúde individuais, preveem a progressão de doenças e personalizam tratamentos. Nos hospitais, eles gerenciam e otimizam o uso de equipamentos médicos e instalações. Os benefícios incluem medicina personalizada, melhores resultados de tratamento, melhor utilização de recursos e segurança do paciente aprimorada por meio de simulação e análises preditivas (EROL; MENDI; DOGAN, 2020).

Na indústria aeroespacial, DTs modelam o comportamento de aeronaves e espaçonaves ao longo de seu ciclo de vida, no design e a fabricação até a manutenção e operações (Figura 9). Eles também simulam cenários, levando a uma maior eficiência operacional, vida útil prolongada, segurança aprimorada e custos de manutenção reduzidos (LI et al., 2022)



Figura 9. Indústria Aeroespacial - DT+ Realidade aumentada  
Fonte: GORODENKOFF / ADOBE STOCK

No setor automotivo, DTs são usados na fase de design para simular o desempenho do veículo, em testes para prever o desgaste bem como na produção para controle de qualidade. Isso resulta em tempo de desenvolvimento reduzido, segurança aprimorada, maior confiabilidade e a capacidade de oferecer serviços de manutenção preditiva aos clientes (DENG et al., 2023).

Na indústria de petróleo e gás, DTs otimizam operações de exploração e perfuração e o gerenciamento de ativos. Eles monitoram a saúde dos equipamentos e preveem falhas para melhorar a segurança e a eficiência (Figura 10), o que reduz riscos operacionais, gerando maior eficiência, vida útil prolongada dos ativos, assim como melhor conformidade regulatória por meio de monitoramento aprimorado e análises preditivas.



Figura 10. DT para monitoramento e gestão remota  
Fonte: KONGSBERG DIGITAL 2019



Os setores de energia e utilidades usam DTs para monitorar o desempenho de usinas de energia, redes e fontes de energia renovável, otimizando a produção de energia, predizendo falhas e melhorando a estabilidade da rede. Isso resulta em melhor confiabilidade e estabilidade do fornecimento de energia, custos operacionais reduzidos e melhor integração das fontes de energia renovável.

Na construção civil e no setor imobiliário, DTs são associados a modelos BIM para projetar, construir e gerenciar edifícios e infraestrutura. Eles ajudam a otimizar o desempenho dos edifícios e o uso de energia, reduzindo tempo e custos de construção, melhorar o desempenho dos edifícios, e o gerenciamento de instalações por meio de monitoramento em tempo real, assim como manutenção preditiva (MADUBUIKE; ANUMBA; KHALLAF, 2022; OPOKU et al., 2021).

A indústria de logística e cadeia de suprimentos usa DTs para simular operações logísticas, desde o gerenciamento de armazéns até redes de transporte. Eles otimizam o roteamento, os níveis de inventário e predizem possíveis interrupções, resultando em maior eficiência, custos reduzidos, melhor desempenho de entrega e maior resiliência da cadeia de suprimentos por meio de melhor planejamento e ajustes em tempo real (Figura 11) (LEE; LEE, 2021).



Figura 11. Infográfico DT Logística  
Fonte: DHL, 2024

Empresas de telecomunicações usam DTs para monitorar e otimizar o desempenho da rede, gerenciar a infraestrutura e melhorar o atendimento ao

cliente ao prever problemas e otimizar a alocação de recursos. Os benefícios incluem maior confiabilidade e desempenho da rede, tempo de inatividade reduzido, melhor experiência do cliente e economia de custos por meio de manutenção proativa e otimização.

Cidades inteligentes utilizam DTs para modelar ambientes urbanos, gerenciar o fluxo de tráfego, otimizar o uso de energia e garantir a segurança pública. Eles ajudam no planejamento e gerenciamento da infraestrutura, resultando em melhor qualidade de vida, gestão eficiente de recursos, redução de congestionamentos e poluição, e segurança pública aprimorada por meio de monitoramento em tempo real e planejamento orientado por dados (Figura 12).

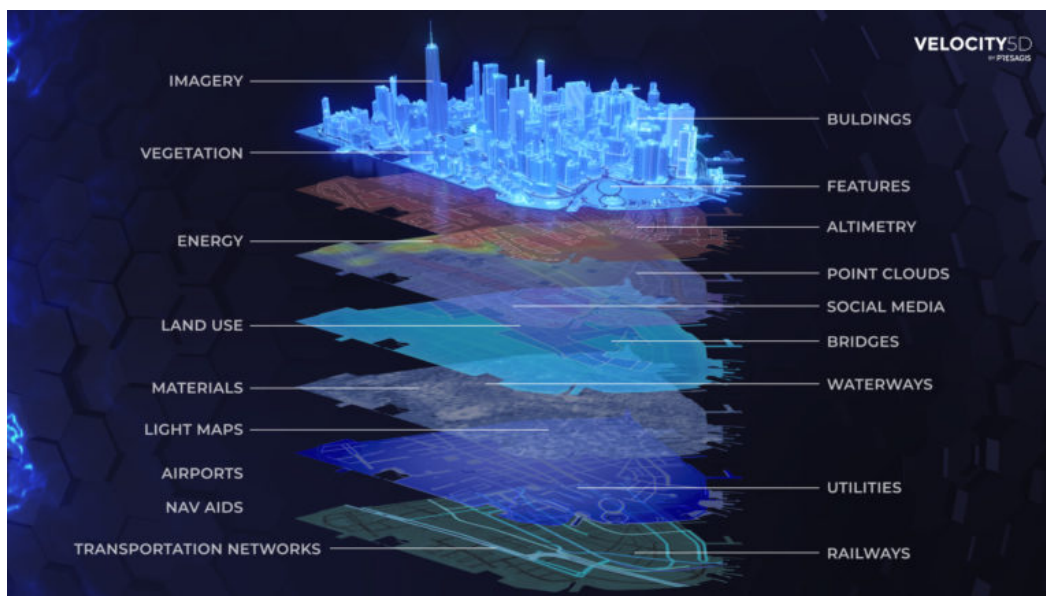


Figura 12. DT 5D Camadas não físicas  
Fonte: PRESAGIS V5D-LAYERS-UNDER-NYC

Em resumo, os DTs oferecem um potencial transformador em cada uma dessas indústrias ao fornecer uma contraparte virtual para sistemas físicos, permitindo melhor tomada de decisões, otimização e capacidades preditivas.

### 3 Desafios do planejamento e gestão urbana

Os desafios mais relevantes dos primeiros centros urbanos eram relacionados ao provimento de insumos e segurança. Com o adensamento das aglomerações, foram aparecendo desafios para destinação de rejeitos e seus efeitos ambientais locais e para a saúde das suas próprias populações. Os desafios urbanos evoluíram ao longo dos séculos, influenciados por fatores como o crescimento populacional, industrialização, avanços tecnológicos e mudanças nas estruturas sociais, econômicas e políticas. Estas questões não são exclusivas de um lugar ou momento, mas é possível elencar alguns dos principais desafios por período (MADANIPOUR, 2006).

No século XVIII, o cenário urbano era muito diverso em diferentes cidades ao redor do globo, mesmo dentro de um único país. Em um período ainda pré-industrial, algumas aglomerações urbanas já experimentavam rápido crescimento. Infraestrutura limitada e sistemas de saneamento inadequados para sustentar as populações em crescimento e o super adensamento, permitiram a propagação de doenças como cólera e tifo. (BOND, 2007; STOBART, 1996).

O século XIX, marcado pela industrialização, apresentou uma rápida transição de sociedades agrárias para centros urbanos industrializados, resultando em desafios como condições de trabalho precárias e desigualdade social. O influxo de migrantes rurais para as cidades gerou uma demanda por moradias muito superior à disponibilidade, levando ao desenvolvimento de condições de vida apertadas e insalubres em cortiços.

À medida que as cidades continuaram a crescer, no século XX, surge a necessidade de expansão da infraestrutura de transporte, abastecimento de água e eletricidade. A expansão desordenada para os subúrbios trouxe problemas como, congestionamento de tráfego e declínio na qualidade de vida nos centros urbanos. O aumento da atividade industrial e o uso crescente de automóveis contribuíram para a poluição ambiental, afetando a qualidade do ar e da água (HENDERSON, 2010)."

Neste século, apesar de políticas públicas contrárias, a urbanização e crescimento populacional são graduais, mas se mantem persistentes. Em cenários mais críticos, muitas nações em desenvolvimento atravessam uma transição de



10-20% de população urbana para taxas entre 60-85%, em apenas 3 décadas. Uma rápida urbanização, aliada a limitações econômicas, é geralmente muito traumática do ponto de vista ambiental e social, envolvendo substanciais deslocamentos populacionais e demandando a reestruturação ou criação de estruturas culturais, políticas e sociais. Comumente, a infraestrutura urbana existente, a disponibilidade de moradias formais e a oferta de serviços públicos são insuficientes (HENDERSON, 2010; JEDWAB; VOLLRATH, 2015).

Cidades ao redor do mundo estão adotando diversas tecnologias digitais por várias razões: não apenas para acompanhar o crescente volume e a complexidade das informações, mas também, e especialmente, pela atual disponibilidade dessas ferramentas. A coleta de dados atingiu níveis sem precedentes, e a demanda por acessibilidade e, sobretudo, pela gestão eficaz dessas informações cresce em paralelo (AL NUAIMI et al., 2015).

Para a confirmação dos principais desafios do PGU, sugeridos por consulta qualitativa a relatórios de instituições internacionais e representações profissionais relacionadas, foi realizado um levantamento quantitativo nas plataformas:

- *Google Scholar*<sup>3</sup>, amplamente utilizada para encontrar artigos acadêmicos em diversas áreas do conhecimento, apresentando 1.840 resultados;
- *Science Direct*<sup>4</sup>, que oferece acesso a milhares de periódicos revisados por pares e livros em diversas áreas científicas e que apresentou 3.004 trabalhos;
- *IEE Explore*<sup>5</sup>, com foco em engenharia, tecnologia e ciência da computação, retornando 1.054 resultados.

As buscas foram realizadas com os termos em inglês: *Urban + Planning + Challenges*, todas presentes no título na plataforma *Google Scholar* e todas

---

<sup>3</sup> Busca realizada na plataforma *Google Scholar*, com as palavras *Urban Planning Challenges*, todas contidas no título ou resumo. Disponível em: <[https://scholar.google.be/scholar?start=480&q=allintitle:urban+planning+challenges&hl=pt-BR&as\\_sdt=0,5&as\\_ylo=2014&as\\_yhi=2024](https://scholar.google.be/scholar?start=480&q=allintitle:urban+planning+challenges&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&as_ylo=2014&as_yhi=2024)> Acesso em 03 mar. 2024.

<sup>4</sup> Busca realizada na plataforma *Science Direct*, com as palavras *Urban Planning Challenges*, todas contidas no título ou resumo. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/search?q=Urban%20planning%20challenges&date=2014-2024&tak=Urban%20planning%20challenges>> Acesso em 09 mar. 2024.

<sup>5</sup> Busca realizada na plataforma *IEE Explore*, com as palavras *Urban Planning Challenges*, todas contidas no título ou resumo. Disponível em: <[https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?action=search&newsearch=true&matchBoolean=true&queryText=\(%22Document%20Title%22:Urban%20planning%20challenges\)%20OR%20\(%22Abstract%22:Urban%20planning%20challenges\)>](https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?action=search&newsearch=true&matchBoolean=true&queryText=(%22Document%20Title%22:Urban%20planning%20challenges)%20OR%20(%22Abstract%22:Urban%20planning%20challenges)>)> Acesso em 09 mar. 2024.

presentes no título e/ou no resumo nas plataformas, *Science Direct* e *IEE Explore*.

Para categorização temática específica, cada artigo foi analisado individualmente através da leitura dos resumos, sendo que quando necessário, para maior esclarecimento, a publicação foi analisada na íntegra. Foram excluídos da relação definitiva, publicações não acessíveis, duplicadas, ou com temática não relacionada ao contexto deste trabalho. O levantamento bibliográfico confirmou de forma sólida, como demonstrado na Figura 13, os desafios atuais do PGU. As mudanças climáticas são tema central em 34% das publicações, 27% das publicações tem relação com a urbanização acelerada e, a digitalização é tratada em 22% das publicações, enquanto todos os outros temas somados chegam à apenas 17%.

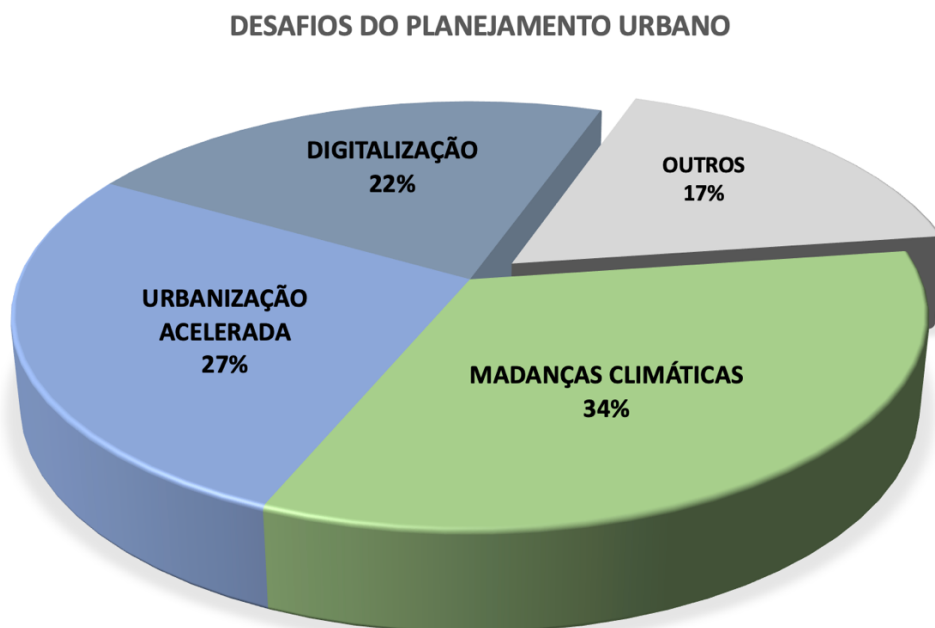


Figura 13. Macro temáticas dos desafios do PGU, 2014-2024.  
Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 1, subdividido em temas específicos, confirma as premissas que justificam este trabalho, mas também traz algumas surpresas. Sob o tema Mudanças Climáticas, como esperado, destacam-se a resiliência climática, a infraestrutura verde e os ISUDUS/SDG. No tema Urbanização Acelerada, periurbanização, mobilidade e gestão territorial são os tópicos mais abordados. Sob o tema Digitalização, gestão colaborativa, análises preditivas e universalismo digital são os destaques. No entanto, é válido ressaltar que a gestão colaborativa aparece em destaque absoluto, sendo discutida com uma frequência duas vezes

superior à das análises preditivas e 30% superior à da resiliência às mudanças climáticas, o segundo tema mais citado em todo o levantamento.

Quadro 1. Categorização Artigos Contendo: *Urban Planning Challenges*

Google Scholar - 1840 (2014-2024; All in Title or Abstract)	DESAFIOS DO PLANEJAMENTO URBANO (Urban Planning Challenges)		4898	
	MADANÇAS CLIMÁTICAS	1508	DIGITALIZAÇÃO	988
	Resiliência às mudanças climáticas	207	Planejamento e Gestão Colaborativa	269
	Infraestrutura verde	187	Modelagem & Análise Preditiva	131
	Planejamento sustentável & ISUDUS/SDG	176	Universalismo digital	108
	Eficiência energética & energias renováveis	132	Dados (informação) & Tomada de Decisões	96
	SBN & Urbanismo Biofílico	124	Smart City, ICT & IOT	84
	Agricultura e pecuária urbana	91	AI & ferramentas generativas	67
	Serviços ecossistêmicos urbanos	88	Mobilidade autônoma	51
	Mobilidade sustentável & ativa	79	Machine Learning	38
	Gestão de sistemas hídricos urbanos	70	Big Data	39
	Planejamento territorial & preservação de ecossistemas	63	Visualização digital & acessibilidade	36
	Análise & gestão de riscos e desastres	43	Mapeamento colaborativo e coleta de dados	29
	Assentamentos sobre ou sensíveis à água	37	Cartografia e sensoriamento remoto	17
	Adaptação curricular às mudanças climáticas	34	Desenvolvimento de Digital Twin	14
	Governança multinível & sustentabilidade	29	Legislação & Smart City	9
	Ecossistema do solo	28	OUTROS	738
	Silvicultura & Florestas urbanas	21	Desafios - revisão de literatura & discussões	184
	Excluídos da resiliência climática e naturalização	18	Conceitos de Planejamento	153
	Migração climática & refugiados	17	Pandemia / pós-pandemia	71
	Condicionamento à luz natural	17	Saúde urbana	32
	Cidades esponja	16	Guerra e desenvolvimento urbano	26
	Verdificação vertical	14	Logística & intermodais urbanos	25
	Padrões do tecido urbano & sustentabilidade	11	Branding da cidade & turismo	24
	Paisagismo sustentável & requalificação histórica	6	Colaboração acadêmica-governamental	22
	ScienceDirect - 3004 (2014-2024; All in Title or Abstract)	URBANIZAÇÃO ACELERADA	1217	Patrimônio cultural & Planejamento
Periurbanização & expansão urbana		189	Economia circular	17
Avaliação de impacto no transporte & TOD		137	Ecoturismo urbano	15
Gestão territorial & uso do solo		133	Planejamento responsivo à gênero	14
Habitação		89	Experimentação urbana	13
Assentamentos informais		82	Governança adaptativa	13
Planejamento como endereçamento geral		76	Cidade inclusiva	12
Rezzoneamento e retrofitagem de bairros		75	Avaliação de paisagens sonoras	12
Água, Saneamento e gestão de resíduos		61	Instabilidade Política & Deterioração Urbana	11
Legislação e políticas desatualizadas		49	Construindo comunidades	10
Cidades em declínio		47	Saneamento urbano	9
Infraestrutura sociocultural e cultural		44	Descolonização curricular	9
Planejamento regional e cooperação		38	Migração Sazonal	8
Corrupção e planejamento urbano		35	NPAs & planejamento de diversidade	8
Dicotomia entre planejamento & realidade		28	Direitos Urbanos	6
Conhecimento tradicional e local		22	Políticas orientadas para crianças	6
Preservação do patrimônio		20	Geotecnia de ERT	4
Saúde urbana		20	Outros temas relacionados	17
Migração e urbananização		19	Total classificados	4451
IEEE Xplore - 1054 (2014-2024; All in Title or Abstract)		Globalização neoliberal & urbanização	16	Excluídos
	Segregação & educação	14	Indefinido ou não acessível	377
	Participação pública	12	Não relacionado ao tema	39
	Parques suburbanos e espaços verdes	11	Repetido	31

Fonte: Elaboração própria

Apesar de uma interconectividade global sem precedentes, com a globalização não apenas comercial, mas também cultural, ideológica, social e climática, as cidades ao redor do mundo mantêm suas particularidades, potências e problemáticas inerentes aos seus contextos. No entanto, podemos considerar que, no presente e no futuro próximo, cidades em todo o globo enfrentarão

desafios relacionados a três temas centrais: mudanças climáticas, urbanização acelerada combinada com o aumento populacional global, e digitalização da informação e dos serviços.

Como ilustrado na Figura 14, a partir deste cenário, surgem problemáticas consequentes de cada um desses temas, ou da sobreposição entre eles. Assim como nas suas causas, essas problemáticas agravam-se mutuamente. Entretanto, o enfrentamento de qualquer uma delas, pode ter um efeito mitigador sobre as outras, estabelecendo uma relação sistêmica negativa ou positiva.

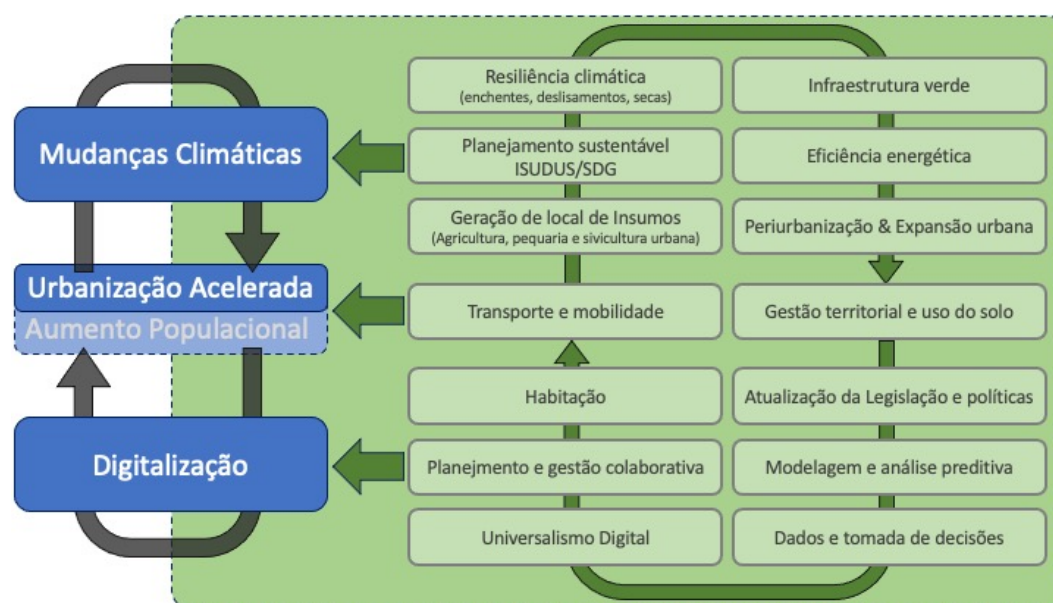


Figura 14. Principais desafios e demandas atuais do PGU.

Fonte: Elaboração Própria

### 3.1 Urbanização acelerada e crescimento populacional

A urbanização acelerada refere-se ao aumento acelerado da população em áreas urbanas, devido à migração de regiões rurais e ao crescimento natural da população. Este fenômeno, atualmente mais pronunciado em países em desenvolvimento, tem implicações significativas para a infraestrutura, a economia, o meio ambiente e os sistemas sociais. As oportunidades econômicas em áreas urbanas são um grande atrativo, oferecendo mais empregos, melhores salários e atividades econômicas diversificadas. Padrões de vida melhorados, incluindo melhor acesso a cuidados de saúde, educação e serviços essenciais, também atraem pessoas para as cidades. Fatores sociais, como uma vida cultural vibrante, atraem especialmente os jovens. Além disso, o declínio rural devido à

mecanização agrícola e à falta de oportunidades empurra as pessoas para as cidades (BODO, 2019).

A urbanização acelerada provoca a sobrecarga de infraestrutura, já que o rápido crescimento populacional pode superar o desenvolvimento de infraestrutura essencial, como estradas, transporte público e utilidades. A escassez de habitação frequentemente leva a assentamentos superlotados e informais, como favelas. A degradação ambiental é outra preocupação, com a expansão urbana causando desmatamento, perda de espaços verdes e aumento da poluição. O congestionamento do tráfego, resultante do aumento de veículos, leva a maiores emissões e tempos de deslocamento mais longos. A desigualdade social pode se tornar mais pronunciada em áreas de urbanização acelerada, levando a tensões sociais aumentadas. Problemas de saúde pública também surgem, com condições de vida superlotadas facilitando a disseminação de doenças e sobrecarregando os sistemas de saúde (ZHANG, 2016).

Nos últimos anos, diversas regiões ao redor do mundo estão passando por um rápido processo de urbanização, impulsionado por fatores como crescimento econômico, migração rural-urbana e investimentos em infraestrutura. A Ásia, China e Índia se destacam devido aos massivos deslocamentos populacionais das áreas rurais para as urbanas. A população urbana da China cresceu de 18% em 1978, para mais de 60% em 2020, impulsionada pelas reformas econômicas e industrialização. Shenzhen, transformou-se de uma pequena vila de pescadores em uma megacidade em poucas décadas, tornando-se um importante centro de inovação e tecnologia (THE WORLD BANK, 2020). A Índia, com sua economia em rápido crescimento, também vê uma expansão urbana significativa, particularmente em cidades como Mumbai, Delhi e Bangalore, com áreas urbanas que deverão abrigar 40% de sua população até 2030 (UN-HABITAT, 2018).

A África, pode ser considerada o epicentro da urbanização acelerada, com países como Nigéria, Etiópia e Quênia na vanguarda. A população urbana da Nigéria tem aumentado rapidamente, com cidades como Lagos se expandindo dramaticamente, enfrentando desafios como superlotação e a necessidade de infraestrutura adequada. A capital da Etiópia, Addis Abeba, e Nairobi, no Quênia, também estão experimentando um crescimento substancial, impulsionado pelo desenvolvimento econômico, pelo desenvolvimento do setor de tecnologia, a

construção de novos empreendimentos imobiliários e migração rural-urbana (UN-HABITAT, 2022).

No Oriente Médio, países como a Arábia Saudita e os Emirados Árabes Unidos, têm se urbanizado rapidamente devido à riqueza do petróleo e aos esforços de diversificação econômica. Cidades como Riad, Dubai e Abu Dhabi se transformaram significativamente nas últimas décadas (UN-HABITAT, 2018). Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, continua a crescer rapidamente com investimentos maciços em infraestrutura, turismo e setor imobiliário. Riyadh, na Arábia Saudita, está em meio a um ambicioso plano de modernização e expansão urbana como parte da iniciativa Vision 2030 do governo saudita (GULFNEWS, 2024).

Na América do Norte, Austin, no Texas, EUA, tem se visto um rápido crescimento populacional e desenvolvimento urbano, impulsionado por seu setor de tecnologia em expansão e qualidade de vida atrativa. Toronto, no Canadá, também tem se expandido rapidamente, com uma onda de novos imigrantes e desenvolvimento de infraestrutura urbana. Na Europa, Istambul, na Turquia, continua a se expandir com um crescimento populacional rápido e desenvolvimento de infraestrutura, incluindo novos projetos de transporte e habitação. Varsóvia, na Polônia, tem visto um crescimento significativo, com investimentos em infraestrutura e um aumento na população urbana (GEYER et al., 2009).

A América Latina, embora já altamente urbanizada, continua a ver o crescimento em cidades como Rio de Janeiro, São Paulo, Cidade do México e Bogotá. Essas cidades estão se expandindo devido à migração interna e ao crescimento populacional natural (AGUIAR et al., 2023; CEPAL; ONU-HABITAT; MINURVI, 2018). Lima, no Peru, tem passado por uma urbanização acelerada, com um aumento significativo na população urbana e expansão de áreas metropolitanas. Santiago, no Chile, também tem experimentado crescimento urbano com o desenvolvimento de novos bairros e expansão da infraestrutura de transporte público (KOOKANA et al., 2020; UN-HABITAT, 2022).

Essas regiões ilustram os diversos motores e escalas da urbanização em todo o mundo, com oportunidades econômicas, industrialização e migração sendo fatores-chave. Essas cidades refletem uma tendência global de urbanização acelerada, com muitas enfrentando desafios como a necessidade de melhorar a

infraestrutura, gerenciar o crescimento sustentável e atender às necessidades de uma população urbana crescente (ZHANG, 2016). O planejamento urbano desempenha um papel crucial na gestão dos efeitos da urbanização acelerada e na criação de cidades sustentáveis e habitáveis. O planejamento integrado do uso solo, que coordena áreas para habitação, indústria, comércio e recreação, é essencial para um desenvolvimento equilibrado. Investir em sistemas de transporte público eficientes e acessíveis pode reduzir o congestionamento de tráfego e a poluição. Iniciativas de habitação acessível são necessárias para evitar a proliferação de favelas e garantir o acesso à moradia. A incorporação de infraestrutura verde, como parques e florestas urbanas, melhora os ecossistemas urbanos e a qualidade de vida dos moradores. Tecnologias de cidades inteligentes, que utilizam dados e tecnologia para otimizar a gestão urbana e a prestação de serviços, também são vitais. Envolver as comunidades locais no processo de planejamento garante que o desenvolvimento atenda às necessidades dos moradores (KWILINSKI; LYULYOV; PIMONENKO, 2023).

Em conclusão, a urbanização acelerada apresenta tanto desafios quanto oportunidades. O planejamento urbano cuidadoso e proativo é essencial para aproveitar os benefícios da urbanização enquanto mitiga seus efeitos adversos. O objetivo é criar cidades que sejam sustentáveis, resilientes e inclusivas, garantindo uma alta qualidade de vida para todos os moradores.

### **3.2 Extremização climática e as cidades**

Embora eventos climáticos extremos sempre tenham ocorrido ao longo da história da Terra, sua frequência e intensidade aumentaram significativamente desde meados do século XX, impulsionadas principalmente pelas mudanças climáticas causadas pelo homem. Dados científicos demonstram uma correlação direta entre o aumento desses eventos e a elevação das temperaturas globais. Pesquisas e modelos climáticos atribuem esse crescimento às atividades humanas, especialmente à emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono e o metano (UN-DRR, 2024). Os relatórios do IPCC, documentam o aumento dos eventos extremos e suas ligações com as mudanças climáticas antropogênicas, elevação de temperatura global constante, com as últimas décadas sendo as mais quentes já registradas, além de mudanças nas temperaturas oceânicas, padrões de circulação atmosférica e elevação do nível do mar, que

contribuem para a intensificação de tempestades, inundações e secas (CALVIN et al., 2023)(Figura 15).

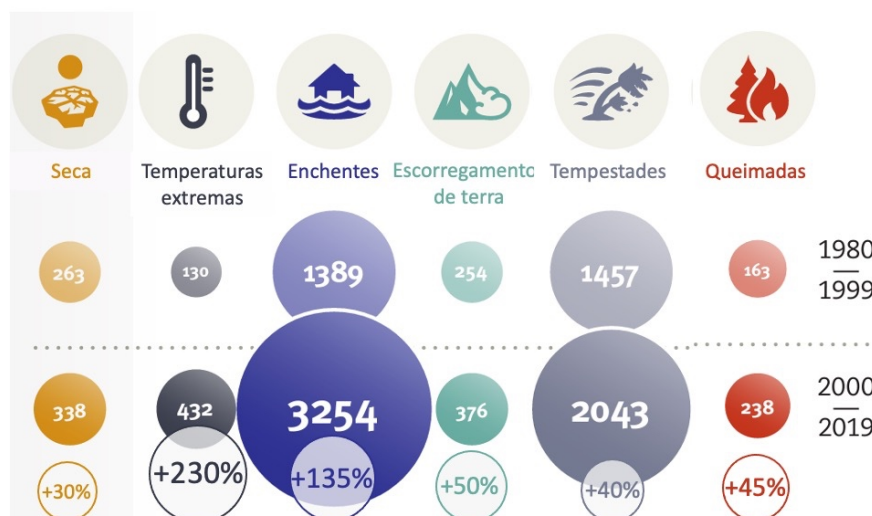


Figura 15. Aumento de Desastres Naturais 4 décadas.  
Fonte: Adaptado pelo autor de UNDRR 2020

Na primeira metade do século XX, ocorreram eventos climáticos significativos, como o *Dust Bowl* na década de 1930. Esta série de tempestades de poeira severas foi causada pela seca e práticas agrícolas inadequadas nos Estados Unidos e no Canadá. Do meio ao final do século XX, a frequência de eventos climáticos extremos registrados começou a aumentar. Eventos notáveis incluíram secas severas na região do Sahel, na África, durante as décadas de 1960 e 1970 e, ondas de calor extremas e temperaturas recordes na década de 1990, como a onda de calor de Chicago em 1995. No início dos anos 2000, o ritmo e a intensidade dos eventos climáticos continuaram a aumentar. A onda de calor europeia de 2003 causou mais de 70.000 mortes, e o Furacão Katrina em 2005, exemplificaram ainda mais essa tendência. A década de 2010 foi marcada por um aumento significativo na frequência de eventos extremos, incluindo a onda de calor e incêndios florestais na Rússia em 2010, enchentes severas no Paquistão, atividade recorde de tornados nos Estados Unidos em 2011 e a *Superstorm Sandy* impactando o Caribe e a Costa Leste dos EUA em 2012. Em 2017, os furacões Harvey, Irma e Maria causaram danos generalizados, seguidos por incêndios florestais recordes na Califórnia e ondas de calor na Europa e na Ásia em 2018. Como apresentado no Quadro 2, a tendência de aumento na frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos em todo o mundo se mantém, com ocorrências extremas e recordes sendo batidos anualmente.



Quadro 2. Desastres Naturais no mundo em 15 anos

2009	Austrália	Uma onda de calor recorde foi um fator significativo do <i>Black Saturday</i> , um dos eventos de incêndio florestal mais mortais da história australiana, resultou em 173 mortes e extensos danos à propriedade em Victoria.
2010	Austrália	Chuvas intensas e inundações generalizadas em Queensland, afetando mais de 200.000 pessoas e causando bilhões em danos.
2011	Brasil	Chuvas torrenciais em janeiro causaram enchentes e deslizamentos catastróficos nas regiões montanhosas do estado do Rio de Janeiro, resultando em mais de 900 mortes e extensos danos à propriedade.
	Austrália	Ciclone <i>Yasi</i> de categoria 5 causou danos extensos em Queensland, com ventos de até 285 km/h e enchentes severas.
	Estados Unidos e Caribe	O Furacão " <i>Superstorm Sandy</i> ", atingiu o leste dos Estados Unidos no final de outubro. Causou danos extensos em Nova Jersey, Nova York e outras partes do Nordeste, mais de \$68 bilhões em danos e pelo menos 233 mortes em oito países.
2012	Europa	Uma onda de frio extremo atingiu a Europa, com significativamente abaixo da média, resultou em centenas de mortes.
	Filipinas	O Tufão <i>Bopha</i> atingiu as Filipinas, resultou em mais de 1.900 mortes e danos extensos à propriedade e infraestrutura.
	Estados Unidos	Uma seca severa afetou grandes partes do país, impactando a produção agrícola e o abastecimento de água. Essa seca foi uma das piores da história recente, afetando quase 80% do território.
	Brasil	Chuvas e inundações severas, levando a grandes danos e mortes, particularmente no estado do Rio de Janeiro.
2013	Sudeste Asiático	Tufão <i>Haiyan</i> , um dos ciclones tropicais mais poderosos já registrados, devastou partes do Sudeste Asiático, particularmente as Filipinas, causando mais de 6.000 mortes.
	América do Sul	Uma onda de calor fez com que as temperaturas subissem acima de 40°C em muitas regiões.
2014	Brasil	Entre 2014 e 2017, uma das secas mais severas na história do Brasil afetou a região Sudeste, particularmente São Paulo. Os reservatórios de água atingiram níveis criticamente baixos, levando ao racionamento e cortes de fornecimento de água.
	América do Sul	Chuvas intensas levaram a enchentes significativas em partes do sul do Brasil e Uruguai, deslocando milhares de pessoas e causando danos generalizados.
2015	Vanuatu	Ciclone <i>Pam</i> de categoria 5 devastou Vanuatu, causando destruição generalizada, deslocando milhares de pessoas e afetando significativamente a infraestrutura do país.
	África Austral	A seca de 2015-2016, exacerbada por um evento El Niño, causou severas faltas de água e falhas de colheitas em países como África do Sul, Zimbábue e Malawi.
2016	Brasil	Um raro ciclone extratropical atingiu o estado de Santa Catarina, causando danos significativos a edifícios e infraestrutura com ventos fortes e chuvas intensas.
2017	Sul da Ásia	Enchentes severas durante a monção afetaram Bangladesh, Índia e Nepal, deslocando milhões de pessoas e causando devastação generalizada.
	Austrália	Outro período de seca de 2017 a 2019 afetou <i>New South Wales</i> e <i>Queensland</i> , levando a faltas de água e perdas agrícolas.
2018	África do Sul	Cidade do Cabo enfrentou uma crise hídrica sem precedentes com reservatórios caindo a níveis criticamente baixos, levando a severas restrições de água.
	Europa	Ondas de calor recorde na França, Alemanha e Reino Unido, com temperaturas superando 40°C.
	África Austral	Ciclone Idai, um dos piores ciclones tropicais já registrados a afetar a África e o Hemisfério Sul, causou danos catastróficos em Moçambique, Zimbábue e Malawi, resultando em mais de 1.300 mortes.
2019	Brasil	Incêndios florestais generalizados entre 2019 e 2020 na Bacia amazônica afetaram significativamente os ecossistemas locais e comunidades indígenas. Provocados por condições naturais de seca severa, causaram danos significativos à infraestrutura.
	Austrália	A onda de calor de 2019-2020 excedeu 40°C em grande parte do país, contribuiu para uma devastadora temporada de incêndios florestais conhecida como "Black Summer", queimou mais de 18 milhões de hectares, causou extensos danos à fauna, destruiu milhares de casas e matou pelo menos 33 pessoas diretamente, e muitas mais relacionadas à fumaça.
	Brasil	No sudeste do Brasil, chuvas intensas no início de 2019 levaram a severas enchentes e deslizamentos em Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. As enchentes deslocaram milhares de pessoas e causaram danos significativos à infraestrutura.
	Estados Unidos e Caribe	Temporada de Furacões com recorde de 30 tempestades nomeadas, incluindo os Furacões Laura e Eta, causaram danos significativos no Caribe e na Costa do Golfo dos Estados Unidos. Uma linha poderosa de tempestades com ventos de força de furacão varreu o Meio-Oeste, particularmente afetando Iowa, causando danos extensos a colheitas e infraestrutura.
2020	Indonésia	Enchentes severas em Jacarta e áreas circundantes causadas por chuvas torrenciais levaram ao deslocamento de dezenas de milhares de pessoas e inúmeras fatalidades.
	Brasil	Temperaturas recorde em várias regiões, afetando particularmente o Pantanal e a Amazônia. O calor extremo exacerbou as condições de seca e o Pantanal, o maior bioma alagável tropical do mundo, enfrentou incêndios florestais sem precedentes que destruíram vastas áreas do ecossistema, ameaçando a biodiversidade e as comunidades locais.
	Estados Unidos	Entre 2020 e 2021, Condições prolongadas de seca impactaram a agricultura e o fornecimento de água no oeste do país resultando em uma temporada de incêndios florestais recorde com mais de 4 milhões de acres queimados, incluindo o August Complex Fire, o maior da história da Califórnia.
	Brasil	Um tornado atingiu o estado do Paraná em outubro de 2021, causando consideráveis danos a propriedades e infraestrutura
2021	Estados Unidos	A tempestade de inverno no Texas, em fevereiro, causou apagões massivos, deixando milhões sem aquecimento e água, e resultou em perdas econômicas significativas.
	América do Norte	O Noroeste do Pacífico experimentou um calor sem precedentes, com temperaturas atingindo até 49,6°C em Lytton, Canadá, seguidas por devastadores incêndios florestais.
	Europa	Enchentes catastróficas na Alemanha e na Bélgica levaram a mais de 200 mortes e bilhões de euros em danos.
2022	América do Sul	Uma onda de calor recorde afetou a Argentina, Uruguai, Paraguai e Brasil, sobrecarregando redes de energia.
2023	Brasil	Com quase 700 milímetros em 24 horas em algumas áreas, o estado de São Paulo enfrentou enchentes catastróficas e deslizamentos de terra, particularmente afetando áreas costeiras, resultaram em pelo menos 44 mortes.
2024	Brasil	O Rio Grande do Sul experimentou sua pior enchente em mais de 80 anos. Chuvas torrenciais levaram a enchentes severas em abril e maio. A enchente afetou 431 dos 497 municípios do estado, com danos significativos à infraestrutura, incluindo estradas, pontes e escolas. Porto Alegre, viu níveis recorde de água, superando os de enchentes históricas anteriores.

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados: NOAA; Copernicus; UNDRR; WMO; FBDS.

A escalada dos eventos climáticos extremos na última década destaca a necessidade urgente de esforços globais para mitigar as mudanças climáticas e adaptar-se aos seus impactos, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa, o fortalecimento da resiliência da infraestrutura e o desenvolvimento de estratégias abrangentes de resposta a desastres (UN-DRR, 2024).

As cidades concentram a maior parte da população e da infraestrutura construída no planeta. São por tanto pontos críticos de vulnerabilidade, mas da mesma maneira são uma oportunidade para construção de resiliência e mitigação dos fatores contribuintes para essa extremização climática. Os DTs podem exercer papel fundamental no mapeamento das vulnerabilidades climáticas da cidade, assim como servirem de base para o desenvolvimento e projeto de possíveis soluções e, talvez como sua principal contribuição, verificar a verdadeira eficácia e efeitos colaterais das intervenções propostas.

### **3.3 Digitalização e transformação digital**

A digitalização refere-se ao processo de conversão de informações em formato digital, transformando objetos físicos, textos, imagens, sons e sinais analógicos em dados digitais que podem ser processados, armazenados e transmitidos por computadores e dispositivos digitais. Os dados digitais podem ser armazenados em discos rígidos, armazenamento em nuvem e discos ópticos, facilitando o acesso e compartilhamento de informações pela internet e tornando a recuperação de dados mais rápida e eficiente. A digitalização contribui para a preservação de artefatos históricos e culturais ao criar réplicas digitais, que podem ser utilizadas para pesquisa, educação e acesso público sem expor os originais ao desgaste. Registros digitais são mais facilmente organizáveis, pesquisáveis e analisáveis, aumentando a eficiência nos fluxos de trabalho e na gestão de dados. A automação de tarefas de entrada e processamento de dados reduz erros humanos e libera tempo para tarefas mais complexas (VIANA, 2021).

A transformação digital na administração pública é um processo complexo e multifacetado que visa melhorar a eficiência, transparência e capacidade de resposta dos serviços governamentais por meio da adoção de tecnologias digitais. No entanto, esse processo enfrenta vários desafios estruturais, organizacionais e sociais. Um dos maiores desafios é a integração de sistemas legados. Muitas

administrações públicas dependem de infraestruturas de TI desatualizadas, muitas vezes desenvolvidas ao longo de décadas, que não são facilmente compatíveis com soluções digitais modernas. Atualizar ou substituir esses sistemas pode ser caro, demorado e causar interrupções nas operações em andamento (JANSSEN et al., 2017). Isso leva a desafios de interoperabilidade, em que diferentes sistemas em vários departamentos governamentais não conseguem compartilhar dados facilmente, criando gargalos na entrega de serviços e reduzindo os ganhos de eficiência prometidos pela transformação digital (BERTOT; JAEGER; GRIMES, 2010).

Privacidade e segurança de dados também são grandes preocupações. As administrações públicas lidam com grandes quantidades de informações pessoais e sensíveis, tornando-as alvos preferenciais de ciberataques (LUNA-REYES; GIL-GARCIA, 2014). Equilibrar a necessidade de dados governamentais abertos com a proteção da privacidade dos cidadãos exige medidas robustas de cibersegurança e estruturas transparentes de governança de dados, o que pode ser difícil de implementar de forma uniforme em todos os departamentos e agências.

A cultura burocrática da administração pública apresenta outro obstáculo importante. As instituições públicas geralmente são caracterizadas por processos de tomada de decisão hierárquicos, regras rígidas e resistência à mudança, o que desacelera o ritmo da transformação digital (CORDELLA; BONINA, 2012). Ao contrário das organizações do setor privado, que geralmente são mais ágeis, as administrações públicas enfrentam inércia estrutural e são retardadas por restrições regulatórias e uma cultura avessa ao risco (MEIJER; BOLÍVAR, 2016). Essa resistência burocrática é muitas vezes agravada pela resistência dos funcionários, especialmente daqueles que se sentem ameaçados pela automação ou que não possuem as habilidades digitais necessárias (MERGEL; EDELMANN; HAUG, 2019). Funcionários do setor público podem temer que a transformação digital leve à perda de empregos ou exija que aprendam rapidamente novas tecnologias, criando uma lacuna de habilidades que deve ser resolvida por meio de programas extensivos de treinamento e capacitação.

Além disso, há restrições financeiras. A transformação digital exige investimentos substanciais não apenas em tecnologia — como computação em nuvem, inteligência artificial e análise de dados — mas também em treinamento, gestão de mudanças e redesenho de processos de serviço (JANSSEN; VAN DER

VOORT, 2016). No entanto, as administrações públicas muitas vezes têm orçamentos limitados, e projetos de transformação digital competem com outros serviços públicos essenciais, como saúde, educação e bem-estar social. Isso dificulta a obtenção do financiamento necessário, especialmente em regiões onde as condições econômicas são desfavoráveis ou a dívida pública é alta (BELYAKOVA, 2021).

Por fim, as estruturas políticas e regulatórias muitas vezes ficam atrás dos avanços tecnológicos. Os governos precisam garantir que as leis e regulamentos evoluam para enfrentar as novas realidades da governança digital, como questões relacionadas ao governo eletrônico, identidade digital e tomada de decisões automatizada (BANNISTER; CONNOLLY, 2014). No entanto, o ritmo lento da reforma política, aliado à complexidade das dinâmicas políticas, pode atrasar a implementação de soluções digitais, deixando as administrações públicas operando em um vácuo legal ou dentro de estruturas desatualizadas (HEAVIN; POWER, 2018).

Os DTs são uma clara direção para a digitalização das cidades no aspecto físico, funcionando como modelos digitais que representam a cidade em suas características geométricas e espaciais. Dessa forma, os DTs oferecem uma maneira prática de documentar cidades de qualquer porte. Além de armazenar informações sobre vias, arborização, mobiliário urbano, infraestrutura de serviços, edificações, entre outros, os DTs podem estruturar uma plataforma organizacional que facilita o acesso a documentos variados relacionados a edificações, objetos ou regiões da cidade. Isso inclui parâmetros construtivos, histórico, licenças, contratos, ou qualquer outra informação relevante. Os DTs têm o potencial de desburocratizar e simplificar a vida de cidadãos, profissionais e servidores públicos. Eles podem otimizar processos relacionados a penalidades, aprovações de projetos, previsões de manutenção ou autorizações para instalações e eventos temporários. Além disso, os DTs permitem o levantamento de características físicas e análises imediatas, sem a necessidade de visitas presenciais ou vistorias. Em vez de realizar buscas em diferentes órgãos e autarquias, o acesso às informações seria feito de maneira unificada em uma plataforma com organização geoespacial e ontológica, proporcionando um sistema mais intuitivo e eficiente.

## 4 O Twin urbano

Os DTs, de maneira geral, podem variar largamente em escala e complexidade. Portanto, ele pode ser referente há um objeto ou ser a soma de vários DTs e outros modelos digitais (CALDARELLI et al., 2023). No contexto do planejamento e gestão urbana, um DT urbano (*Urban Digital Twin – UDT*), pode representar uma cidade inteira ou alguns de seus aspectos específicos, como, topografia, vias, praças, arborização, edifícios, redes de transporte público, rede elétrica, demanda de energia, energia renovável, mobilidade, infraestrutura rodoviária, abastecimento de água, esgoto, poluição sonora, inundações e climatologia (Figura 15) (SCHROTTER; HÜRZELER, 2020).

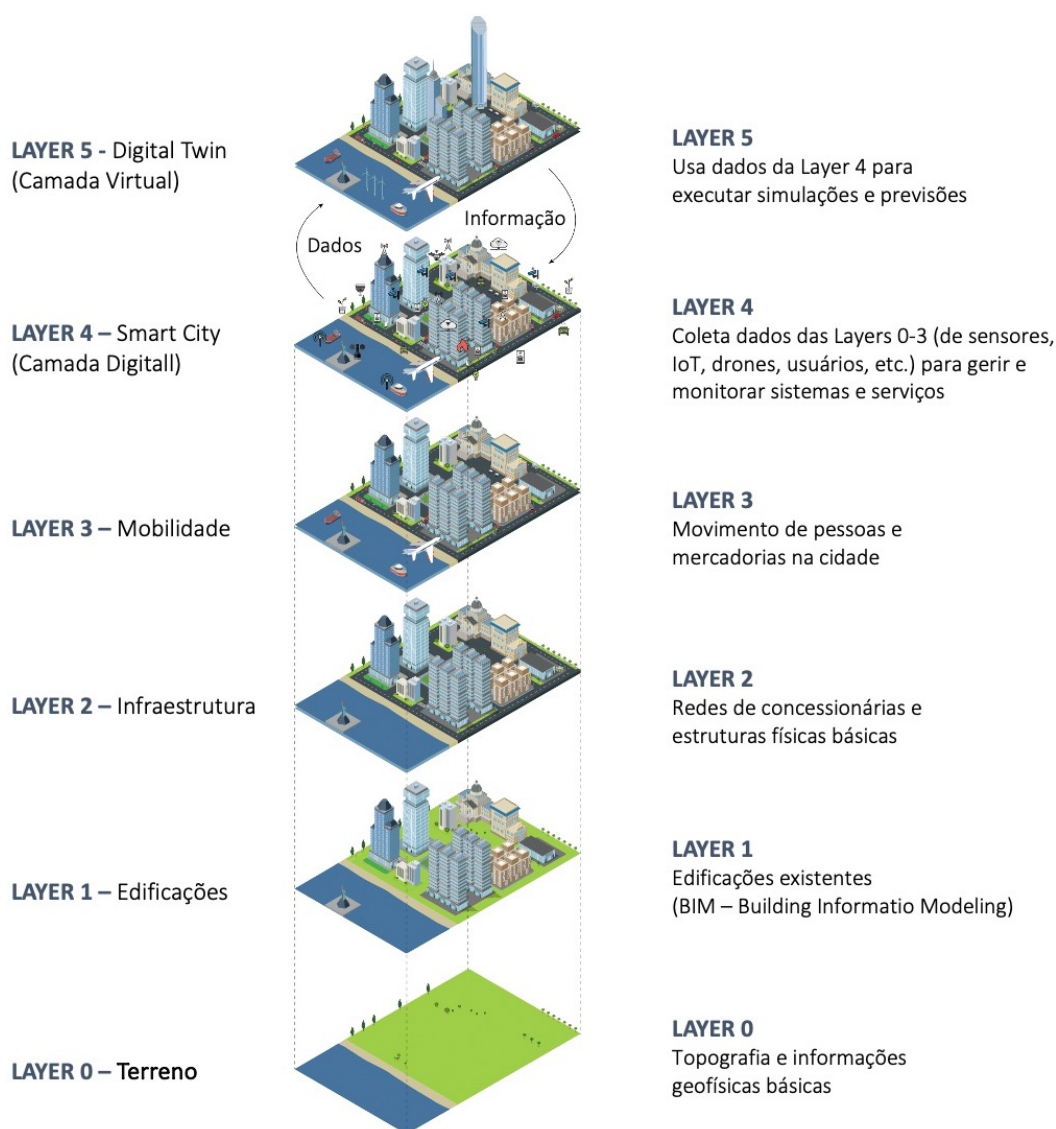


Figura 16. Características (Layers) de um UDT  
Fonte: Adaptado pelo autor, de (WHITE et al., 2021).

Os UDTs vem se tornando cada vez mais relevantes no campo do planejamento e gestão urbana, devido ao seu potencial para transformar a forma como as cidades são projetadas, monitoradas e melhorar a eficiência e eficácia de vários processos. No entanto, embora seja mais provável que os UDTs "*não sejam gêmeos idênticos e a noção de um espelho exato seja uma idealização que nunca será alcançada*" (BATTY, 2018). A ideia de aproximar cada vez mais um modelo digital da objeto real é de fato uma justificativa básica para a construção de modelos computacionais. Gerado pela revolução digital, o termo UDT foi recentemente adicionado ao arsenal de metáforas icônicas, como cérebro da cidade (*City Brain*) e urbanismo de plataforma (*Platform Urbanism*), no âmbito das cidades inteligentes sustentáveis (*Sustainable Smart Cities*). O UDT ganhou tração na otimização da gestão urbana, melhorando o planejamento urbano e contribuindo para o desenvolvimento de cidades inteligentes sustentáveis (FERRÉ-BIGORRA; CASALS; GANGOLELLS, 2022).

O UDT está sendo implementado em cidades inteligentes e se tornando uma rica fonte de informações sobre seus sistemas físicos, construções e suas formas espaciais (RUOHOMAKI et al., 2018). A maioria desses sistemas já foram modelados pelos UDTs existentes, especialmente no campo da sustentabilidade ambiental. Além disso, o UDT tem progredido e se expandido em paralelo com a AI, a IoT e o BD através dos avanços computacionais em especial na coleta e processamento de dados (AL-DABBAGH, 2022; BIBRI et al., 2023; GOURISARIA et al., 2023).

#### **4.1 Tecnologias associadas**

A evolução do conceito, assim como a eficiência e complexibilidade dos DTs, se deram paralelamente e subordinados a evolução das tecnologias envolvidas em todas as etapas, desde a aquisição de dados, no desenvolvimento e, assim como nas suas aplicações. Devido a diversidade de usuários e aplicações, a evolução mais familiar ao público geral está nos softwares de CAD 3D. Para os gestores, as evoluções de plataformas IoT e os modelos preditivos e de diagnósticos usando AI e redes neurais, são uma mudança de paradigma. No entanto, não é possível hierarquizar uma relevância, já que ferramentas de aquisição de dados como câmeras, sensores LIDAR, sensores híbridos,

instrumentos de altíssima precisão geográfica, veículos não tripulados e novas gerações de CPUs e GPUs, tem também participação determinante. É possível produzir DTs de praticamente qualquer objeto, como moléculas (ex. proteínas), peças industriais, fundos de corpos hídricos, cadeias de montanhas, edificações independentes, e cidades inteiras. Essa evolução tecnológica proporcionou uma importante redução de custos mas, especialmente, a habilidade de levar esses instrumentos onde anteriormente não era possível, por questões físicas, práticas ou orçamentárias. Outro grupo de softwares que contribuíram substancialmente são os softwares de fotogrametria, de pós processamento de dados, geradores de *point clouds*, integradores de formatos e, claro, os software GIS, que permitem uma integração espacial georreferenciada e gerencial e, os software BIM, que dão forma e interatividade para toda esta informação.













#### **4.1.1 Hardware**

Drones: Embora os satélites multiespectrais de alta resolução sejam amplamente reconhecidos (WU; LU; WU, 2023), os drones são a primeira ferramenta que vem à mente quando se fala de DTs em grande escala. Após o conceito original dos DTs e o contínuo avanço dos computadores e softwares de geração, o terceiro e, possivelmente, mais significativo salto no desenvolvimento dos UDTs foi a popularização dos drones nos últimos anos (ALIZADEHSALEHI; YITMEN, 2023; ZHENG et al., 2024). Essa evolução é o elo final que torna os DTs viáveis para diversas indústrias e escalas de produtores e consumidores, inclusive pequenas empresas ou pequenas municipalidades.

Com equipamentos semiprofissionais a partir de mil dólares, um empreendedor iniciante, com um investimento total inferior a 10 mil dólares, pode atender a praticamente todo o mercado potencial de DTs, especialmente na indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) (AMMAR et al., 2022). Drones com especificações capazes de satisfazer exigências de precisão, agilidade e qualidade podem ser adquiridos por cerca de cinco mil dólares. Equipamentos de última geração, que impulsionam o desenvolvimento e estabelecem novos padrões, custam a partir de quinze mil dólares, permitindo que pequenas prefeituras ou empresas possam atender demandas de qualquer complexidade e escala. O Quadro 3 apresenta exemplos de diferentes tecnologias, destacando suas principais características, aplicações e os investimentos necessários.



Quadro 3. Hardware Utilizados na Digitalização de sistemas físicos.

Hardwaree	Modelo	Características principais	Aplicação	Capacidade	Valor
<b>Drone Aéreo (UAV)</b>	 Air 2s	Da caixa para operação 20MP (1"CMOS) Facilidade de Manuzeio Alta Portabilidade	levantamento de objetos, edificações, terrenos e territórios de pequena a média escala, a partir de fotogrametria	30 min vôo 35ha @ 3cm/px Alcance 18km Vel. Max. 19m/s Alt. Max. 5.000m	<b>U\$1.000</b>
	 Mavic 3E	Da caixa para operação 20MP (4/3"CMOS) Facilidade de Manuzeio Alta Portabilidade RTK	levantamento de objetos, edificações, terrenos e territórios de pequena a média escala, a partir de fotogrametria	45 min vôo 50ha @ 3cm/px Alcance 32km Vel. Max. 21m/s Alt. Max. 6.000m	U\$5.000
	 Matrice 350 RTK	Resistência Climática RTK com correção angular Compatibilidade com equipamentos e sftware de terceiros	Levantamento de edificações, redes de transmissão, grandes infraestruturas, terrenos de média e larga escala, a partir de fotogrametria e LiDAR	55 min vôo 200ha @ 3cm/px Alcance 20km Vel. Max. 23m/s Alt. Max. 7.000m	U\$15.000
<b>Sensores Áereos (Drone)</b>	 Zenmuse P1	Camera com obturador mecânico 45mp (sensor 35,9x24mm)	Levantamento de edificações, redes de transmissão, grandes infraestruturas, terrenos e territórios de média e larga escala, a partir de fotogrametria de alta precisão	DF 24mm, DFVO 84° DF 35mm, DFVO 63,5° DF 50mm, DFVO 46,8°	U\$6.800
	 Zenmuse H30T	C. Teleobjetiva 40MP (1/1.8" CMOS) C. Grd. Angular 48MP (1/1.3" CMOS) Câmera térmica Ifravermelho Telêmetro Laser	Levantamento de edificações, redes de transmissão, grandes infraestruturas, áreas florestadas, territórios de média e larga escala, a partir de leitura térmica	DF 24 e 33,4 a 809mm DFOV: 82,1° e 66,7° - 2,9° DF 52mm, DFVO 45,2° Zoom 32x (400x digital) Fx Alcance: 3m – 3000m	U\$10.500
	 Zenmuse L2	LiDAR RGB 20MP (4/3"CMOS)	Levantamento de edificações, redes de transmissão, grandes infraestruturas, áreas florestadas, territórios de média e larga escala, a partir de leitura LiDAR	Deteção: 250/450m Precisão 2cm/150m 5 retornos Live view Point Cloud Vídeo 4K/30fps DF 24mm, DFOV: 84°	U\$13.500
<b>Sensores Terrestres Estacionários</b>	 BLK 360	LiDAR 4 Cameras 13MP	Levantamento interno	Precisão 4mm Alcance 0.5 a 45m 680.000 pts/sec	U\$27.000
	 RTC 360	Scanner laser 3D de alta velocidade 3 Cameras 36MP	Levantamento interno e fachadas	Precisão 6mm Alcance 0.5 a 130m 2.000.000 pts/sec	U\$90.000
<b>Sensores Terrestres Dinâmicos</b>	 Pegasus Backpack	Scanner laser 3D 5 Câmeras 20MP SLAM e IMU Integrados	Mapeamento Urbano Médio Porte	Alcance 200m precisão de 2cm Antena GNSS	U\$50.000
	 TRK700 Evo	2 scanners laser Câmera 360° Panorama de 24MP DMI Óptico e DMI mecânico 4 câmeras Butterfly 48MP Câmera frontal e pavimento 24MP SLAM e IMU Integrados	Mapeamento Urbano Médio/grande Porte	Tx. medição 2000 kHz velocidade 534Hz precisão de 1mm Antena GNSS 555 canais	U\$500.000
<b>Sensores Aeronauticos</b>	 CityMapper - 2	2 Cameras Nadir 150MP (RGB&NIR) 4 Cameras Obliq. 45 ° 150MP RGB Sensor LiDAR	Mapeamento Urbano Grande Porte	Alcance 300m a 5500m 8hs de aquisição	<b>U\$2.000.000</b>
<b>Smartphone!</b>	 Iphone 15 pro	C. Principal 48MP 24mm C. Teleobjetiva 12MP 48mm C. Teleobjetiva 12MP 120mm C. Ultra Angular 12MP 13mm Sensor LiDAR	levantamento de objetos, edificações, terrenos e territórios de pequena a média escala, a partir de fotogrametria e LiDAR	Zoom ótico +5x -2x Zoom digital 25x Vídeo 4K GPS GNSS	<b>U\$1.000</b>

Fonte: Elaboração própria a partir de dados: DJI, LEICA, APPLE

**Câmeras e Sensores:** A fotogrametria é a metodologia mais acessível para a geração de DTs. Em teoria, pode ser realizada com imagens de qualquer câmera, mas, quanto maior a resolução, o número de quadros, e a precisão das imagens e metadados, como distância focal e geotags, mais rápido e preciso será o processo,



resultando em maior precisão geométrica, geoespacial e melhor aparência do modelo. No final da última década, equipamentos com essas especificações custavam dezenas ou centenas de milhares de dólares. Hoje, é possível adquirir câmeras e sensores portáteis com capacidades iguais ou superiores, custando entre mil e dez mil dólares.

Outra metodologia amplamente utilizada na produção de DTs é o uso de sensores LiDAR, sozinhos ou combinados com câmeras ou sensores RGB. Esses sensores geram nuvens de pontos coordenados, similarmente à fotogrametria, mas sem a necessidade de processamento prévio dos dados. No final da última década, sensores LiDAR eram quase exclusivamente de uso militar, e suas versões civis custavam centenas de milhares de dólares. Esses equipamentos ainda são, em média, mais caros que as câmeras mencionadas, mas já há versões com preços semelhantes às de fotogrametria. Há também equipamentos de última geração que chegam a custar até dois milhões e meio de dólares, com capacidades e custos proporcionais ao tipo de trabalho.

Levantamentos complementares são necessários conforme os objetivos e necessidades do DT. Para elementos verticais e ambientes internos, são usados sensores terrestres, estacionários ou dinâmicos. Os sensores estáticos oferecem maior precisão geométrica e geoespacial, enquanto os dinâmicos capturam informações mais abrangentes. Para o levantamento de grandes áreas urbanas ao nível do solo, equipamentos como o TRK700 Evo, acoplável a automóveis (Figura 17A), são utilizados. A necessidade de dados aéreos precisos em áreas metropolitanas exige mais do que produtos tradicionais, pois ambientes urbanos em rápida transformação precisam de atualizações frequentes e eficientes das camadas base geoespaciais. O CityMapper-2, acoplável a aeronaves (Figura 17B), é projetado para o mapeamento urbano aéreo, combinando imagens oblíquas e LiDAR, proporcionando a mais alta resolução para capturar todos os detalhes da cidade.



Figura 17. A) Pegasus TRK700 Evo e B) CityMapper-2.  
Fonte: LEICA, 2024; ESTEIO, 2024

#### 4.1.2 Software

Desenvolver um DT envolve a integração de vários tipos de software. Seu desenvolvimento pode envolver um número ou sequência diferentes, mas de maneira geral, seguindo as etapas de desenvolvimento, as categorias de software associados são: Reality Capture, CAD, BIM, GIS, plataformas IoT, análise de dados e IoT, visualização 3D (realidade virtual e realidade aumentada), PLM, SCADA, plataformas de nuvem e alguns desenvolvidos de maneira personalizada.

Softwares de *Reality Capture* ou, Captura de Realidade, são ferramentas usadas para capturar, processar e visualizar ambientes e objetos do mundo real em formatos digitais. Oferecem recursos como a digitalização 3D, que utiliza dispositivos como LiDAR e scanners de luz estruturada para criar modelos 3D precisos. A fotogrametria é outro recurso chave, gerando modelos 3D a partir de fotografias tiradas de múltiplos ângulos. Os produtos gerados são: nuvens de pontos, que são coleções densas de pontos representando superfícies escaneadas; malhas poligonais a partir dessas nuvens de pontos; e mapa de texturas, que aumenta o realismo ao aplicar texturas aos modelos 3D. A integração com CAD, BIM e outras tecnologias de modelagem 3D garante um fluxo de trabalho contínuo. Alguns dos softwares mais utilizados são RealityCapture, conhecido por sua velocidade e eficiência na criação de modelos 3D a partir de fotografias e digitalizações a laser; Autodesk ReCap, que se integra com a suíte de softwares de design da Autodesk; Agisoft Metashape, uma ferramenta de fotogrametria para modelos 3D de alta resolução; Pix4D, usada para mapeamento com drones e fotogrametria em levantamento e agricultura; ArcGis Reality (Figura 18) integra

diretamente com plataformas GIS e reúne todo o processo em um único ambiente; e Meshroom, um software de fotogrametria de código aberto (REBIM; OPENSOURCE AI; IMAGINIT; ATODESK).

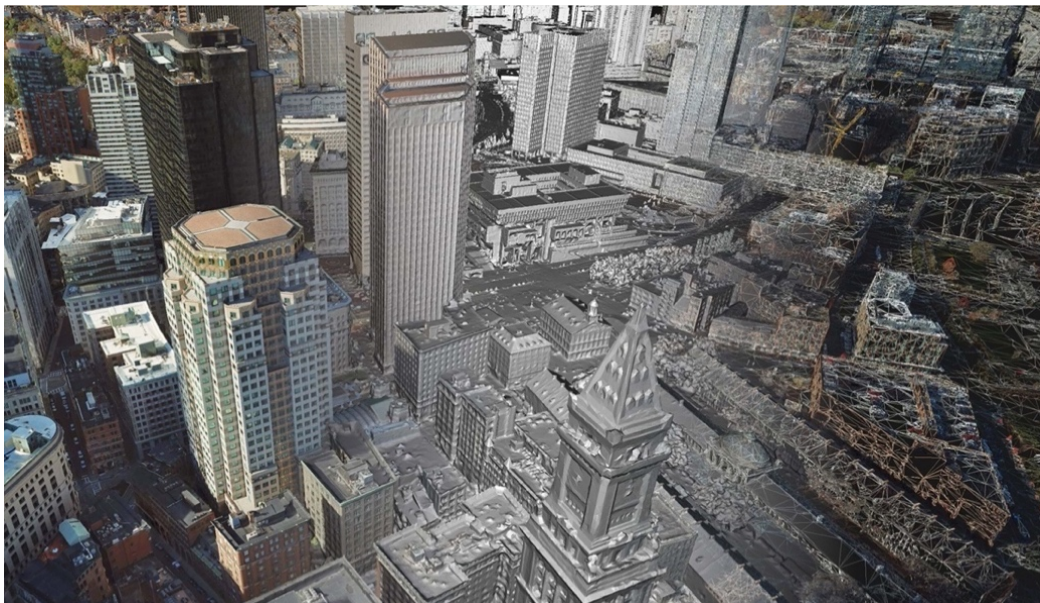


Figura 18. Mesh 3D processada por ArcGIS Reality  
Fonte: ESRI, 2024

*Computer-Aided Design* (CAD) é uma categoria de software utilizada por designers, engenheiros, arquitetos e outros profissionais para criar desenhos precisos e ilustrações técnicas. Ele suporta tanto o desenho em 2D quanto a modelagem em 3D, permitindo o design de tudo, desde componentes mecânicos intrincados até grandes estruturas arquitetônicas. O software CAD é renomado por sua precisão e exatidão, permitindo que os usuários produzam designs com especificações exatas e medidas detalhadas (GORDON, 2018). Personalização e automação são características-chave, permitindo aos usuários otimizar tarefas repetitivas e ajustar o software às suas necessidades específicas (BERMAN & LASKY, 2021). A integração com outros sistemas, como ferramentas de Gestão do Ciclo de Vida do Produto, ou *Product Lifecycle Management* (PLM) e Fabricação Assistida por Computador, ou *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), aprimora o fluxo geral de design e fabricação (WANG et al., 2019). Programas CAD populares incluem: AutoCAD, que suporta uma ampla gama de funcionalidades para design de engenharia, arquitetura e construção; SolidWorks, software de modelagem 3D paramétrica que é muito utilizado em engenharia mecânica; e PTC Creo, que inclui recursos como modelagem direta e paramétrica, além de ferramentas de simulação e análise.

Os software de *Building Information Modeling* (BIM) são utilizados na arquitetura, engenharia e construção para criar e gerenciar modelos 3D detalhados de projetos de construção. Diferentemente dos métodos tradicionais de desenho, os software BIM, como mostrado na Figura 19, permitem a integração de vários aspectos de um projeto em um único modelo abrangente, que inclui não apenas o design geométrico, mas também informações sobre materiais, sistemas e relações espaciais (EASTMAN et al., 2018). Este software facilita a coordenação dos processos de design e construção ao permitir a colaboração em tempo real entre os membros da equipe e ainda se integram com outras ferramentas e sistemas, como software de gestão de projetos e estimativas de custos, fornecendo uma estrutura abrangente para gerenciar projetos complexos (SMITH, 2014). Os software BIM populares incluem: Autodesk Revit, com interface intuitiva, ferramentas de visualização poderosas e uma comunidade de usuários ativa; ArchiCAD, popular entre arquitetos por sua flexibilidade e ferramentas específicas para design arquitetônico, que permite modelagem 3D focada no design, documentação automática e colaboração em tempo real via BIMcloud; e MicroStation, ideal para projetos complexos e de grande escala, onde oferece modelagem detalhada para infraestrutura e transporte (GUERIN, 2020).

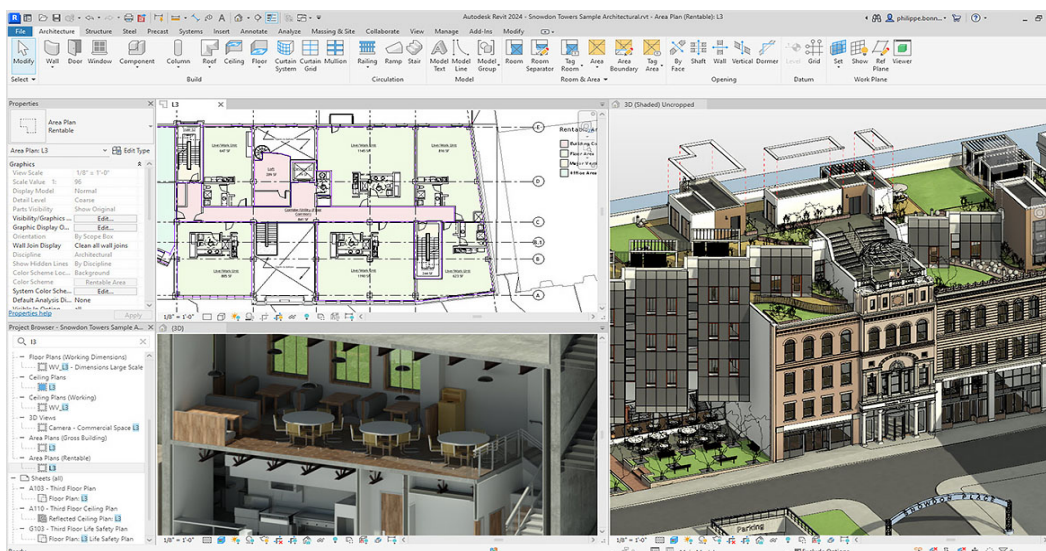


Figura 19. Interface Autodesk Revit  
Fonte: AUTODESK, 2024

Os software de *Geographic Information Systems* (GIS) são a base da estruturação espacial e geográfica entre componentes de um DT, ou entre DTs distintos. Estes softwares podem capturar, analisar e visualizar dados espaciais e geográficos, permitindo que usuários criem mapas detalhados e realizem análises



espaciais, integrando diversos conjuntos de dados (Figura 20), como imagens de satélite, informações demográficas e dados ambientais, para revelar padrões, relações e tendências que não são imediatamente aparentes por outros métodos (HEYWOOD et al., 2011; LONGLEY et al., 2015). Estes, também permitem realizar tarefas como mapeamento de infraestrutura, análise do uso do solo e avaliação dos impactos ambientais. Ao fornecer ferramentas para consultas espaciais, geocodificação e visualização de dados, o GIS auxilia nos processos de tomada de decisão e planejamento, sendo recurso importante em áreas como planejamento urbano, gestão ambiental, transporte e saúde pública (MILLER & HAN, 2019). A integração GIS com outras tecnologias, como sensoriamento remoto e GPS, potencializa ainda mais suas capacidades, permitindo análises espaciais mais precisas e abrangentes (CHANG, 2015). ArcGIS é o software de referência, com ferramentas de integração de dados, análise espacial e geoprocessamento, permite que os usuários obtenham percepções acionáveis a partir de dados espaciais complexos. Este software também oferece soluções em nuvem, facilitando a colaboração e o compartilhamento de dados em várias plataformas. QGIS (Quantum GIS) é uma opção de código aberto altamente customizável, oferecendo ferramentas robustas de edição e criação de mapas, além de suporte a plugins e integração com bases de dados espaciais.



Figura 20. Metadados em plataforma GIS.  
Fonte: ESRI, 2024

Os software e as plataformas de *Internet of Things* (IoT), fundamentais para a operação e atualização *Real-time* dos DTs, fornecem uma infraestrutura essencial para conectar dispositivos e sensores diversos, gerenciar protocolos de comunicação bem como garantir a segurança e interoperabilidade dos dados nos ecossistemas de IoT. Os IoTs facilitam a coleta, análise e visualização de dados provenientes de diversos dispositivos, permitindo monitorar e controlar sistemas remotamente e em tempo real (ASHTON, 2009). Frequentemente, esses softwares oferecem ferramentas para o desenvolvimento, implantação e gerenciamento de aplicações e serviços IoT, como manutenção preditiva, automação de casas inteligentes e monitoramento industrial (SANTOS et al., 2016). Algumas das plataformas incluem: ThingWorx, projetada para criar, implantar e operar soluções de IoT industrial, e que oferecem ferramentas para conexão de dispositivos, análise de dados e desenvolvimento de aplicações; Azure IoT Suite, um conjunto de serviços para a criação de soluções IoT, incluindo IoT Hub para comunicação de dispositivos, Stream Analytics para processamento de dados em tempo real e, DTs para modelagem de ambientes físicos; e Watson IoT, que facilita a conexão de dispositivos IoT, coleta de dados e aplicação de AI para análise avançada e insights.

Os software de análise de dados e IA são ferramentas essenciais para extrair insights valiosos de grandes volumes de dados e automatizar processos complexos de tomada de decisão. Através do processamento e interpretação dos dados, descobrem-se tendências, padrões e anomalias. Esses software incluem ferramentas para análise estatística, visualização de dados e geração de relatórios, que ajudam as organizações a tomar decisões informadas com base em evidências empíricas (CHAUDHURI et al., 2011). O software de IA pode automatizar tarefas repetitivas, aprimorar a análise de dados e fornecer análises preditivas ao aprender com dados históricos e adaptar-se à novas informações (RUSSELL & NORVIG, 2020). Esses sistemas, frequentemente utilizam algoritmos e modelos para processar e interpretar dados, possibilitando aplicações como sistemas de recomendação, detecção de fraudes e veículos autônomos (GOODFELLOW et al., 2016). *TensorFlow* é uma biblioteca de código aberto para *Machine Learning*, que permite a construção e o treinamento de modelos de rede neural para uma variedade de aplicações, desde reconhecimento de imagem até processamento de linguagem natural (Figura 21). Alguns exemplos são: *Apache Spark*, que possui

um mecanismo de processamento de dados de código aberto e que fornece um sistema unificado para processamento em lote e streaming, que é amplamente usado para análise de BD, *Machine Learning* e processamento gráfico; *MATLAB*, que consiste em uma plataforma de computação numérica e programação que oferece um ambiente integrado para desenvolvimento de algoritmos, visualização de dados, análise de dados e simulação, sendo especialmente utilizado em engenharia, ciência e economia.

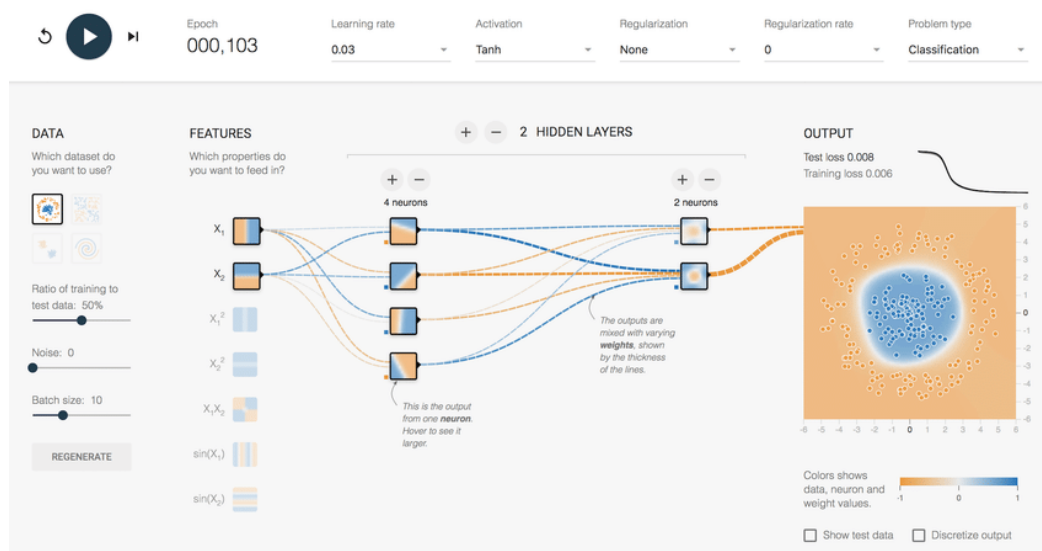


Figura 21. Rede Neural Simples em TensorFlow  
Fonte: PAULO CHAO, 2018

A visualização 3D e Realidade Virtual/Aumentada, ou *Virtual Reality/Augmented Reality* (VR/AR), são ferramentas transformadoras usadas para criar experiências digitais imersivas e interativas. O software de visualização 3D permite a criação de modelos tridimensionais que podem ser manipulados e visualizados de qualquer ângulo, proporcionando uma representação realista de objetos, ambientes e dados. Estes, são muito utilizados em indústrias como arquitetura, engenharia, entretenimento e saúde para tarefas como design de produtos, visualização arquitetônica e imagens médicas (KAMEL BOULOS et al., 2017). Os software de VR criam ambientes virtuais totalmente imersivos que os usuários podem explorar e interagir usando headsets e controladores de VR. Essa tecnologia já é empregada em jogos, simulações de treinamento, tours virtuais e aplicações terapêuticas (BURDEA & COIFFET, 2003). Por outro lado, o software de AR sobrepõe informações e objetos digitais ao mundo real através de dispositivos como smartphones, tablets e óculos de AR. Ele complementa os

ambientes do mundo real com elementos interativos e é usado em aplicações como navegação, indústria AEC, educação, varejo e manutenção industrial (AZUMA, 1997). Softwares de visualização 3D inclui Autodesk 3ds Max, Blender e SketchUp, que oferecem ferramentas robustas de modelagem, renderização e animação. As principais plataformas de VR/AR incluem Unity (Figura 22) e Unreal Engine, as quais fornecem estruturas abrangentes para desenvolver experiências imersivas de VR e AR (JERALD, 2015).

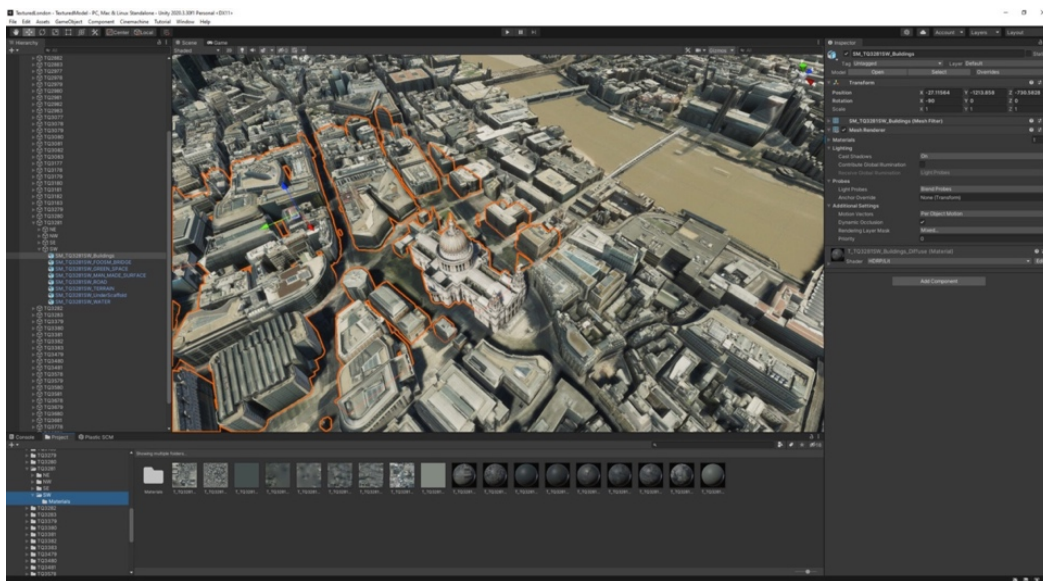


Figura 22. Interface Unity 3D.  
Fonte: UNITY, 2014

Gestão do Ciclo de Vida do Produto (Product Lifecycle Management - PLM) é uma abordagem estratégica de negócios que integra pessoas, processos, sistemas e informações para gerenciar todo o ciclo de vida de um produto, desde a concepção até o descarte. Softwares de PLM fornecem um repositório centralizado de todas as informações relacionadas ao produto, facilitando a colaboração e garantindo que dados precisos estejam acessíveis para as partes interessadas ao longo do ciclo de vida (STARK, 2011). Esses softwares otimizam o desenvolvimento de produtos, oferecendo ferramentas para a gestão de projetos, documentos e mudanças, aumentando a eficiência e produtividade. Além disso, promovem uma melhor coordenação entre equipes multifuncionais e reduzem o tempo de lançamento de novos produtos (GRIEVES, 2006).

As principais funcionalidades dos softwares PLM incluem integração com design assistido por computador (CAD), gestão de lista de materiais (BOM) e automação de fluxos de trabalho. Soluções líderes de PLM, como Siemens



Teamcenter, PTC Windchill e Dassault Systèmes ENOVIA, oferecem recursos abrangentes que atendem a diversas indústrias, desde automotiva e aeroespacial até bens de consumo e eletrônicos (EIGNER & ROUBANOV, 2014).

As plataformas de nuvem fornecem acesso sob demanda a recursos de computação, como armazenamento e poder de processamento via internet (Figura 23). Elas permitem que as empresas implantem, gerenciem e dimensionem aplicativos sem necessidade de investir em infraestrutura física, resultando em economia de custos e eficiência operacional (ARMBRUST et al., 2010). As principais modalidades incluem Infraestrutura como Serviço (IaaS), Plataforma como Serviço (PaaS) e Software como Serviço (SaaS), que permitem o acesso a recursos virtualizados, ferramentas de desenvolvimento e aplicativos online (MELL & GRANCE, 2011).

Os benefícios das plataformas de nuvem incluem escalabilidade, flexibilidade e opções robustas de recuperação de desastres, permitindo o ajuste de recursos conforme a demanda, o trabalho remoto e a garantia de segurança dos dados (BUYA et al., 2013). As principais plataformas incluem Amazon Web Services (AWS), que oferece serviços como IoT, análise, machine learning e bancos de dados; Microsoft Azure, que fornece armazenamento, bancos de dados e inteligência artificial; e Google Cloud Platform (GCP), com infraestrutura e ferramentas para IoT, Machine Learning e análise de grandes dados, como o Google Cloud IoT Core, que facilita a conexão e gestão de dispositivos IoT em escala global.



Figura 23. Infográfico Plataformas de Nuvem  
Fonte: METAMORWORKS | GETTY IMAGES/ISTOCKPHOTO

Quando há a necessidade ou disponibilidade de recursos técnicos e financeiros, são desenvolvidos software personalizados usando principalmente Python - linguagem de programação de alto nível, amplamente utilizada para desenvolvimento web, automação, análise de dados, AI e *Machine Learning*. A escolha de ferramentas e plataformas específicas vai depender dos requisitos da aplicação do DT, como a complexidade do sistema a ser modelado, a necessidade de processamento de dados em tempo real e o nível de detalhe necessário na simulação e análise (FARSI et al., 2020).

## 4.2 Potenciais do Digital Twin Urbano

As cidades vêm crescendo em tamanho, mas especialmente em desafios. O aumento global da população urbana, as consequências das mudanças climáticas, a digitalização de informações e serviços, somados a um crescente estoque de edificações e infraestruturas urbanas obsoletas ou subutilizadas, sintetizam um cenário sem precedentes. Novas teorias urbanísticas, novas tecnologias construtivas, novos conceitos de mobilidade e logística, e a renaturalização do tecido e franjas urbanas, se somam para dar respostas efetivas à essas questões apresentadas (BUSH; DOYON, 2019; SOFESKA, 2017).

Mas como fazer uma sistematização desse diagnóstico generalizado nas suas distintas expressões locais? Como definir prioridades de maneira não subjetiva? Como avaliar a efetividade das aplicações dessas teorias e tecnologias? Ainda, como executar essas possíveis soluções de maneira economicamente viável e sem criar novos impactos sociais, culturais e ambientais? Cada cidade, cada bairro, ou mesmo cada localidade, tem suas particularidades em termos de características geográficas, morfologia urbana, características sociais e culturais, hábitos e usos, condições e exposição climática, recursos, etc. Um volume muito alto e variado de características fundamentalmente relevantes para a determinação de qualquer intervenção. Como reunir um volume exorbitante de informações de naturezas tão distintas, em algo acessível e compreensível para atores – ou mesmo observadores – com formação, conhecimento e objetivos variados? Os modelos de documentação, apresentação e representação dessas informações praticados atualmente, são compreensivos apenas pelos profissionais das áreas de conhecimento de quem os gerou e poucos outros com alguma experiência relacionada (BALOGUN et al., 2020; LYONS et al., 2018).

#### **4.2.1 Extremização climática e escassez de recursos**

Objetivando a resiliência climática e gestão de desastres, os DTs permitem que as cidades simulem e se preparem para potenciais desastres naturais e emergências, identificando áreas vulneráveis, desenvolvendo planos de resposta robustos e infraestruturas resilientes. A eficácia das medidas e projetos propostos em resposta, podem ser verificadas fielmente sem qualquer intervenção física ou empenho de recursos. Isto é especialmente eficaz com o uso crescente de soluções baseadas na natureza que atuam duplamente tanto na resiliência às emergências climáticas como na melhoria imediata do clima e do ambiente natural (FAN et al., 2021). Os DTs também promovem eficiência energética e sustentabilidade ambiental, pois ajudam no desenvolvimento de ambientes urbanos sustentáveis, fornecendo informações sobre padrões de consumo de energia, gestão de resíduos e emissões. Esta compreensão baseada em dados históricos, monitorização contínua e projeções precisas pode identificar oportunidades para melhorar a eficiência no consumo e geração energética, permite a implementação de políticas urbanas que reduzem as pegadas de carbono e outros impactos ambientais (CHEN et al., 2023; FRANCISCO; MOHAMMADI; TAYLOR, 2020a).

O conceito de UDT está emergindo como uma ferramenta inovadora no planejamento e gestão de infraestruturas urbanas, incluindo infraestruturas verdes, soluções baseadas na natureza e eficiência energética. A principal vantagem do UDT no contexto das infraestruturas verdes, é a sua capacidade de integrar dados complexos, como topografia, vegetação, biodiversidade e fluxos de água, facilitando a tomada de decisões baseada em evidências para a implementação de soluções ecológicas, como parques urbanos, corredores verdes e sistemas de drenagem sustentável. Segundo Batty (2018), o UDT permite modelar o impacto de diferentes infraestruturas em termos de mitigação de ilhas de calor, aumento da biodiversidade e melhor gestão das águas pluviais, contribuindo para a criação de cidades mais resilientes e sustentáveis.

As soluções baseadas na natureza (SbN) são estratégias cada vez mais adotadas para enfrentar os desafios ambientais urbanos, como enchentes, poluição do ar e degradação de habitats. Nesse contexto, o UDT oferece um ambiente dinâmico e interativo que simula como essas soluções podem ser implementadas de maneira mais eficiente. Além disso, o UDT pode prever o desempenho dessas

SbN ao longo do tempo, considerando fatores climáticos e a evolução do uso do solo. As simulações fornecem informações essenciais sobre a viabilidade e o impacto econômico e social das SbN, apoiando a gestão adaptativa das cidades. De acordo com Xu *et al.* (2020), essas simulações ajudam a alinhar melhor os projetos de infraestruturas verdes com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (SDGs), especialmente o SDG 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e o SDG 13 (ação contra a mudança global do clima).

No campo da eficiência energética, os UDTs desempenham um papel crucial ao otimizar o consumo de energia em edifícios e redes urbanas. Eles podem integrar dados de consumo em tempo real, modelar fluxos de energia e sugerir intervenções para reduzir a pegada de carbono das cidades (FRANCISCO; MOHAMMADI; TAYLOR, 2020). Isso inclui a análise do potencial de fontes renováveis, como painéis solares e a otimização de sistemas de iluminação e aquecimento, além da promoção de um uso mais eficiente dos recursos energéticos. Segundo Yan *et al.* (2021), a aplicação de UDTs em estratégias de eficiência energética pode contribuir diretamente para o SDG 7 (energia Acessível e limpa) e o SDG 13, garantindo que as cidades sejam mais autossuficientes e resilientes em relação às mudanças climáticas.

Portanto, o uso de DTs no planejamento e gestão urbanos é uma inovação tecnológica que pode transformar a maneira como as cidades abordam as infraestruturas verdes, soluções baseadas na natureza e a eficiência energética. Ao integrar dados em tempo real, simulações avançadas e cenários preditivos, os UDTs permitem que os gestores urbanos alinhem suas ações de maneira eficaz com os SDGs, promovendo cidades mais sustentáveis, resilientes e eficientes.

#### **4.2.2 Rápida urbanização e crescimento populacional**

Os DTs fornecem uma plataforma para experimentações de projetos urbanos a longo prazo. À medida que as cidades evoluem e se expandem, os DTs podem adaptar-se para incluir novos desenvolvimentos, modelos ambiental e logístico. Por exemplo, podem ser facilmente executados em possíveis cenários urbanos futuros, apoiando ou orientando uma mudança na direção dos desenvolvimentos em curso (DENG; ZHANG; SHEN, 2021). Com a ajuda de DTs, os gestores podem modelar e analisar padrões de tráfego, uso de transporte público e movimento de pedestres. Esta visão, permite a otimização das redes de transporte,

prevendo pontos de congestionamento e analisando o impacto de novos projetos de transporte (YEON et al., 2023).

No contexto da periurbanização, fenômeno que envolve a expansão desordenada das áreas urbanas para regiões periféricas, os UDTs se destacam como uma ferramenta de planejamento estratégico. Ao criar um modelo digital que espelha essas áreas, é possível monitorar o desenvolvimento em tempo real e prever os impactos do crescimento descontrolado, como a perda de áreas agrícolas e o aumento da pressão sobre os recursos naturais. Além disso, o UDT facilita a análise de dados sobre a ocupação do solo, possibilitando aos gestores públicos tomarem decisões mais informadas e desenvolverem políticas que evitem a fragmentação espacial e social dessas áreas. Estudos como o de Batty (2018), sugerem que o uso de gêmeos digitais pode contribuir para a criação de cidades mais resilientes e sustentáveis, especialmente em áreas de rápida transformação urbana.

Na gestão territorial, o UDT permite uma abordagem mais integrada e eficiente. Ele facilita o monitoramento contínuo dos recursos territoriais, fornecendo uma visualização dinâmica que pode ser usada para planejar infraestrutura, redes de transporte e sistemas de saneamento, de acordo com as necessidades futuras da população. O uso de um modelo digital, com base em dados geoespaciais e simulações, auxilia na identificação de zonas de vulnerabilidade, como áreas de risco de inundações, e permite a criação de cenários de desenvolvimento que respeitem as limitações ambientais e geográficas. Assim, os planejadores urbanos podem prever os efeitos de diferentes políticas de uso do solo e mitigá-los antes que se tornem problemas reais. De acordo com estudos de Kandt e Batty (2021), o UDT pode revolucionar a forma como a gestão territorial é conduzida.

Em relação à mobilidade urbana, o UDT oferece uma vantagem significativa ao permitir a simulação de sistemas de transporte em tempo real. Essa ferramenta pode prever gargalos, otimizar rotas e melhorar o fluxo de tráfego, além de integrar diferentes modalidades de transporte, como ônibus, trens e bicicletas, em um sistema coeso e eficiente. Com a expansão das cidades, principalmente em regiões periurbanas, o aumento das demandas por transporte é inevitável, e a capacidade de antecipar esses desafios é crucial. A modelagem digital também permite avaliar o impacto de políticas públicas voltadas para a

mobilidade, como a criação de vias exclusivas para transporte público ou cicloviárias, contribuindo para a redução de emissões de gases poluentes e a promoção de um transporte mais sustentável. Segundo Souza e Silva (2020), a adoção de gêmeos digitais em projetos de mobilidade urbana tem o potencial de transformar a infraestrutura de transporte em cidades, promovendo maior eficiência e sustentabilidade no longo prazo.

Assim, o UDT se posiciona como uma solução inovadora e eficaz para lidar com os desafios trazidos pela urbanização acelerada, proporcionando ferramentas poderosas para uma melhor gestão da periurbanização, do território e da mobilidade urbana. Ao oferecer simulações precisas e em tempo real, ele permite a construção de cidades mais sustentáveis, resilientes e preparadas para o futuro.

#### **4.2.3 Transformação digital e integração tecnológica**

Como mencionado anteriormente, em um DT, podemos sobrepor consagradas ferramentas computacionais como GIS, CAD e BIM, com redes de sensores IOT, monitoramento por vídeo, monitoramento climático e inputs humanos. Assim, se constrói um ambiente único integrando monitoramento, gestão e simulação. Este ambiente fornece ainda uma rica e precisa base de dados e campo de teste para processos de *Machine Learning* e aplicação de AI (DENG; ZHANG; SHEN, 2021).

Com a implementação de UDTs, as cidades podem promover uma governança mais transparente e inclusiva. Os dados e simulações gerados podem ser compartilhados com os cidadãos, permitindo uma maior participação pública no planejamento urbano e na tomada de decisões. Isso pode fortalecer a confiança entre a população e as autoridades e garantir que as políticas urbanas atendam melhor às necessidades da comunidade. Os DTs podem ser utilizados como uma ferramenta de comunicação para envolver os cidadãos no planejamento e na tomada de decisões nos processos de planejamento urbano. Ao oferecer representações interativas e acessíveis dos planos de desenvolvimento da cidade, os residentes podem visualizar e compreender melhor as mudanças propostas e fornecer feedback valioso. Esta interação permite que os urbanistas criem projetos mais inclusivos e voltados para a comunidade, levando a uma maior satisfação e aceitação dos planos de desenvolvimento urbano (WHITE et al., 2021).

A criação de uma cidade inteligente é um processo complexo e de longo prazo, cujo êxito depende da implementação precisa de soluções de planejamento e da realização contínua dos objetivos de design e operação (BIBRI; KROGSTIE, 2017). Esses objetivos, requerem um suporte eficiente da tecnologia digital em todas as fases: planejamento, construção, operação e gestão. Conceitos fundamentais das cidades inteligentes incluem o compartilhamento de rede, a integração intensiva de sistemas, o desenvolvimento colaborativo e o uso eficiente dos recursos de informação urbana (SILVA; KHAN; HAN, 2018).

Nesse contexto, o UDT emerge como uma tecnologia estratégica para impulsionar a sustentabilidade das cidades inteligentes (MALIK et al., 2018). Diferentemente das aplicações na indústria, a tecnologia do UDT simula o comportamento de entidades físicas ao longo de seus ciclos de vida usando uma representação virtual do mundo físico, sincronizando conexões virtuais e reais em tempo real através de sensores diversos (MYLONAS et al., 2021). Essa abordagem transforma a concepção das cidades inteligentes em realidade (NOCHTA et al., 2021), promovendo o *City Information Model* (CIM), para além da modelagem, possibilitando a simulação, monitoramento e análise.

O CIM digitaliza alvos físicos em uma cidade, tanto acima quanto abaixo do solo, dentro e fora de edifícios, capturando estados de tempo e espaço para fornecer uma representação digital precisa das características físicas e funcionais da cidade em escala urbana. Além disso, estabelece uma definição padrão de informações para gerenciamento de sistemas, redes, aplicativos e serviços, permitindo a coleta de dados valiosos para futuras inovações e transformações. Utilizando um espelho digital da cidade, as cidades inteligentes são capazes de perceber, analisar e integrar informações críticas dos sistemas centrais para operações urbanas (YIGITCANLAR et al., 2019). A implementação bem-sucedida de uma cidade inteligente envolve a adoção de um modelo CIM robusto, a integração de funcionalidades de gerenciamento automático de informações através da tecnologia do UDT, e a realização de simulações avançadas e previsões para lidar com problemas urbanos complexos, multidimensionais e multiescalares. Pesquisas recentes indicam que o CIM combina dados GIS com BIM e sensores de IoT, para criar uma abordagem integrada e poderosa para o planejamento urbano (Figura 24) (SOUZA; BUENO, 2022).

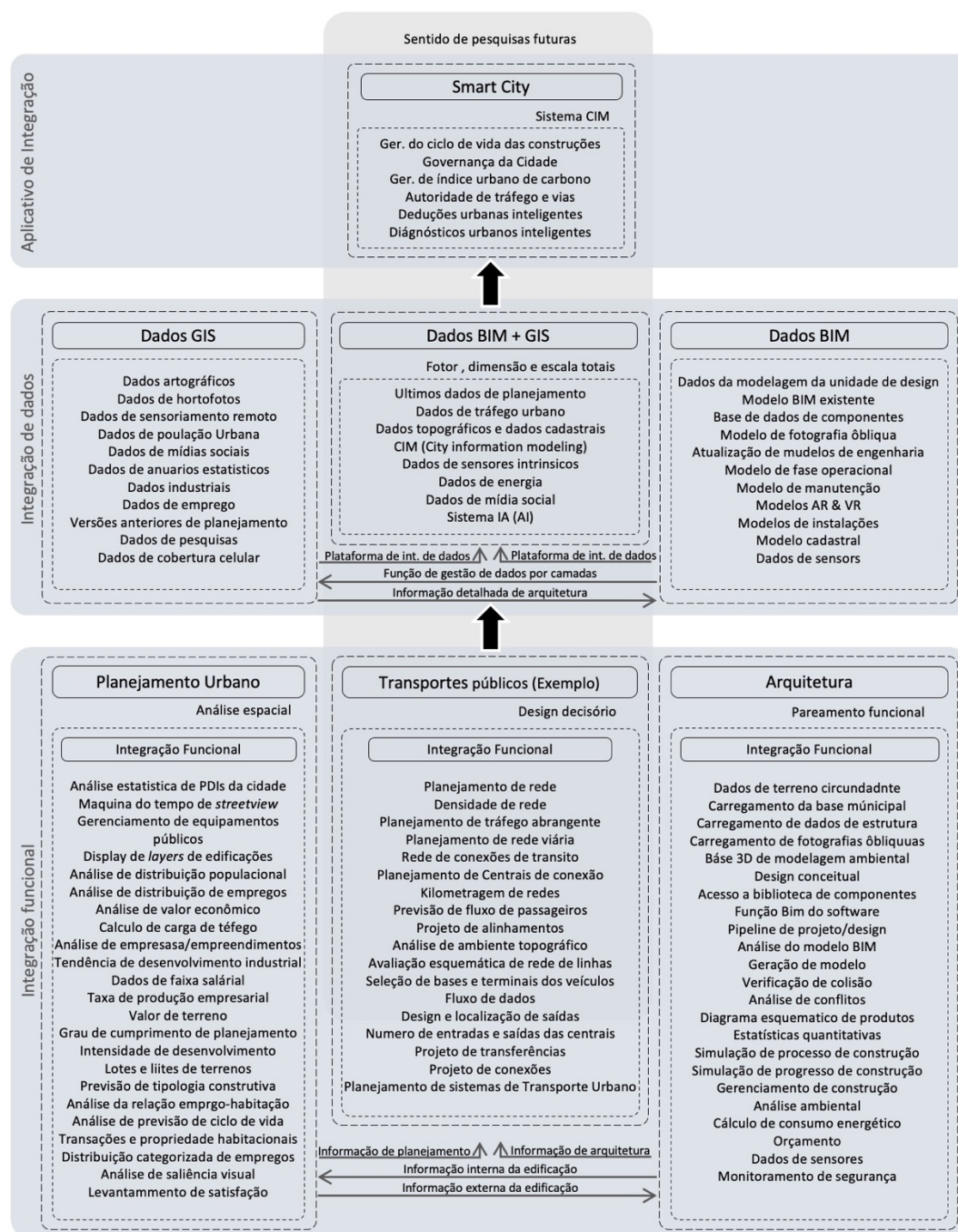


Figura 24. Estrutura de desenvolvimento de integração GIS e BIM.

Adaptado pelo autor de: (XIA et al., 2022)

Para a escala urbana, o GIS possui uma vantagem natural no manuseio de dados, utilizando uma lógica hierárquica *tile-based* de processamento, que pode significativamente reduzir a carga computacional de hardware (Zhao et al., 2016). A combinação de GIS e BIM se complementa em termos de escala e precisão de pesquisa, funcionando como fontes de dados mútuas e insights contextuais. Essa integração adequada de dados internos e externos, forma aplicações que abrangem todo o ciclo de vida do planejamento urbano, arquitetura, transporte e engenharia municipal. No contexto dos UDTs, a integração de GIS e BIM é uma abordagem



fundamental e a tecnologia básica para a realização de cidades inteligentes (GAO et al., 2021; MANNINO; DEJACO; RE CECCONI, 2021).

### 4.3 Desafios para aplicação dos DTs no PGU

O conceito de UDTs está emergindo como uma ferramenta revolucionária para a gestão e o planejamento urbanos, permitindo a criação de réplicas digitais detalhadas das cidades. No entanto, a implementação e desenvolvimento desses UDTs enfrentam uma série de desafios significativos.

- **Integração de dados.** Os dados necessários para criar UDTs provêm de diversas fontes, como sensores IoT, sistemas de transporte, redes de energia, serviços públicos e redes sociais, como já mencionado. Integrar essas fontes de maneira coesa é um desafio técnico significativo. A falta de padrões comuns para os dados urbanos dificulta ainda mais a integração e a interoperabilidade entre diferentes sistemas e plataformas (JANSSEN; VAN DER VOORT, 2016; WONG; GE; HE, 2018).
- **Qualidade e a Atualização dos dados.** A precisão e a confiabilidade dos dados são cruciais para a exatidão dos DTs, pois dados imprecisos ou desatualizados podem levar a representações incorretas da realidade urbana. Manter os dados atualizados em tempo real é um desafio contínuo, especialmente em áreas com infraestrutura tecnológica limitada (MEIJER; BOLÍVAR, 2016; SHRUTI et al., 2022).
- **Escala.** A escalabilidade pode ser uma solução para viabilidade, mas também apresenta desafios consideráveis. A criação e manutenção de UDTs para grandes áreas urbanas exigem grande capacidade de processamento e armazenamento de dados, e os custos associados ao desenvolvimento, implementação e manutenção desses sistemas podem ser proibitivos para muitas cidades, especialmente em países em desenvolvimento (KSHETRI, 2021).
- **Privacidade e segurança.** O uso de grandes volumes de dados pessoais e sensíveis, levanta preocupações significativas sobre privacidade, tornando essencial a proteção dos dados contra acessos não autorizados. Além disso, UDTs são alvos potenciais para ataques cibernéticos, o que exige medidas robustas de segurança para proteger as infraestruturas críticas (JANSSEN et al., 2017; LUNA-REYES; GIL-GARCIA, 2014).

- **Legislação.** A regulamentação pode afetar o desenvolvimento de UDTs e, legislações específicas podem ser necessárias para lidar com questões de privacidade, uso de dados e responsabilidade. Determinar a propriedade dos dados e como eles podem ser utilizados é uma questão complexa, especialmente em contextos com múltiplos *stakeholders* (BELYAKOVA, 2021).
- **Interoperabilidade e padronização.** A compatibilidade entre os diversos sistemas utilizados pelas cidades é um problema significativo, e estabelecer padrões comuns é essencial para garantir que diferentes sistemas possam operar em conjunto de forma eficiente. A colaboração entre os setores público e privado, bem como entre diferentes níveis de governo, é necessária para desenvolver e implementar UDTs eficazes (HARRISON; VERA; AHMAD, 2021).
- **Engajamento e a capacitação.** também são fundamentais. A aceitação pública dos UDTs é crucial para o sucesso de sua implementação e, é importante que os cidadãos compreendam e aceitem os benefícios desses sistemas. Engajar a população e os *stakeholders* é vital, assim como investir em capacitação e treinamento para superar a escassez de profissionais qualificados necessários para desenvolver, implementar e manter UDTs (O'DONNELL, 2021).

## 5 Digital Twins na prática

Neste capítulo, estão apresentados exemplos notórios e representativos em aplicação. A seleção foi feita baseada em pioneirismo e estado da arte tecnológico, recursos e aplicações diferenciadas, bem como representatividade regional. Foram feitos estudos de caso destacando alguns dos principais recursos de cada modelo selecionado, discutindo suas aplicações, correntes e potenciais, para os desafios dos centros urbanos. Estão apresentados os DTs de Zurique, que estrutura a gestão como *Smart City*; Amsterdã e Milão que promovem a participação popular e a sustentabilidade climática e, por último; a Rocinha (Rio de Janeiro), que demonstra a possibilidade de coleta de informação precisa mesmo em tecidos informais e topografia irregular.

UDTs estão sendo desenvolvidos em diversas cidades e, portanto, além dos discutidos mais profundamente neste trabalho, é importante relacionar as seguintes experiências: Helsinque integra várias fontes de dados para gerenciar a energia, o transporte e a eficiência dos edifícios, apoiando a meta da cidade de alcançar a neutralidade de carbono até 2035 (CITY OF HELSINKI, 2024; HÄMÄLÄINEN, 2021). O DT de Toronto, parte de seu quadro de cidade inteligente, concentra-se no monitoramento em tempo real e na gestão do consumo de energia. Essa abordagem é fundamental para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em conformidade com o plano de ação climática (CITY OF TORONTO, 2022). Sydney emprega seu UDT para otimizar redes de transporte e gerenciar o crescimento urbano sustentável. Ao modelar os efeitos de novos projetos de infraestrutura na congestão do tráfego, no uso de energia e nas emissões, Sydney consegue planejar o crescimento futuro enquanto minimiza sua pegada ambiental (CITY OF SYDNEY, 2020; SOHAIL et al., 2024). Singapura se destaca pelo uso da tecnologia UDT como parte de sua iniciativa *Smart Nation*, focando na habitabilidade urbana e na gestão ambiental. O DT de Singapura modela ilhas de calor urbanas e simula infraestrutura verde, como jardins verticais e telhados verdes, para mitigar o calor e melhorar a qualidade do ar. Essa abordagem é essencial para aumentar a sustentabilidade no ambiente urbano densamente povoado do estado-cidade (SMART NATION AND DIGITAL GOVERNMENT OFFICE, 2018) (Figura 25).

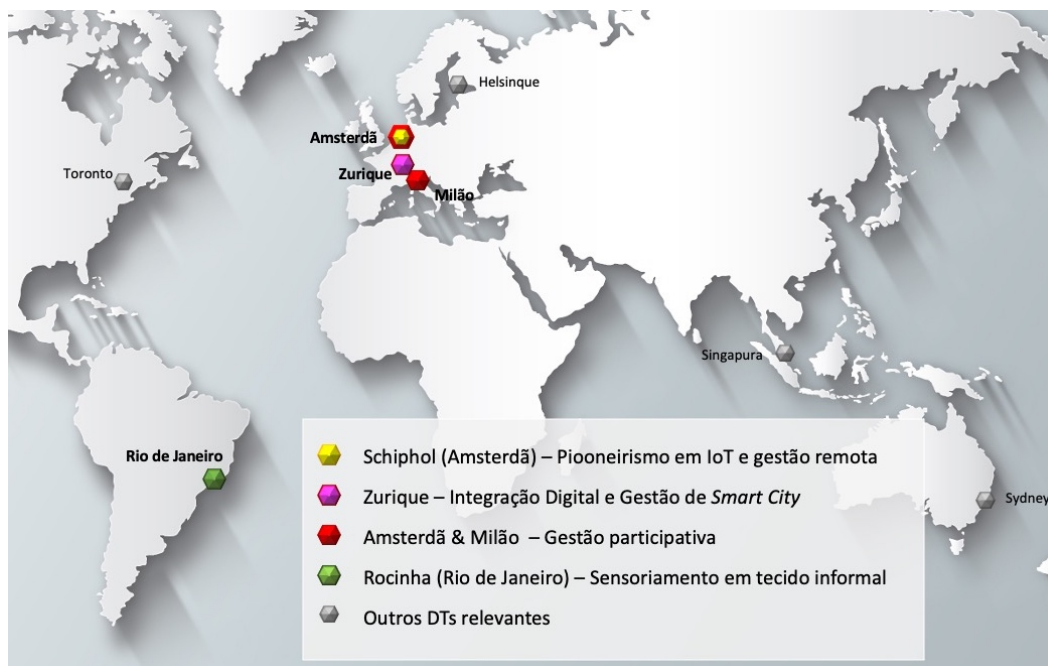


Figura 25. Distribuição global dos DTs analisados  
Fonte: Elaboração própria com base FREEPIC

## 5.1 Smart City Zurich – Construindo um Digital Twin Urbano

A cidade de Zurique na Suíça, adotou em dezembro de 2018, o conceito *Smart City Zurich*, como estratégia de gestão com a definição de três prioridades: cidade digital, futuras formas de mobilidade urbana integrada e participação inteligente (STADT ZÜRICH, 2024). As três estratégias corroboram para, ou são facilitadas, pela adoção de um DT. Uma primeira versão do DT de Zurique foi disponibilizado online no último quarto de 2019. Um DT “completo” ainda está em desenvolvimento, mas já estão disponíveis para acesso público duas versões de aplicativo online com a mesma base tecnológica.

### 5.1.1 Zurich Virtual & Zurich 4D

O “Virtual Zurich” que permite visualizar construções atuais e planejadas, vias, obras de arte, terreno, arborização urbana e matas, com precisão. A visualização é possível na escala da cidade ou uma construção específica, com dois níveis de detalhamento. É possível medir áreas alturas e sombras projetadas. É possível fazer o download de arquivos em alguns formatos CAD e GIS de terreno, edificações, coberturas, matas e árvores além de representações futuras de médio e longo prazo. Há ainda a possibilidade de acesso condicionado a permissão a arquivos BIM de edificações e estruturas (STADT-ZUERICH, 2024). A Figura 26 traz alguns exemplos de recursos da aplicação Zurique Virtual, uma

das interfaces públicas disponíveis do DT da cidade de Zurique, Suíça (STADT-ZUERICH, 2024).



Figura 26. Interface Zürich Virtuell  
Fonte: STADT-ZUERICH

Num segundo modelo chamado “Zurich 4D”, é possível fazer um comparativo temporal, com momentos históricos, presente e futuro, a curto e médio prazo. Nesta versão, ainda é possível acessar metadados e links externos como processos de licenciamento, projetos aprovados e editais de licitações e competições de projetos. A Figura 27, traz exemplos de recursos da aplicação Zurique 4D, uma das interfaces públicas disponíveis do DT de Zurique, Suíça. No painel superior da Figura 27, mostra o modelo com fidelidade geométrica e volumétrica de edificações, estruturas urbanas, terreno (topografia) e elementos naturais. Já no painel inferior, mostra a visualização em modo comparativo histórico/futuro de situação urbanística assim como acesso a metadados e exemplo de linke externo para informações de licitações, competições, projetos edílios e urbanos aprovados e em aprovação (STADT-ZUERICH, 2024).





Figura 27. Interface Zürich 4D.  
Fonte: STADT-ZUERICH

Assim como um grande número de grandes cidades ao redor do mundo, o crescimento populacional irá submeter a cidade de Zurique à uma variedade de desafios nos próximos anos. O inevitável aumento no número de habitantes e necessariamente empregos, provocará uma densificação com usos concorrentes do solo. Com tarefas da administração municipal se avolumando e ganhando complexidade, as atuais ferramentas e métodos baseados em abordagens tradicionais e estáticas, e envolvendo um número limitado de cidadãos e partes interessadas em decisões relevantes, não serão mais eficientes. A transformação digital permeando cada vez mais partes do processo de planejamento e tomada de decisão tornará as etapas mais céleres, as informações cada vez mais ilustrativas, acessíveis e compreensíveis. (SCHROTTER; HÜRZELER, 2020)

Uma base de dados importante para esses processos é o DT da cidade de Zurique. Dados espaciais em 3D e seus modelos transformam temas da cidade, como prédios, pontes, vegetação, etc., para o mundo digital, são atualizados quando necessário e criam vantagens no espaço digital. Esses benefícios precisam ser destacados e divulgados. Um passo importante na conscientização pública, é a divulgação de dados espaciais em 3D sob o conceito de dados governamentais abertos. Isso permite o desenvolvimento de aplicativos, a promoção do entendimento e a simplificação da criação de diferentes plataformas colaborativas. Por meio da visualização e análise de protótipos digitais e da demonstração de interações com o ambiente construído, cenários podem ser desenvolvidos digitalmente e discutidos em órgãos de tomada de decisão. Questões sobre o clima urbano podem ser simuladas com a ajuda do DT e os resultados podem ser vinculados aos dados espaciais em 3D existentes. Assim, o conjunto de dados espaciais em 3D, os modelos e suas descrições por meio de metadados tornam-se a referência e devem ser atualizados de acordo com os requisitos. Dependendo dos requisitos e questões, mais dados espaciais em 3D devem ser adicionados. A descrição dos dados espaciais em 3D e seus modelos ou o gerenciamento do ciclo de vida do DT deve ser realizado com muito cuidado. Somente desta forma, os processos de decisão podem ser apoiados de forma compreensível.

Outras aplicações com temas e recursos variados, estão em desenvolvimento ou estão disponíveis apenas para públicos específicos e/ou de maneira isolada. No entanto, superadas as limitações de integração e definidas as hierarquias de acesso, integrarão uma futura plataforma única.

### **5.2.2 Street Space 3D**

Um conhecimento local detalhado é necessário para muitas tarefas da administração municipal, seja para o planejamento e manutenção do espaço público ou para a emissão de autorizações para o seu uso. Com esses dados, inspeções no local e campanhas de medição podem ser reduzidas. Os funcionários agora têm a chance de virtualmente ir para qualquer local no espaço público e não apenas obter uma impressão do local, mas também coletar diretamente as coordenadas dos objetos. O projeto foi lançado sob a liderança do departamento de Engenharia civil em colaboração com a autoridade de transportes de Zurique, o departamento de trânsito, a polícia municipal, geomática + topografia, proteção

ambiental e de saúde, *Green City* de Zurique e o escritório de desenvolvimento urbano. As ruas são as artérias da cidade. Uma grande parte dos processos de tomada de decisão diários da administração municipal é baseada no conhecimento da condição exata das ruas, nos detalhes do design das ruas, como a altura das guias, no mobiliário urbano, como a sinalização, mas também no conhecimento dos prédios e plantações adjacentes (Figura 28).



Figura 28. Street Space 3D; cobertura, visualização e metadados  
Fonte: STADT-ZUERICH

Os dados coletados pela primeira vez em 2020, com base em fotografias digitais das ruas, são utilizados diariamente pelos funcionários da administração municipal por meio do computador, para obter primeiras impressões de qualquer local na rua, para preparar trabalhos de campo ou, em alguns casos, até mesmo para realizar esclarecimentos diretamente. As imagens tridimensionais necessárias são criadas como parte deste projeto interdepartamental. Antes de serem utilizadas pelos departamentos especializados da cidade, as pessoas e as placas de veículos são anonimizadas em um processo automático. Para manter os benefícios para a administração municipal elevados, os dados foram atualizados conforme planejado pela primeira vez em 2022.

Todas as estradas públicas (excluindo autoestradas) e, toda a rede de bondes de Zurique, bem como ciclovias selecionadas e praças, foram levantadas. Os dados também mostram as fachadas que fazem fronteira com as ruas. Durante a condução, fotos de alta resolução são tiradas continuamente (a cada 2-3 metros, dependendo da velocidade de condução). Devido ao arranjo das câmeras, as coordenadas dos pixels individuais das imagens podem ser calculadas posteriormente. Para melhor orientação e clareza, fotos panorâmicas também são tiradas no mesmo intervalo. A altura de gravação da câmera panorâmica é de 2,5 metros. O veículo também possui um scanner a laser que escaneia o ambiente



durante a condução e gera uma nuvem de pontos. O laser tem uma potência que não é perigosa para os olhos.

Benefícios do projeto – Zurique está criando uma imagem digital de seu espaço de rua e todos os espaços públicos. Os funcionários municipais agora têm a oportunidade de ir virtualmente a qualquer local no espaço público e rapidamente ter uma impressão da situação. O comprimento, largura e altura dos objetos e a localização geográfica exata também podem ser medidos no computador. Inspeções no local e campanhas de medição podem ser reduzidas.

Por exemplo, o projeto facilita o levantamento e inspeção de bancos, árvores, vagas de estacionamento, marcações no chão, orientação de faixas e sinalização. Desvios temporários e rotas alternativas podem ser simulados no computador antes do teste de condução. Os dados fornecem uma base inicial de planejamento e visualização para medir as seções transversais das estradas, larguras das vias e perfis de desobstrução. Estes são uma base para modelos digitais de edifícios de infraestrutura BIM. Esclarecimentos preliminares sobre substituição de janelas, isolamento de fachadas, conceitos de cores e sombreamento podem ocorrer virtualmente. As gravações ajudam a decidir sobre solicitações para o uso de terrenos públicos e para a polícia da cidade são uma ferramenta adicional para o planejamento operacional.

Planejando operações e visitas de campo de forma mais específica - Imagens 3D mostram apenas o momento em que foram tiradas. Danos de curto prazo, movimentos de tráfego, ruídos ou temperaturas não podem ser identificados. Em muitos casos, inspeções e medições no local ainda são essenciais. No entanto, as operações de campo podem ser preparadas e planejadas de forma mais específica com base nas gravações. As gravações podem substituir ou pelo menos complementar a documentação fotográfica e apoiar visualmente a comunicação com a população.

Diferença para o Google Street View - O projeto de Zurique cobre todas as ruas e praças da cidade e os dados são coletados regularmente a cada dois anos. O Street View mostra lacunas na rede viária e algumas das imagens do Street View têm vários anos. Com os dados da cidade de Zurique, objetos de rua também podem ser medidos tridimensionalmente no computador, comparados com geodados existentes e digitalizados. Portanto, não são apenas dados de imagem, mas imagens com informações de profundidade, ou seja, dados de medição.

### 5.2.3 Rede LoRa

Em colaboração com a Organização e Tecnologia de Zurique (OIZ), a ewz opera uma Rede de Área Ampla de Longo Alcance (LoRaWAN). A LoRaWAN é caracterizada pelo baixo consumo de energia e, portanto, é uma rede sem fio eficiente em energia que é particularmente adequada para sensores de IoT. É utilizada especialmente para interconectar sensores em espaços públicos e edifícios. Ela constitui uma base técnica para aplicativos selecionados de cidades inteligentes e IoT, especialmente nos quais dados e informações devem ser coletados de maneira simples e econômica. Como parte de projetos piloto específicos com medições de qualidade do ar, níveis de água e outros parâmetros de água, mas também na determinação de vagas de estacionamento gratuitas (estacionamento inteligente), já foram obtidas experiências práticas e importantes insights. Um número rapidamente crescente de dispositivos de medição e sensores traduzem dados do ambiente analógico em bits e bytes digitais. A IoT também oferece oportunidades para a administração da cidade de Zurique e é uma base para a Smart City Zurique.

Por que a IoT é necessária? Especialmente em combinação com ferramentas de análise de vários serviços em nuvem, a IoT revela um potencial enorme - também para a administração da cidade de Zurique, como um caso de uso da ewz demonstra. O fornecimento de energia da sociedade e, portanto, também empresas urbanas como a ewz, estão enfrentando uma grande transformação: energias renováveis e veículos elétricos estão apresentando à infraestrutura existente novos desafios. Em primeiro lugar, o fornecimento e a demanda de energia elétrica variam muito mais do que antes, e em segundo lugar, as flutuações dificilmente podem ser previstas e amortecidas usando meios convencionais. Há apenas uma solução para esse dilema: uma rede de distribuição mais flexível e "inteligente".

Análise de dados e plataforma IoT: A ewz e a OIZ lançaram os primeiros projetos piloto para implementar tal "rede inteligente" na primavera de 2018. Tudo começou com os parques eólicos que a ewz opera no norte da França e que produzem quantidades variáveis de eletricidade verde, dependendo do clima. Até agora, faltavam dados de medição detalhados para operação ideal: como os rotores devem ser ajustados para produzir o máximo de eletricidade possível? Para gerar conjuntos de dados correspondentes, os rotores das turbinas eólicas

foram equipados com sensores. O objetivo era combinar análise de dados e plataforma IoT em uma solução de aplicativo uniforme: medição e análise deveriam andar juntas - daí o nome do projeto DIOP (análise de dados e plataforma IoT). Durante o processo de desenvolvimento, ficou claro rapidamente que uma solução baseada em nuvem era ideal para esses requisitos.

Vantagens da nuvem: A nuvem tem uma vantagem importante, especialmente quando uma infraestrutura de computação poderosa precisa ser configurada em um curto período de tempo: ela é flexível. Uma infraestrutura comparável no centro de dados de Zurique teria custado várias vezes mais devido à compra de software e hardware. E ao contrário do centro de dados, onde o desempenho de computação e armazenamento sempre precisa estar alinhado com picos de carga, um ambiente em nuvem como o Azure pontua nesse aspecto devido à sua flexibilidade. E, finalmente, já existe muito *know-how* nas nuvens. Inicialmente, foi difícil para a ewz estimar quais instrumentos de análise eram realmente os adequados. Devido à variedade de ferramentas que cada provedor de nuvem oferece, várias soluções podem ser experimentadas diretamente na prática sem muito esforço.

A Figura 29 (*LoRa network*) apresenta uma imagem ilustrativa da rede LoRa, rede Wifi de sensores IoT usados para monitorar serviços público, infraestrutura urbana e qualidade ambiental em tempo real (STADT-ZUERICH, 2024).

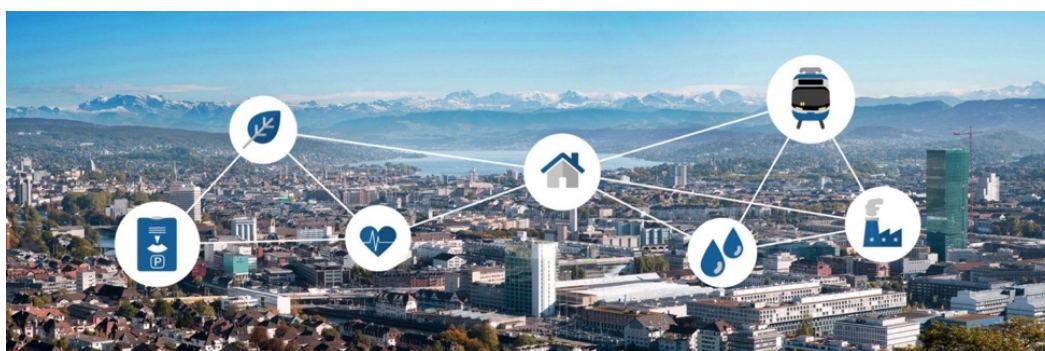


Figura 29. LoRa network – Imagem ilustrativa da rede LoRa  
Fonte: STADT-ZUERICH

IoT em Zurique - A OIZ atua como um chamado intermediário no projeto DIOP, como um intermediário entre o provedor de nuvem e o usuário neste caso a ewz. Isso significa que a OIZ assume, entre outras coisas, a administração de

autorizações de acesso relevantes para a segurança ou a alocação de recursos e, assim, gera valor agregado direto para a ewz.

O serviço LoRa - uma parte essencial da IoT de Zurique - O conhecimento recém-adquirido já está rendendo frutos - por exemplo, no projeto piloto de "Estacionamento Inteligente" que o Departamento de Transportes está desenvolvendo atualmente em conjunto com a OIZ e a ewz. O objetivo é poder guiar os motoristas na cidade de Zurique para as vagas de estacionamento mais próximas no futuro. A LoRa WAN (Rede de Área Ampla de Longo Alcance) construída pela ewz e OIZ atua como uma rede entre sensores e o centro de dados de Zurique. A ewz é responsável pela transmissão de dados dos sensores via várias antenas (gateways) para o centro de dados da OIZ e operações de rede gerais. A OIZ então garante que os dados sejam encaminhados para as diversas aplicações especializadas. A LoRa é caracterizada pelo baixo consumo de energia e, portanto, é uma rede sem fio eficiente em energia que é especialmente adequada para sensores de IoT e está disponível para todos os departamentos de serviços na cidade de Zurique para a transmissão de dados de medição. Mesmo com o "estacionamento inteligente", a OIZ atua como intermediária para garantir que todos os componentes do sistema interajam entre si sem interrupções e estejam disponíveis para os departamentos de serviço. Sabendo do grande potencial da IoT, a OIZ, junto com os departamentos de serviço e parceiros externos, quer criar a base técnica para que Zurique se torne um dia a "Smart City" mais inteligente da Suíça.

#### **5.2.4 EnerGIZ**

Com o EnerGIS, Zurique apoia proprietários na transição para energias renováveis, vinculando dados de energia e construção. Na plataforma de informações, os proprietários podem descobrir exatamente quais fontes de energia estão disponíveis em sua localidade: redes de energia maiores existentes e planejadas ou opções de conexão ao aquecimento distrital, bem como opções para sistemas renováveis como painéis solares, sistemas fotovoltaicos, sondas geotérmicas, bombas de calor ar-ar ou água. Pela primeira vez, o EnerGIS vincula dados de construção com informações energéticas de fornecedores de energia municipais, planejamento energético municipal usando GIS (Figura 30 e 31).

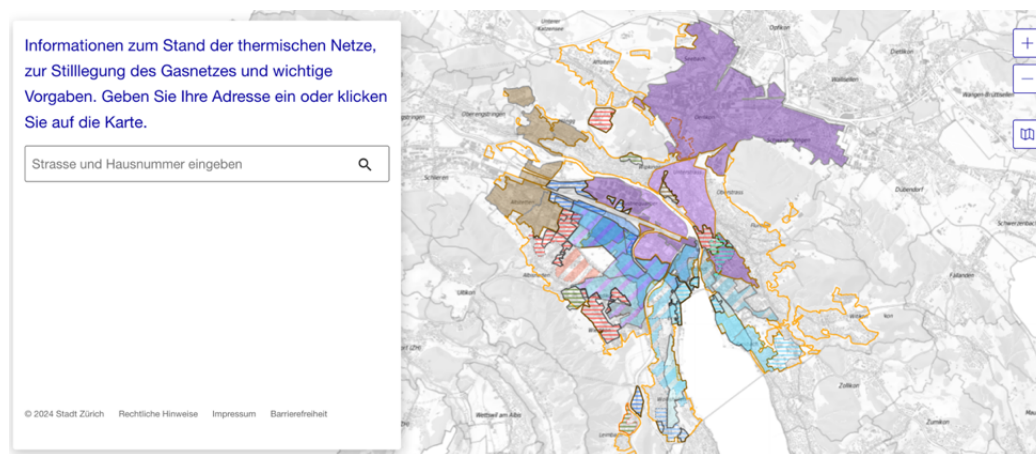


Figura 30. EnerGIS – modos de aquecimento disponíveis  
Fonte: STADT-ZUERICH

A nova oferta tem o objetivo de facilitar para os proprietários a transição de combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis e conectar-se a redes de energia amigáveis ao clima. Com cada mudança para fontes de energia renováveis, as emissões de gases de efeito estufa são reduzidas. Mais um passo para Zurique rumo a se tornar uma sociedade de 2000 watts.

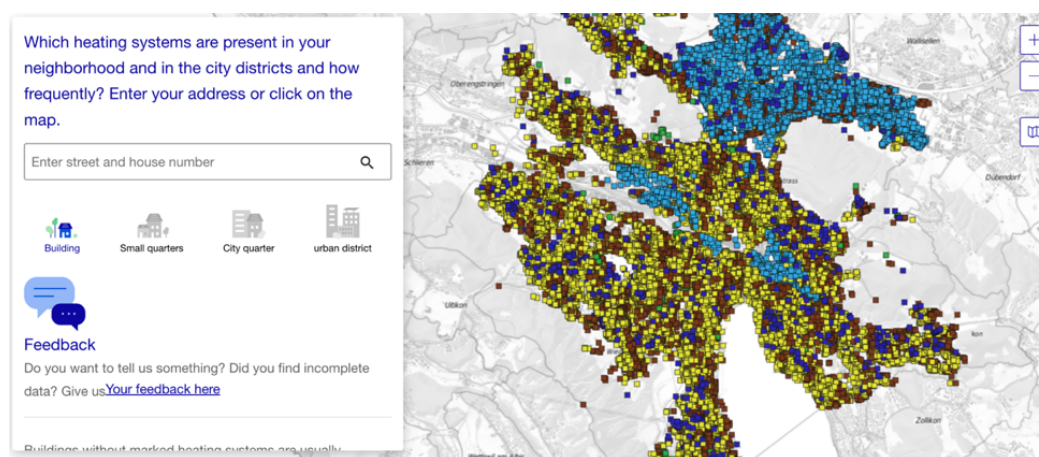


Figura 31. EnerGIS – modo de aquecimento instalado  
Fonte: STADT-ZUERICH

A comunicação e colaboração entre atores internos e externos interessados, são apoiados e promovidos por novas tecnologias de visualização e interação. O DT de Zurique é sua imagem digital e espacial. Tendo como base o já existente modelo digital 3D da cidade, foi criada uma plataforma para comunicação visual e colaboração. Como primeiro recurso, foi desenvolvido um aplicativo que contém o modelo da cidade existente e o referindo com o geodados e outras informações. Sobre ele, são apresentados cenários de desenvolvimento urbano, projetos reais de engenharia civil como obras de arte e reestruturação viária assim como construção

de edifícios assim como projetos de construção detalhados (modelos BIM) são apresentados de forma clara e acessível (STADT-ZUERICH, 2024).

## **5.2 Amsterdã e Milão – Gestão compartilhada**

A participação civil na formulação de políticas públicas pode ter um papel crucial promovendo incremento de eficiência e aderência através de dois fatores: fortalecendo o alinhamento entre as necessidades da população e as medidas propostas, e aumentando o consenso público (e a conformidade) em relação a estas. Portanto, promover a participação pública no desenvolvimento do planejamento da mobilidade sustentável em escala urbana é absolutamente relevante, sendo enfaticamente recomendado pela União Europeia, não apenas para evitar protestos e resolver conflitos, mas sobretudo para identificar as melhores soluções para a cidade .

Como consequência de uma nova onda de ativismo que está emergindo em ambientes urbanos ao redor do mundo, o interesse no ativismo urbano, inserido em um contexto mais amplo da sociedade civil e dos movimentos sociais, tem crescido constantemente nos últimos anos. A mobilização urbana assume uma variedade de formas, das mais tradicionais da sociedade civil (organizações de bairro de base, associações de moradores, grupos de interesse local, grupos de pressão politicamente ou culturalmente orientados), e se avolumando mais recentemente, iniciativas de protesto (contra políticas urbanas orientadas pelo lucro ou a comercialização de recursos públicos) e movimentos políticos por justiça ambiental e social. À medida que ativistas locais participam da política urbana e influenciam a tomada de decisões por meio de ferramentas legais e práticas participativas, o ativismo urbano vem se consolidando como parte importante dos processos de governança urbana (BITUŠÍKOVÁ, 2015). Não é simples definir as fronteiras para a participação cidadã na governança e gestão urbana, mas mesmo sendo necessário ponderar a inclusão do processo democrático e das muitas iniciativas urbanas que frequentemente apresentam objetivos conflitantes, é fundamental destacar que gradualmente vem se tornando fatores cruciais para o desenvolvimento urbano democrático e sustentável (HOLSTON, 1999; PURCELL, 2003; STAEHELI, 2003).

Plataformas digitais estão impactando as cidades de inúmeras maneiras. Elas afetam tanto a conectividade interurbana quanto a funcionalidade

intraurbana. A literatura existente sobre plataformas digitais as define de forma bastante ampla, nomeadamente como qualquer instrumento hospedado digitalmente para compartilhar ou viabilizar a troca de informações ou serviços em escala global. Noções como capitalismo de plataforma (SRNICEK; DE SUTTER, 2017) e o conceito emergente nos estudos urbanos de urbanismo de plataforma (BARNS, 2019) captam um lado da transformação urbana que nossas cidades estão enfrentando. Esse lado se concentra principalmente no papel cada vez mais central dos dados, concebidos como uma mercadoria, onde as plataformas digitais desempenham um papel como forças capitalistas globais na obtenção de dados e sua monetização (ROSE et al., 2021).

No conceito de 'urbanismo de plataforma', há um caráter urbano específico: plataformas que lidam com o urbano tendem a compartilhar iniciativas, informações e conhecimentos, e depender das cidades para seus dados, serviços e redes locais. Ao mesmo tempo, não há um olhar crítico sobre a diferenciação entre plataformas digitais que mercantilizam recursos urbanos e um subconjunto de plataformas, que mediam digitalmente experiências urbanas, como iniciativas de solidariedade baseadas em cidadãos, nas quais o estado local pode ter um papel não apenas como regulador, mas como promotor ativo. Ainda há pouco conhecimento sobre plataformas digitais sem fins lucrativos projetadas para participação pública, solidariedade e transações diversas além das exclusivamente econômicas. A participação pública e as iniciativas de base variam desde financiamento coletivo cívico até plataformas complementares de bem-estar (ou seja, bancos de tempo), mas também dizem respeito a efeitos mais amplos na sociedade, como solidariedade, controle democrático e responsabilidade. Em particular, durante a crise da pandemia de Covid-19, um aspecto crucial emergiu. Por um lado, plataformas digitais globais como Airbnb e Uber estão perdendo terreno nas cidades, pela necessidade de ajustarem seus modelo de negócios para contornar regimes regulatórios e se adequar (novamente) ao mercado (RICHARDSON, 2019). Por outro lado, novos tipos de plataformas digitais estão ganhando terreno oferecendo suporte: ajuda mútua e solidariedade em nível de cidade. Por exemplo, a prefeitura de Amsterdã lançou sua própria plataforma digital 'We Amsterdam', armazenando iniciativas cívicas tanto offline quanto online para apoiar os cidadãos durante a crise do coronavírus (MOS, 2020). Em outro lugar, a prefeitura de Milão abriu outra rodada de financiamento coletivo

cívico, oferecendo suporte financeiro para ajudar cidadãos vulneráveis durante o surto de coronavírus, que atingiu severamente a Lombardia e Milão.

As questões sobre como as plataformas digitais afetam a geografia urbana e os arranjos de governança, e vice-versa, bem como como as cidades afetam as plataformas digitais, não são arbitrárias nos estudos urbanos. Plataformas digitais urbanas (PDUs) são formas potenciais de (re)organizar a economia social, iniciativas cívicas e provisão de bem-estar complementar. Além disso, as PDUs exigem uma revisão do papel do governo local, pois possibilitam novas formas de organização social, bem como novas formas de produzir e entregar bens e serviços. Portanto, este artigo reflete sobre plataformas urbanas como uma forma alternativa de projetos de base e empreendedorismo, práticas orientadas à comunidade e ações coletivas, nas quais o estado local pode intervir para prevenir ou favorecer um tipo particular de desenvolvimento urbano e produção do espaço urbano. As PDUs são uma forma alternativa de escapar das plataformas digitais globais vorazes e exploradoras. O cerne do meu argumento é que certas plataformas digitais são urbanas a priori, ou seja, plataformas para a cidade, em vez de plataformas que se alimentam dela: onde 'a cidade' é concebida como uma comunidade urbana, não um polo de crescimento. Como resumido em "Recapturing democracy" de Mark Purcell (2008) e em "Cidades para pessoas, Não para lucro", de Brenner, Marcuse e Mayer (2012), a PDU é uma plataforma para pessoas e não para lucro, visando recuperar responsabilidade e princípios democráticos.

Para dar visibilidade e direcionar a atenção analítica para uma diversidade maior de plataformas, introduzo uma definição operacionalizada da PDU. As PDUs podem ser uma oportunidade para o 'bem comum urbano' baseado na solidariedade (KOHN, 2016), reimaginando a cidade como uma "forma inovadora de cooperação coletiva e corporação coletiva" (MERRIFIELD, 2014, p. 390). Os cidadãos não são recolocados no papel de consumidores, mas sim como produtores de espaço (Figura 32).





Figura 32. Projetos realizados por crowdfunding em Amsterdam 2018  
Fonte: CHIAPPINI, 2020

Diferente de projetos de cidades inteligentes ou urbanismo de plataforma, nos quais os usuários podem participar de táticas mundanas e atividades da vida cotidiana, como usar um serviço de compartilhamento de bicicletas, as PDUs oferecem a possibilidade de (re)criar bens comuns urbanos e gerar solidariedade e ações coletivas. Uma análise comparativa baseada em um pareamento de dois PDUs que operam em Milão e Amsterdã: financiamento coletivo cívico e *Commonfare*. *Commonfare* é uma plataforma digital que visa promover a solidariedade e a colaboração entre os membros da comunidade. Ela oferece um espaço online onde os usuários podem compartilhar recursos, ideias e apoio mútuo. Os métodos empregados são principalmente qualitativos, como entrevistas, observações de participantes e mapeamento de projetos dentro dos PDUs mencionados acima. Ambas as plataformas representam alternativas potenciais para arranjos locais e engajamento cidadão, sem lucrar com o urbano ou explorar diretamente os recursos locais. O termo PDU é uma tentativa de revitalizar a importância do urbano como espaço de contestação e rearranjos políticos potenciais em direção à produção alternativa de espaço, em vez de como um espaço para plataformas digitais corporativas. A necessidade da PDU como um novo conceito é ampliar nosso escopo para contrastar o motivo essencial das empresas capitalistas de plataforma na coleta de grandes massas de dados.

Grandes cidades e áreas metropolitanas, e em particular centros urbanos que se tornaram hegemônicos no imaginário coletivo, funcionam como laboratórios vivos para empresas-chave nas economias urbanas ocidentais. Para 'os novos profetas do capital', como Nicole Aschoff (2015) os chamou no último livro, plataformas digitais globais tendem a se apresentar como filantrópicas enquanto conduzem negócios em nome do 'bem comum' (ROSSI, 2019). Ao destacar a importância da PDU como um conceito separado, o urbanismo de plataforma é concebido como uma condição emergente do urbano e um novo campo de estudo no qual o conceito da PDU ressoa. A definição operacionalizada proposta da PDU é enfatizar que não é para fins lucrativos, projetada para iniciativas locais e de pequena escala em que o tipo de provisão é de Par-a-Par (P2P; BENKLER, 2006), e frequentemente requer a intervenção do estado local. Com uma conceitualização adequada da PDU, os estudiosos urbanos críticos podem começar a moldar relações sociais e econômicas de maneira diferente, em vez de reduzir nosso papel como pesquisadores a mapear o 'impacto' ou os efeitos negativos das plataformas digitais. A tentativa de Leszczynski (2020, p. 189) é de fato "uma teoria contrateórica menor do urbanismo de plataforma", que explora uma compreensão mais matizada da política no urbanismo de plataforma que ressoa.

Concluindo, as Plataformas Digitais Urbanas (PDUs) como a Commonfare e plataformas de financiamento coletivo cívico, embora ainda não sejam perfeitas em termos de engajamento de minorias em comparação com plataformas globais, oferecem oportunidades significativas para examinar seu impacto nas comunidades urbanas e nas desigualdades existentes. Essas plataformas possuem potencial para fomentar interações mutuamente benéficas com associações de bairro, movimentos de solidariedade e funções sociais dentro das cidades. Isso não é meramente uma justaposição de conceitos, mas uma reflexão sobre o nosso contexto histórico atual e as ações sociais e coletivas que as PDUs podem apoiar. No entanto, as PDUs não funcionam necessariamente como formas de resistência. Os estudos de caso mostram que o financiamento coletivo cívico frequentemente depende da intervenção do estado local, seja como regulador ou co-financiador, para desenvolver projetos locais em áreas metropolitanas.

### 5.3 Rocinha – Conhecendo o não projetado

Das aproximadamente quatro bilhões de pessoas que vivem em cidades em todo o mundo, cerca de um bilhão vive em assentamentos informais até 2020 (BOANADA-FUCHS; KUFFER; SAMPER, 2024). Os assentamentos informais são aglomerações de residências e negócios construídos por seus moradores, em uma forma inicialmente não planejada de urbanização. Sua morfologia complexa é o resultado de construção espontânea e competitiva sem posse oficial da terra, o que resulta em estruturas densas e multicamadas construídas ao redor de redes de ruas labirínticas (Figura 33). Esses ambientes tendem a ser insalubres e inseguros em comparação com as partes formalmente desenvolvidas da cidade: sua exclusão da infraestrutura urbana e do gerenciamento oficial os expõe a uma variedade de desafios de saúde pública e segurança, e sua localização típica em terrenos indesejáveis pode resultar em várias formas de precariedade ambiental (SINHAROY; PITTLUCK; CLASEN, 2019). À medida que a crescente população urbana continua a superar a construção de moradias acessíveis pelos canais oficiais, esses assentamentos estão se expandindo ao redor do mundo.



Figura 33. Favela da Rocinha.  
Fonte: THAISA COMELLI/IEED, 2023

Assentamentos urbanos informais, também conhecidos como favelas, vilas, comunidades irregulares ou loteamentos clandestinos, são áreas urbanas que se desenvolvem sem seguir os padrões legais de planejamento e regularização estabelecidos pelo governo. Essas áreas geralmente surgem de ocupações ilegais de terras públicas ou privadas por pessoas de baixa renda que não têm acesso a moradias formais ou que não conseguem pagar por elas. Os assentamentos

urbanos informais são caracterizados pela falta de infraestrutura básica, como água potável, saneamento, eletricidade, ruas pavimentadas e serviços de saúde e educação adequados. Eles também podem apresentar problemas de segurança, densidade populacional alta e falta de regulamentação de construções, resultando em moradias precárias e vulnerabilidade a desastres naturais e sociais. Essas comunidades muitas vezes enfrentam desafios significativos para acessar serviços públicos, como transporte, segurança e oportunidades de emprego, devido à sua localização e status legal indefinido. O processo de regularização dessas áreas pode ser complexo e demorado, envolvendo ações governamentais para fornecer infraestrutura básica, titularidade da terra e melhorias nas condições de vida dos residentes (DAVIS, 2006).

Entre 2000 e 2014, a quantidade de pessoas que moravam em áreas urbanas precárias, os assentamentos urbanos informais, também conhecidos como favelas, vilas, comunidades irregulares ou loteamentos clandestinos, ao redor do mundo, diminuiu em 20%, passando de 28% para 23% da população global. No entanto, essa tendência positiva mudou e, em 2018 como mostrado na Figura 34, essa proporção aumentou para 23.5%. O número total de pessoas vivendo nessas áreas cresceu para mais de um bilhão, com 80% concentrados principalmente em três regiões: Leste e Sudeste Asiático (370 milhões), África Subsaariana (238 milhões) e Ásia Central e meridional (227 milhões). Estima-se que até 2030, cerca de 3 bilhões de pessoas precisarão de moradias adequadas e acessíveis (DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS - STATISTICS DIVISION, 2019)

População Mundial vivendo em favelas ou assentamentos informais, 2018 (milhões de pessoas)

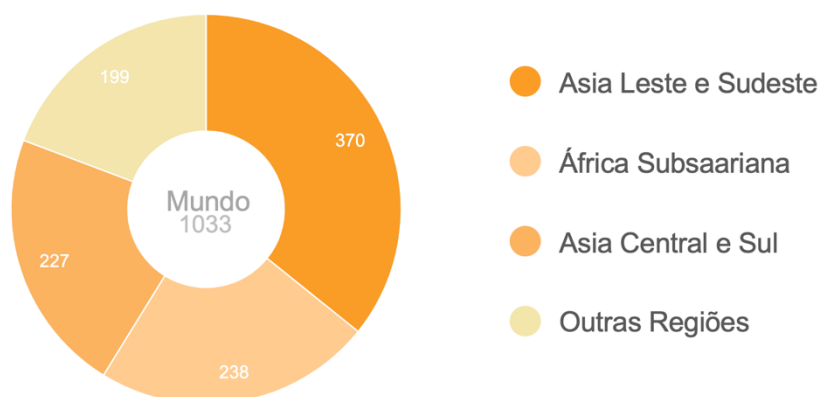


Figura 34. População em assentamentos informais.  
Fonte: UM-STATS, 2018

A Rocinha, no Rio de Janeiro, é um dos maiores e mais conhecidos assentamentos informais do mundo. Situada em uma encosta íngreme entre os bairros de São Conrado e Gávea, na Zona Sul da cidade, a Rocinha abriga uma comunidade diversificada e densamente povoada. Originalmente estabelecida como uma favela no final do século XIX, a Rocinha experimentou um crescimento significativo durante o século XX, atraindo migrantes de áreas rurais em busca de oportunidades de emprego na cidade. Com o tempo, evoluiu para uma comunidade dinâmica, caracterizada por suas vielas estreitas, moradias improvisadas e vida nas ruas movimentada. Apesar de enfrentar desafios socioeconômicos como a pobreza, a infraestrutura inadequada e a criminalidade associada ao tráfico de drogas, a Rocinha é também um local de resiliência, criatividade e riqueza cultural. Os seus residentes desenvolveram um forte sentido de identidade e solidariedade, promovendo uma variedade de iniciativas comunitárias, expressões artísticas e organizações de base (MAIOLINO et al., 2007).

Nos últimos anos, têm sido feito esforços por organizações governamentais e não-governamentais para resolver alguns dos problemas de longa data enfrentados pela Rocinha, incluindo melhorias na infraestrutura, educação, saúde e segurança. No entanto, permanecem desafios significativos e a comunidade continua a defender uma maior inclusão, oportunidades e justiça social.

A Favela da Rocinha é um modelo notável para estudar urbanismo, dinâmicas de assentamentos informais e resiliência comunitária. Vários aspectos justificam por que a Rocinha é considerada um modelo para pesquisas em urbanismo e alguns pontos serão discutidos a seguir.

A complexidade dos assentamentos informais é bem exemplificada pela Rocinha. Seu crescimento orgânico, densidade populacional e rede de ruas estreitas proporcionam um contexto rico para estudar os processos informais de urbanização. Pesquisadores podem explorar como esses assentamentos evoluem, se adaptam e funcionam dentro da paisagem urbana mais ampla. Sua organização espacial única é caracterizada por sua localização em uma encosta e layout irregular, oferecendo um estudo de caso em urbanismo adaptativo onde pode-se investigar como os residentes navegam e utilizam o espaço, bem como adaptam seu ambiente construído para satisfazer suas necessidades e preferências em evolução.

Do ponto de vista social, os moradores da Rocinha desenvolveram fortes redes comunitárias em resposta aos desafios que enfrentam. Estudar a Rocinha oferece insights sobre como as comunidades em assentamentos informais se organizam, apoiam-se mutuamente e mobilizam recursos para resolver questões comuns, como acesso a serviços, segurança e meios de subsistência. Apesar dos desafios socioeconômicos, a Rocinha é um centro cultural vibrante, com uma rica variedade de expressões artísticas, tradições culturais e eventos comunitários. Estudar a Rocinha permite aos pesquisadores explorar o papel da cultura e da identidade na formação de espaços urbanos informais e na promoção de um sentimento de pertencimento entre os moradores.

O status da Rocinha como assentamento informal levanta questões importantes sobre governança urbana, posse de terra e políticas públicas. Utilizando-a como modelo, pode-se examinar a eficácia das intervenções governamentais, das iniciativas lideradas pela comunidade e das parcerias entre as partes interessadas na resposta às necessidades dos assentamentos informais e na promoção do desenvolvimento urbano inclusivo.

À medida que as cidades enfrentam questões como mudanças climáticas, escassez de recursos e desigualdade social, compreender a sustentabilidade e a resiliência de assentamentos informais como a Rocinha torna-se cada vez mais importante. Ao estudar a Rocinha como um modelo de urbanismo, os investigadores podem obter informações valiosas sobre a complexa interação de fatores sociais, espaciais, ambientais, econômicos e políticos que moldam os assentamentos informais e as paisagens urbanas em todo o mundo. Este conhecimento é crucial e contribui para esforços políticos e de planejamento urbano destinados a criar cidades mais inclusivas, sustentáveis e resilientes para todos os residentes.

Diante das diversas demandas por informação, mencionadas anteriormente, abrangendo aspectos sociais, culturais, políticos, físicos e organizacionais, surge uma questão crucial: como realizar um levantamento de dados de forma eficiente e com precisão? Como discutido ao longo deste trabalho (capítulo 4), os DTs de espaços urbanos permitem a disponibilidade de informações detalhadas não apenas sobre o ambiente físico, mas também podem integrar dados relevantes sobre o contexto social e cultural da região. Considerando a complexidade dos assentamentos informais como a Rocinha, a utilização do DT pode fornecer uma

visão abrangente e detalhada do complexo ambiente físico de uma favela, e também possibilita enriquecer a compreensão do tecido social e cultural que molda a vida urbana.

O artigo “Favelas 4D: Scalable methods for morphology analysis of informal settlements using terrestrial laser scanning data”, descreve a pesquisa realizada por cientistas do Senseable city lab, em Massachusetts Institute of Technology (MIT), que usaram a favela da Rocinha como modelo de estudo [<https://senseable.mit.edu/favelas>], e que será analisado a seguir.

Devido à morfologia irregular e complexa dos assentamentos informais, como mencionado anteriormente, o mapeamento e a análise morfológica se tornam desafiadores ao utilizar apenas métodos tradicionais. Portanto, na pesquisa Favelas 4D, os autores se concentraram em estudar a morfologia das casas e complexos habitacionais informais, como os encontrados na maior favela do Rio de Janeiro, a Rocinha. Eles apresentaram uma nova abordagem que ajuda a contornar os desafios de mapeamentos mais complexos, como os de favelas. Os pesquisadores destacaram neste estudo as vantagens desse método em comparação com outras abordagens já em uso. Por exemplo, embora dados de sensoriamento remoto possam ajudar a distinguir esses assentamentos de outras áreas (PRABHU; PARVATHAVARTHINI; ALAGU RAJA, 2021; SCHMITT et al., 2018), sua resolução não é suficiente para estudar detalhadamente cada assentamento individualmente. Outro exemplo é a coleta de dados aéreos por fotografia ou radar, que embora seja mais detalhada que o sensoriamento remoto (GEVAERT et al., 2017; SLIUZAS et al., 2017), ainda assim enfrenta problemas como oclusões e não consegue capturar a grande diversidade de materiais, tipos de construção e designs encontrados nos assentamentos informais. Por outro lado, como destacado na pesquisa, os dados etnográficos ou de pesquisas realizadas dentro dos assentamentos pode fornecer uma visão detalhada e rica do envolvimento da comunidade, mas ainda assim eles são geralmente difíceis de coletar e analisar integralmente (CAVALCANTI, 2017; MUKEKU, 2018).

As dificuldades dos métodos de mapeamento atuais contribuem para a falta de estudos completos sobre assentamentos informais, embora sejam cruciais para a pesquisa em planejamento urbano. A pesquisa Favelas 4D aborda essas limitações e apresenta um método escalonável para a avaliação quantitativa da morfologia de assentamentos informais, utilizando dados obtidos por varredura a



laser LiDAR (Light Detection and Ranging). As varreduras LiDAR fornecem informações sobre o ambiente urbano na forma de nuvens de pontos não ordenadas. No Favelas 4D, o cerne da metodologia é um procedimento utilizado para extrair propriedades geométricas das ruas e fachadas a partir de nuvens de pontos não ordenadas, o que por fim servirá para analisar a morfologia do objeto de estudo.

Primeiramente, os autores se concentraram em medir a morfologia das "cenas de rua", definidas como uma unidade espacial constituída de ruas e todas as suas fachadas. Cinco métricas espaciais foram propostas, assim como foi demonstrado como calcular cada uma delas usando os dados LiDAR que incluem a largura e elevação das ruas, a heterogeneidade das fachadas (uma medida de inconsistência na altura das fachadas), a densidade de fachadas (uma medida de aglomeração entre edifícios) e cânion de rua (uma métrica que captura a largura e a profundidade das fachadas em relação à rua). Essas métricas foram utilizadas para fornecer uma análise comparativa das diferentes cenas de ruas. Os autores também expandiram os estudos para uma análise de maior resolução, realizando medições locais utilizando as mesmas métricas, mas em incrementos de meio metro ao longo do eixo principal de cada cena de rua. Isso permitiu que eles pudessem mapear a variação morfológica dentre essas medições locais. Finalmente, foram mapeados os resultados locais obtidos diretamente nos planos da favela, mostrando as pequenas diferenças da variação morfológica no contexto geral. Essas resoluções complementares forneceram para o estudo informações detalhadas sobre a morfologia da região estudada da Rocinha (Figura 35), que podem orientar intervenções destinadas a melhorar a infraestrutura ou reduzir o risco ambiental. No entanto, o fato de o levantamento não ter tido continuidade e não ter provocado qualquer efeito ou intervenção no objeto físico, ele não pode, ainda, ser considerado um DT.

Uma vantagem importante do método apresentado no Favelas 4D, e talvez o maior diferencial se comparado com outros trabalhos que usaram o sensor LiDAR para fins similares, é que a perspectiva terrestre provinda dos dados LiDAR privilegia a visão da rua. No artigo original em que o método é apresentado (SALAZAR MIRANDA et al., 2022), os autores o chamaram de ground-based LiDAR approach.



No mapa mostrado na Figura 35 (painel da esquerda), destacam-se duas grandes áreas que foram escaneadas na Rocinha para esse estudo, sendo área de encosta (hillside) e área de pátio (courtyard). Essas áreas cobrem cerca de 480 metros quadrados no total. O pátio está situado abaixo de uma estrada principal, enquanto a encosta está próxima a ela, porém em uma posição mais elevada na encosta. As figuras da direita mostram de forma ampliada o escaneamento das duas localidades para mostrar seu contexto. Ambas as áreas escaneadas encontram-se nas extremidades superior e externa da Rocinha, abrangendo uma variedade de condições presentes no desenvolvimento informal dessa região.



Figura 35. Mapa da rede de ruas da Rocinha.  
Fonte: SALAZAR MIRANDA et al., 2022.

O primeiro passo para o desenvolvimento das imagens 3D é a obtenção de nuvens de pontos utilizando o sensor LiDAR. As áreas destacadas na Figura 35 foram escaneadas de forma terrestre para gerar os dados que foram posteriormente usados para processamento que consiste basicamente em: 1) extração de planos da nuvem de pontos e 2) construção de cenas de rua a partir de planos. Na primeira etapa são identificados e extraídos os planos significativos da nuvem de pontos coletada pelo sensor LiDAR. Algoritmos específicos são aplicados para detectar regiões com características planares distintas, como fachadas de edifícios, ruas e calçadas. Esses planos são então isolados e segmentados para posterior análise e utilização na reconstrução das cenas de rua. Numa segunda etapa, com os planos extraídos da nuvem de pontos, inicia-se o processo de construção das cenas de rua. Cada plano identificado, representando uma superfície plana na paisagem urbana, serve como alicerce para a criação das estruturas tridimensionais.

Utilizando técnicas avançadas de modelagem 3D, os planos são expandidos e manipulados para formar os elementos fundamentais das cenas urbanas, como edifícios, ruas e passeios. Detalhes adicionais, como texturas e objetos urbanos, são adicionados para aprimorar a fidelidade e o realismo das cenas reconstruídas (Figura 36). Esse processo resulta em representações precisas e detalhadas das paisagens urbanas, adequadas para uma variedade de aplicações, incluindo planejamento urbano, simulações de tráfego e visualização arquitetônica.



Figura 36. Reconstrução 3D texturizada e colorizada.  
Fonte: SALAZAR MIRANDA et al., 2022.

As cenas de rua apresentadas nesse estudo, são projetadas para serem semicontínuas e sobrepostas, onde a mesma fachada pode aparecer em múltiplas ruas quando existem áreas públicas em ambos os lados da mesma parede. Além disso, elas variam substancialmente em tamanho, já que qualquer plano horizontal de qualquer escala pode ser considerado uma rua, desde que forme o plano de base correspondente às fachadas mais próximas. A forma 3D de cada cena de rua é apresentada na Figura 37, acompanhada pelos valores de cinco métricas morfológicas listados abaixo de cada cena. As cenas de rua são numeradas sequencialmente, de modo que as marcadas com números adjacentes estão localizadas lado a lado na favela. Dessa forma, a Figura 37 destaca a diversidade de tipos de ruas na favela. Uma das comparações que os autores destacam como exemplo é com relação as cenas mais compactas, como as cenas 09 e 10, que tendem a ter os valores mais baixos de '*street canyon*', enquanto as cenas alongadas com fachadas altas e ruas estreitas, 06, 07 e 8, exibem os valores mais altos. Também fica evidente nesse dado do estudo, as diferentes dimensões morfológicas que variam juntas. Por exemplo, as cenas 09 e 10 têm os valores

mais altos para largura da rua, podendo ser consideradas cenas principais, em contraste com as cenas 06, 07 e 8, que mostram valores mais baixos e podem ser descritas como isoladas ou de baixo tráfego.



Figura 37. Representação tridimensional de cada cena de rua.

Fonte: SALAZAR MIRANDA et al., 2022.

Vale destacar que as métricas morfológicas utilizadas nesse estudo capturaram as diferenças da favela. As métricas utilizadas, quantificam a forma, estrutura e organização espacial, e revelam padrões de crescimento e transformação urbana, o que é muito importante para o planejamento urbano. Baseado nos dados do Favela 4D, pode-se destacar que em áreas onde o desenvolvimento é contínuo, foi possível observar como as construções e infraestruturas se interconectam de maneira gradual e harmoniosa. Por outro lado, em áreas de descontinuidade, foi identificado fragmentações e irregularidades no desenvolvimento, o que pode ser consequência de barreiras físicas, sociais ou econômicas. Essa capacidade de análise detalhada é essencial para urbanistas e formuladores de políticas públicas, pois fornece uma base sólida para planejar intervenções que visam melhorar a infraestrutura, acessibilidade e qualidade de vida nas favelas. Assim, as métricas morfológicas não só nos ajudam a entender melhor a complexidade desses espaços urbanos, mas também a desenvolver soluções mais eficazes e inclusivas.

Outro dado interessante apresentado no Favela 4D, foi a análise local, que vai além da análise global (métricas para toda área escaneada), apresentando como cada métrica morfológica varia dentro de cada cena de rua individual. A Figura 38 apresenta os resultados da análise local para cada cena de rua. Em cada gráfico de barras, os valores de uma métrica específica são indicados em intervalos de meio metro ao longo do eixo principal da cena de rua. Diferentes

métricas, como comprimento da rua e cânion da rua, são apresentadas para cada determinada cena de rua, e estão mostradas por coluna e cor. Todos os valores são expressos em metros, exceto para o índice de cânion da rua, que é a relação entre a altura máxima das fachadas na cena e a largura da rua.

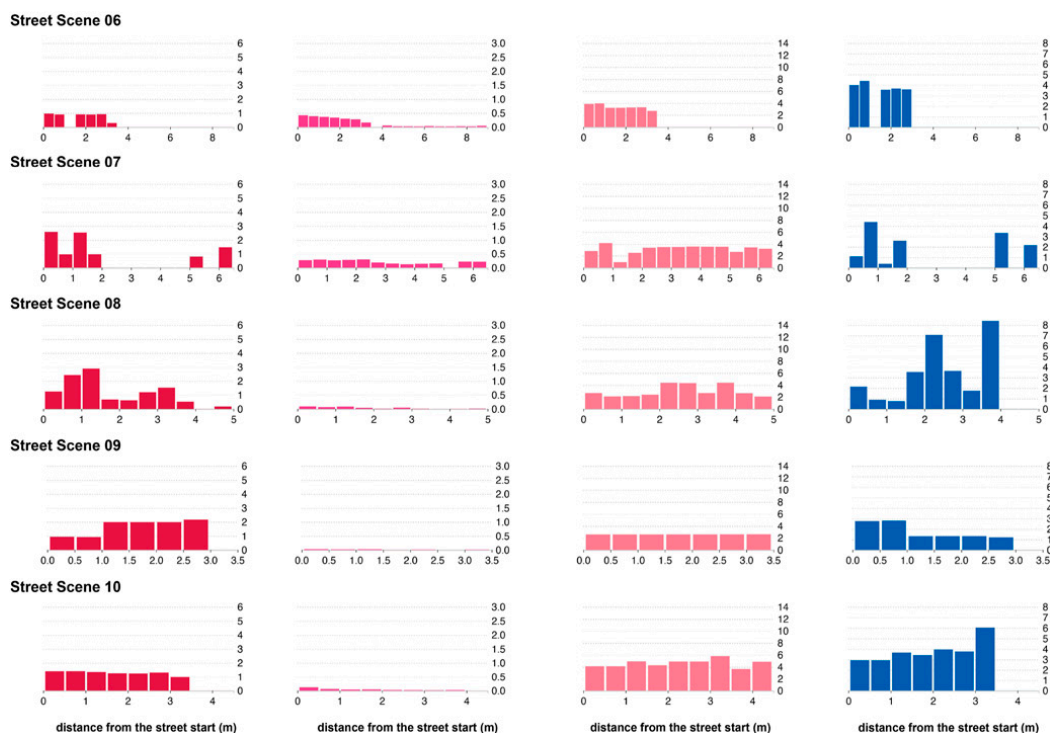


Figura 38. Resultados da análise local para cada cena de rua.

Fonte: SALAZAR MIRANDA et al., 2022.

Resultados da análise local para cada cena de rua. Cada gráfico de barras mostra os valores de uma métrica específica em intervalos de meio metro ao longo do eixo principal da cena da rua. Cada linha de gráficos representa uma cena de rua diferente, enquanto cada coluna e cor representa uma métrica distinta. Todos os valores são expressos em metros, com exceção do canyon da rua, que é uma relação entre a altura máxima da fachada na cena e a largura da rua (SALAZAR MIRANDA et al., 2022).



## 6 Conclusão

Diante dos desafios contemporâneos enfrentados pelas cidades e das futuras dificuldades no planejamento e na gestão urbana, conclui-se que os DTs representam uma ferramenta poderosa, oferecendo uma ampla gama de recursos a um custo financeiro e operacional viável e escalonável para aglomerações urbanas de qualquer dimensão (Figura 39). Destacam-se a velocidade, regularidade e precisão com que levantamentos e diagnósticos podem ser realizados nas conformações urbanas mais complexas, bem como a acessibilidade, interatividade intuitiva e atratividade estética que seus produtos podem proporcionar. Podem atuar como estrutura *back-bone* na gestão das *Smart Cities*, ou representação sistêmica do organismo urbano promovendo uma gestão eficiente e coerente com qualquer especificidade. Além disso, os DTs permitem a economia de recursos, atuam como plataforma para a simulação de diferentes cenários climáticos e a otimização operacional urbana, e facilitam a visualização de projetos edilícios e de infraestrutura urbana, promovendo a transparência e fundamentando a tomada de decisões antes de qualquer empenho financeiro ou intervenção física.

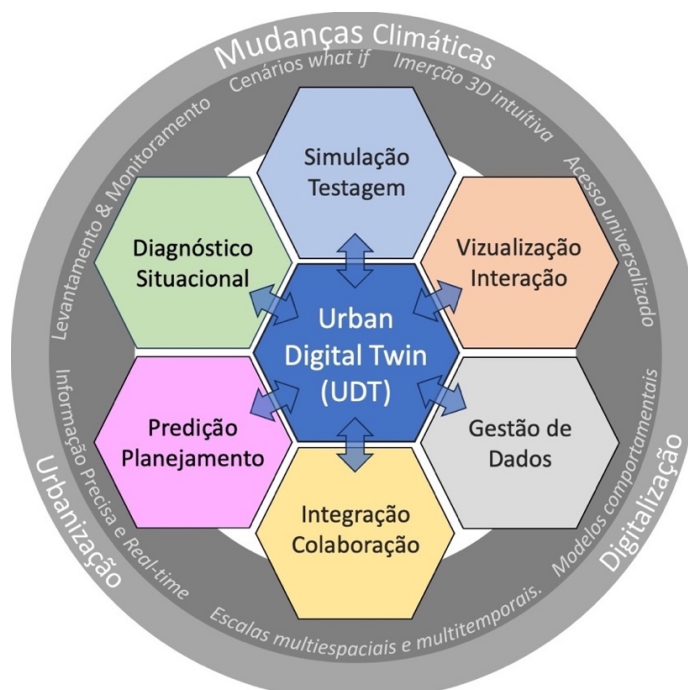


Figura 39. Principais recursos dos Urban Digital Twins  
Fonte: Elaboração própria

No contexto das mudanças climáticas, os DTs podem melhorar significativamente os esforços de resiliência e adaptação ao clima. Possibilitando

simulações fidedignas de vários cenários climáticos, construindo nas administrações e habitantes um melhor entendimento dos impactos potenciais da elevação do nível do mar, eventos climáticos extremos e mudanças de temperatura. Isso permite que urbanistas e gestores urbanos desenvolvam e implementem estratégias de resiliência eficazes. Além disso, os DTs podem modelar e verificar a efetividade de soluções de infraestrutura verde, como telhados verdes, pavimentos permeáveis e soluções baseadas na natureza para mitigar o efeito de ilha de calor urbano e gerenciar a água da chuva de maneira eficaz. Eles também desempenham um papel crucial na gestão de energia, otimizando a integração de fontes de energia renovável na rede urbana e melhorando o desempenho energético dos edifícios por meio de monitoramento contínuo, sugestões e testagem de novos projetos e retrofits. O monitoramento ambiental é outra aplicação crítica, onde os DTs acompanham a qualidade do ar e da água, identificam fontes de poluição e preveem tendências, permitindo medidas de mitigação direcionadas e iniciativas de redução da pegada de carbono.

Na gestão da urbanização acelerada, os DTs facilitam o planejamento e o desenvolvimento urbano otimizando o uso do solo e projetos de infraestrutura. Eles ajudam a analisar padrões de uso do solo e de recursos e, simular o impacto de novos desenvolvimentos, garantindo crescimento sustentável. Para transporte e mobilidade, os DTs modelam o fluxo de tráfego – inclusive em transportes ativos – otimizando redes e vias de transporte, reduzindo congestionamentos e melhorando a eficiência do transporte público ao analisar padrões de uso e otimizar rotas e horários. Eles também apoiam o desenvolvimento de habitação acessível, identificando áreas adequadas e garantindo acesso a serviços essenciais e infraestrutura. Além disso, os DTs otimizam a entrega de serviços essenciais, como saúde, educação e utilidades, garantindo que acompanhem o crescimento urbano.

Em relação à digitalização, os DTs são ideais para iniciativas de cidades inteligentes. Eles integram dados de dispositivos IoT por toda a cidade, criando um sistema de gestão urbana coeso e responsivo. Essa integração apoia processos de tomada de decisão baseados em dados, fornecendo uma plataforma para analisar grandes quantidades de dados em tempo real. Os DTs também aumentam o engajamento e os serviços aos cidadãos, criando plataformas interativas com interfaces intuitivas que permitem aos residentes visualizar e participar dos

processos de planejamento urbano. Otimizam os processos de consulta a legislação, e aprovações através da visualização contextualizada e análise de conformidade de novos projetos. Eles melhoram a entrega de serviços públicos por meio da análise de dados em tempo real e da manutenção preditiva da infraestrutura.

Os DTs também desempenham um papel crucial em segurança cibernética e privacidade de dados, modelando e testando medidas de segurança cibernética para proteger dados urbanos e infraestrutura contra ameaças cibernéticas. Eles também apoiam práticas eficazes de gerenciamento de dados, garantindo a privacidade dos dados e conformidade com as regulamentações.

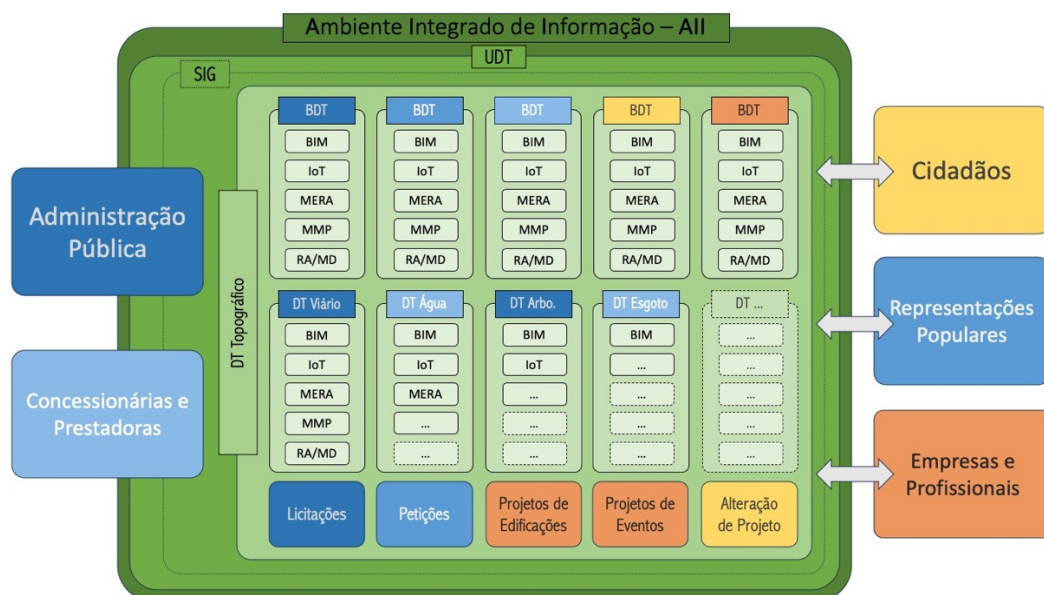


Figura 40. Esquema de Composição do AII  
Fonte: Elaboração própria

Foi verificada a eficácia dos DTs para diversas finalidades, mas apesar do constante avanço dos UDTs, ainda não foi observado um que reúna todos os potenciais recursos e substitua os modelos tradicionais de organização institucional, documental e burocrática.

Como resultado deste estudo, propomos o desenvolvimento do Ambiente de Informação Integrada (AII) (Figura 40), que integra uma plataforma gestora a um banco de dados multisource e multicamadas através de um sistema geoespacial com hierarquia ontológica que aglutinaria e disponibilizaria para qualquer ator – com nível de acesso coerente com o perfil – informações ilimitadas e multiespectrais, podendo ser desenvolvido de maneira escalonável e com complexidade e recursos compatíveis com a respectiva administração gestora.

## 7 Referências bibliográficas

AGUIAR, P. C. B. DE et al. Urbanização e desenvolvimento sustentável: um panorama dos estados brasileiros. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 27, p. e73970, 29 dez. 2023.

AL FARUQUE, M. A. et al. Cognitive Digital Twin for Manufacturing Systems. 2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). *Anais...IEEE*, 1 fev. 2021.

AL NUAIMI, E. et al. Applications of big data to smart cities. *Journal of Internet Services and Applications*, v. 6, n. 1, p. 25, 1 ago. 2015.

AL-DABBAGH, R. Dubai, the sustainable, smart city. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, v. 7, p. 3, 6 jan. 2022.

BALOGUN, A.-L. et al. Assessing the Potentials of Digitalization as a Tool for Climate Change Adaptation and Sustainable Development in Urban Centres. *Sustainable Cities and Society*, v. 53, p. 101888, fev. 2020.

BANNISTER, F.; CONNOLLY, R. ICT, public values and transformative government: A framework and programme for research. *Government Information Quarterly*, v. 31, n. 1, p. 119–128, jan. 2014.

BARATA, J.; KAYSER, I. How will the digital twin shape the future of industry 5.0? *Technovation*, v. 134, p. 103025, jun. 2024.

BARNS, S. Negotiating the platform pivot: From participatory digital ecosystems to infrastructures of everyday life. *Geography Compass*, v. 13, n. 9, 30 set. 2019.

BARRICELLI, B. R.; CASIRAGHI, E.; FOGLI, D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, v. 7, p. 167653–167671, 2019.

BATTY, M. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 45, n. 5, p. 817–820, 10 set. 2018a.

BATTY, M. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 45, n. 5, p. 817–820, 10 set. 2018b.

BELYAKOVA, O. V. Digital Transformation Of Public Administration: Achievements And Problems. 30 abr. 2021.

BERTOT, J. C.; JAEGER, P. T.; GRIMES, J. M. Using ICTs to create a culture of transparency: E-government and social media as openness and anti-corruption tools for societies. *Government Information Quarterly*, v. 27, n. 3, p. 264–271, jul. 2010.



BIBRI, S. E. et al. Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: an integrated approach to an extensive literature review. *Energy Informatics*, v. 6, n. 1, p. 9, 5 abr. 2023.

BIBRI, S. E.; KROGSTIE, J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, v. 31, p. 183–212, maio 2017.

BITUŠÍKOVÁ, A. Urban Activism in Central and Eastern Europe: A Theoretical Framework. *Slovenský národopis*, n. 15, p. 326–338, 2015.

BOANADA-FUCHS, A.; KUFFER, M.; SAMPER, J. A Global Estimate of the Size and Location of Informal Settlements. *Urban Science*, v. 8, n. 1, p. 18, 5 mar. 2024.

BODO, T. Rapid Urbanisation: Theories, Causes, Consequences and Coping Strategies. *Annals of Geographical Studies*, v. 2, n. 3, p. 32–45, 2019.

BOJE, C. et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, v. 114, p. 103179, jun. 2020.

BOND, E. READING LONDON: URBAN SPECULATION AND IMAGINATIVE GOVERNMENT EIGHTEENTH-CENTURY LITERATURE. Columbus : The Ohio State University Press, 2007.

BOTÍN-SANABRIA, D. M. et al. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, v. 14, n. 6, p. 1335, 9 mar. 2022.

BRENNER, N.; MARCUSE, P.; MAYER, M. Cities for People, Not for Profit: Critical Urban Theory and the Right to the City. Oxon/NewYork: Routledge, 2012, 2012.

BULKELEY, H.; TUTS, R. Understanding urban vulnerability, adaptation and resilience in the context of climate change. *Local Environment*, v. 18, n. 6, p. 646–662, 25 jul. 2013.

BUSH, J.; DOYON, A. Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? *Cities*, v. 95, p. 102483, dez. 2019.

CALDARELLI, G. et al. The role of complexity for digital twins of cities. *Nature Computational Science*, v. 3, n. 5, p. 374–381, 1 maio 2023.

CALVIN, K. et al. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias et al., Eds.). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>.

CAMERO, A.; ALBA, E. Smart City and information technology: A review. *Cities*, v. 93, p. 84–94, out. 2019.

CARAGLIU, A.; DEL BO, C.; NIJKAMP, P. Smart Cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, v. 18, n. 2, p. 65–82, abr. 2011.

CAVALCANTI, A. R. C. Work, Slums, and Informal Settlement Traditions: Architecture of the Favela Do Telegrafo. *Traditional Dwellings and Settlements Review*, v. 28, n. 2, p. 71–81, 2017.

CEPAL; ONU-HABITAT; MINURVI. Plan de Acción Regional para la implementación de la Nueva Agenda Urbana en América Latina y el Caribe 2016-2036. Santiago: [s.n.].

CHEN, B. et al. Optimize urban shade using digital twins of cities. *Nature*, v. 622, n. 7982, p. 242–242, 12 out. 2023.

CITY OF HELSINKI. Helsinki 3D.

CITY OF SIDNEY. Smart city strategic framework. Sydney: [s.n.].

CITY OF TORONTO. DIGITAL INFRASTRUCTURE STRATEGIC FRAMEWORK. Toronto: [s.n.].

CORDELLA, A.; BONINA, C. M. A public value perspective for ICT enabled public sector reforms: A theoretical reflection. *Government Information Quarterly*, v. 29, n. 4, p. 512–520, out. 2012.

DAVIS, M. Planet of Slums. [s.l: s.n.]. v. 23

DEMBSKI, F. et al. Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*, v. 12, n. 6, p. 2307, 16 mar. 2020.

DENG, S. et al. A systematic review on the current research of digital twin in automotive application. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, v. 3, p. 180–191, 2023.

DENG, T.; ZHANG, K.; SHEN, Z.-J. (MAX). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, v. 6, n. 2, p. 125–134, jun. 2021.

DEREN, L.; WENBO, Y.; ZHENFENG, S. Smart city based on digital twins. *Computational Urban Science*, v. 1, n. 1, p. 4, 29 dez. 2021.

DESA - UNITED NATIONS. United Nations Population Division, World Urbanization Prospects: The 2005 Revision . New York: [s.n.].

EIRINAKIS, P. et al. Enhancing Cognition for Digital Twins. 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). Anais...IEEE, jun. 2020.

EROL, T.; MENDI, A. F.; DOGAN, D. The Digital Twin Revolution in Healthcare. 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). Anais...IEEE, 22 out. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. Smart cities.

FAN, C. et al. Disaster City Digital Twin: A vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management. *International Journal of Information Management*, v. 56, p. 102049, fev. 2021.

FARSI, M. et al. (EDS.). *Digital Twin Technologies and Smart Cities*. Cham: Springer International Publishing, 2020.

FERRÉ-BIGORRA, J.; CASALS, M.; GANGOLELLS, M. The adoption of urban digital twins. *Cities*, v. 131, p. 103905, dez. 2022.

FRANCISCO, A.; MOHAMMADI, N.; TAYLOR, J. E. Smart City Digital Twin–Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. *Journal of Management in Engineering*, v. 36, n. 2, mar. 2020a.

FRANCISCO, A.; MOHAMMADI, N.; TAYLOR, J. E. Smart City Digital Twin–Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. *Journal of Management in Engineering*, v. 36, n. 2, mar. 2020b.

FULLER, A. et al. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, v. 8, p. 108952–108971, 2020.

GAO, Y. et al. Digital Twin and Its Application in Transportation Infrastructure. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Anais...IEEE, 15 jul. 2021.

GEVAERT, C. M. et al. Informal settlement classification using point-cloud and image-based features from UAV data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 125, p. 225–236, mar. 2017.

GEYER, H. S. et al. *International Handbook of Urban Policy: Issues in the Developed World*. [s.l.] Edward Elgar Publishing, 2009. v. 2

GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA. Anais...Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 23 abr. 2012.

GOURISARIA, M. K. et al. Artificially Intelligent and Sustainable Smart Cities. Em: [s.l.: s.n.]. p. 237–268.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Em: Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 85–113.

GRIEVES, M. W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, v. 2, n. 1/2, p. 71–84, 2005.

GRIMM, N. B. et al. Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, v. 319, n. 5864, p. 756–760, 8 fev. 2008.

GULFNEWS. Saudi Arabia's Vision 2030 projects reach \$1.3 trillion in value. *GulfNews*, 10 set. 2024.

HÄMÄLÄINEN, M. Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*, v. 3, n. 4, p. 201–210, 30 dez. 2021.

HARRISON, R.; VERA, D. A.; AHMAD, B. A Connective Framework to Support the Lifecycle of Cyber–Physical Production Systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 109, n. 4, p. 568–581, abr. 2021.

HEAVIN, C.; POWER, D. J. Challenges for digital transformation – towards a conceptual decision support guide for managers. *Journal of Decision Systems*, v. 27, n. sup1, p. 38–45, 15 maio 2018.

HENDERSON, J. V. CITIES AND DEVELOPMENT. *Journal of Regional Science*, v. 50, n. 1, p. 515–540, fev. 2010.

HOLLANDS, R. G. Will the real smart city please stand up? *City*, v. 12, n. 3, p. 303–320, 26 dez. 2008.

HURTADO, P.; GOMEZ, A. Smart City Digital Twins Are a New Tool for Scenario Planning. *APA - Planning Magazine*, 2021.

JAGATHEESAPERUMAL, S. K.; RAHOUTI, M. Building Digital Twins of Cyber Physical Systems With Metaverse for Industry 5.0 and Beyond. *IT Professional*, v. 24, n. 6, p. 34–40, 1 nov. 2022.

JANSSEN, M. et al. Driving public sector innovation using big and open linked data (BOLD). *Information Systems Frontiers*, v. 19, n. 2, p. 189–195, 13 abr. 2017.

JANSSEN, M.; VAN DER VOORT, H. Adaptive governance: Towards a stable, accountable and responsive government. *Government Information Quarterly*, v. 33, n. 1, p. 1–5, jan. 2016.

JEDWAB, R.; VOLLRATH, D. Urbanization without growth in historical perspective. *Explorations in Economic History*, v. 58, p. 1–21, out. 2015.

JONES, D. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 29, p. 36–52, maio 2020.

KETZLER, B. et al. Digital Twins for Cities: A State of the Art Review. *Built Environment*, v. 46, n. 4, p. 547–573, 1 dez. 2020.

KOHN, M. *The death and life of the urban commonwealth*. Newyork: Oxford University Press, 2016.

KOOKANA, R. S. et al. Urbanisation and emerging economies: Issues and potential solutions for water and food security. *Science of The Total Environment*, v. 732, p. 139057, ago. 2020.

KSHETRI, N. The Economics of Digital Twins. *Computer*, v. 54, n. 4, p. 86–90, abr. 2021.

KWILINSKI, A.; LYULYOV, O.; PIMONENKO, T. The Effects of Urbanisation on Green Growth within Sustainable Development Goals. *Land*, v. 12, n. 2, p. 511, 20 fev. 2023.

LEE, D.; LEE, S. Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction. *Applied Sciences*, v. 11, n. 13, p. 5909, 25 jun. 2021.

LENG, J. et al. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 60, p. 119–137, jul. 2021.

LI, L. et al. Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. *IEEE Access*, v. 10, p. 9543–9562, 2022.

LUNA-REYES, L. F.; GIL-GARCIA, J. R. Digital government transformation and internet portals: The co-evolution of technology, organizations, and institutions. *Government Information Quarterly*, v. 31, n. 4, p. 545–555, out. 2014.

LYONS, G. et al. The dynamics of urban metabolism in the face of digitalization and changing lifestyles: Understanding and influencing our cities. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 132, p. 246–257, maio 2018.

MADANIPOUR, A. Roles and Challenges of Urban Design. *Journal of Urban Design*, v. 11, n. 2, p. 173–193, jun. 2006.

MADUBUIKE, O. C.; ANUMBA, C. J.; KHALLAF, R. A review of digital twin applications in construction. *Journal of Information Technology in Construction*, v. 27, p. 145–172, 23 fev. 2022.

MAIOLINO, A. L. G. et al. O uso do solo urbano: históricas desigualdades, novas leis e algumas percepções de moradores da favela da Rocinha. *Estudos e Pesquisas em Psicologia*, v. 7, n. 2, p. 243–256, 1 ago. 2007.

MALIK, K. R. et al. A methodology for real-time data sustainability in smart city: Towards inferencing and analytics for big-data. *Sustainable Cities and Society*, v. 39, p. 548–556, maio 2018.

MANNINO, A.; DEJACO, M. C.; RE CECCONI, F. Building Information Modelling and Internet of Things Integration for Facility Management—Literature Review and Future Needs. *Applied Sciences*, v. 11, n. 7, p. 3062, 30 mar. 2021.

MATHUPRIYA, S. et al. WITHDRAWN: Digital twin technology on IoT, industries & other smart environments: A survey. *Materials Today: Proceedings*, dez. 2020.

MEIJER, A.; BOLÍVAR, M. P. R. Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance. *International Review of Administrative Sciences*, v. 82, n. 2, p. 392–408, 29 jun. 2016.

MERGEL, I.; EDELMANN, N.; HAUG, N. Defining digital transformation: Results from expert interviews. *Government Information Quarterly*, v. 36, n. 4, p. 101385, out. 2019.

MINERVA, R.; LEE, G. M.; CRESPI, N. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. *Proceedings of the IEEE*, v. 108, n. 10, p. 1785–1824, out. 2020.

MOLINA, M. J.; MOLINA, L. T. Megacities and Atmospheric Pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 54, n. 6, p. 644–680, 22 jun. 2004.

MORTLOCK, T. et al. Graph Learning for Cognitive Digital Twins in Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, v. 10, n. 1, p. 34–45, 1 jan. 2022.

MOS, E. Digital platforms and the (re)organization of solidarity.

MUKEKU, J. Urban Slum Morphology and Socio-economic Analogies: A Case Study of Kibera Slum, Nairobi, Kenya. *Urbanisation*, v. 3, n. 1, p. 17–32, 6 maio 2018.

MYLONAS, G. et al. Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. *IEEE Access*, v. 9, p. 143222–143249, 2021.

NAHAVANDI, S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, v. 11, n. 16, p. 4371, 13 ago. 2019.

NISHANT, R.; KENNEDY, M.; CORBETT, J. Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda. *International Journal of Information Management*, v. 53, p. 102104, ago. 2020.

NOCHTA, T. et al. A Socio-Technical Perspective on Urban Analytics: The Case of City-Scale Digital Twins. *Journal of Urban Technology*, v. 28, n. 1–2, p. 263–287, 3 abr. 2021.

O'DONNELL, R. *Transformative Digital Technology for Effective Workplace Learning*. Boca Raton: Auerbach Publications, 2021.

OPOKU, D.-G. J. et al. Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102726, ago. 2021.

PARK, S. et al. AI-Based Physical and Virtual Platform with 5-Layered Architecture for Sustainable Smart Energy City Development. *Sustainability*, v. 11, n. 16, p. 4479, 19 ago. 2019.

PATAKI, D. E. et al. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology*, v. 12, n. 11, p. 2092–2102, 22 nov. 2006.

PIROMALIS, D.; KANTAROS, A. Digital Twins in the Automotive Industry: The Road toward Physical-Digital Convergence. *Applied System Innovation*, v. 5, n. 4, p. 65, 7 jul. 2022.

PRABHU, R.; PARVATHAVARTHINI, B.; ALAGU RAJA, R. A. Slum Extraction from High Resolution Satellite Data using Mathematical Morphology based approach. *International Journal of Remote Sensing*, v. 42, n. 1, p. 172–190, 2 jan. 2021.

PURCELL, M. Citizenship and the right to the global city: reimagining the capitalist world order. *International Journal of Urban and Regional Research*, v. 27, n. 3, p. 564–590, 13 set. 2003.

PURCELL, M. *Recapturing Democracy*. [s.l.] Routledge, 2008.

RICHARDSON, L. *Sharing economy*. Los Angeles: Sage, 2019. v. Digital geographies

ROSE, G. et al. Platform urbanism, smartphone applications and valuing data in a smart city. *Transactions of the Institute of British Geographers*, v. 46, n. 1, p. 59–72, 28 mar. 2021.

RUOHOMAKI, T. et al. Smart City Platform Enabling Digital Twin. 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS). *Anais...IEEE*, set. 2018.

SALAZAR MIRANDA, A. et al. Favelas 4D: Scalable methods for morphology analysis of informal settlements using terrestrial laser scanning data. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 49, n. 9, p. 2345–2362, 27 nov. 2022.

SCHMITT, A. et al. Investigation on the separability of slums by multi-aspect TerraSAR-X dual-co-polarized high resolution spotlight images based on the



multi-scale evaluation of local distributions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 64, p. 181–198, fev. 2018.

SCHROTTER, G.; HÜRZELER, C. The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, v. 88, n. 1, p. 99–112, 4 fev. 2020.

SEGOVIA, M.; GARCIA-ALFARO, J. Design, Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*, v. 22, n. 14, p. 5396, 20 jul. 2022.

SEMERARO, C. et al. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, v. 130, p. 103469, set. 2021.

SETO, K. C.; GÜNERALP, B.; HUTYRA, L. R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 40, p. 16083–16088, 2 out. 2012.

SHRUTI, S. et al. Development of Environmental Decision Support System for Sustainable Smart Cities in India. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 41, n. 5, 3 set. 2022.

SILVA, B. N.; KHAN, M.; HAN, K. Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 38, p. 697–713, abr. 2018.

SINHAROY, S. S.; PITTLUCK, R.; CLASEN, T. Review of drivers and barriers of water and sanitation policies for urban informal settlements in low-income and middle-income countries. *Utilities Policy*, v. 60, p. 100957, out. 2019.

SLIUZAS, R. et al. Slum mapping: From space to unmanned aerial vehicle based approaches. . Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). *Anais...Dubai, United Arab Emirates*: mar. 2017.

SMART NATION AND DIGITAL GOVERNMENT OFFICE. *Smart Nation: The Way Forward* . [s.l: s.n.].

SOFESKA, E. Understanding the Livability in a City Through Smart Solutions and Urban Planning Toward Developing Sustainable Livable Future of the City of Skopje. *Procedia Environmental Sciences*, v. 37, p. 442–453, 2017.

SOHAIL, A. et al. Beyond Data, Towards Sustainability: A Sydney Case Study on Urban Digital Twins. *Emerging Technologies*, 7 jun. 2024.

SOUZA, L.; BUENO, C. City Information Modelling as a support decision tool for planning and management of cities: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Building and Environment*, v. 207, p. 108403, jan. 2022.

SRNICEK, N.; DE SUTTER, L. *Platform Capitalism*. Cambridge: Polity Press, 2017.

STADT ZÜRICH. Smart City Zurich.

STAEHELI, L. A. Cities and Citizenship. *Urban Geography*, v. 24, n. 2, p. 97–102, 16 mar. 2003.

STOBART, J. An eighteenth-century revolution? Investigating urban growth in north-west England, 1664–1801. *Urban History*, v. 23, n. 1, p. 26–47, 9 maio 1996.

TAO, F. et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, abr. 2019.

THE WORLD BANK. The World Bank Annual Report 2020. [s.l.] World Bank, Washington, DC, 2020.

UN-DRR. UNDRR Anual Report 2023. Geneva: [s.n.].

UN-HABITAT. WHAT IS A CITY? [s.l.: s.n.]. Disponível em: <unhabitat.org>. Acesso em: 6 jul. 2023.

UN-HABITAT. World Cities Report 2022 . Nairobi: [s.n.].

UNITED NATIONS. World Population Prospects 2019: Highlights. [s.l.] UN, 2019.

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION. The Sustainable Development Goals Report 2018. New York: United Nations Publications, 2018.

U.S. CENSUS BUREAU. Current Population Survey, 2007 Annual Social and Economic (ASEC) Supplement. WASHINGTON: [s.n.].

VANDERHORN, E.; MAHADEVAN, S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, v. 145, p. 113524, jun. 2021.

VIANA, A. C. A. Transformação digital na Administração Pública: do Governo Eletrônico ao Governo Digital. *International Journal of Digital Law*, v. 2, n. 1, p. 29–46, 12 fev. 2021.

WANG, W. et al. BIM Information Integration Based VR Modeling in Digital Twins in Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 28, p. 100351, jul. 2022.

WEIL, C. et al. Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 99, p. 104862, dez. 2023.

WHITE, G. et al. A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, v. 110, p. 103064, mar. 2021.

WONG, J. K. W.; GE, J.; HE, S. X. Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions. *Automation in Construction*, v. 92, p. 312–326, ago. 2018.

WORLD BANK. World Bank Annual Report 2023. Washington, DC: [s.n.].

XIA, H. et al. Study on city digital twin technologies for sustainable smart city design: A review and bibliometric analysis of geographic information system and building information modeling integration. *Sustainable Cities and Society*, v. 84, p. 104009, set. 2022.

YEON, H. et al. DTUMOS, digital twin for large-scale urban mobility operating system. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 5154, 29 mar. 2023.

YIGITCANLAR, T. et al. Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*, v. 45, p. 348–365, fev. 2019.

YIGITCANLAR, T. et al. Contributions and Risks of Artificial Intelligence (AI) in Building Smarter Cities: Insights from a Systematic Review of the Literature. *Energies*, v. 13, n. 6, p. 1473, 20 mar. 2020.

ZHANG, X. Q. The trends, promises and challenges of urbanisation in the world. *Habitat International*, v. 54, p. 241–252, maio 2016.