

Gêmeos Digitais Aplicados à Circularidade Urbana: Perspectivas para Cidades Sustentáveis

1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As cidades desempenham um papel-chave nos desafios globais de sustentabilidade, sendo responsáveis por grande parte do consumo de recursos, geração de resíduos e emissões de gases de efeito estufa (Turrado Domínguez et al., 2022). Esse cenário se agrava com a tendência global de urbanização, que deve trazer mais de 25% da população mundial para centros urbanos até 2050 (Sukhdev et al., 2017). Sendo assim, para alcançar a sustentabilidade é necessário que os sistemas urbanos se tornem circulares.

A Economia Circular (EC) surge como uma alternativa ao modelo linear de extração, propondo uma reestruturação dos padrões urbanos (The Ellen MacArthur Foundation, 2015). Esta abordagem alinha-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, em especial ao ODS 11 Cidades e Comunidades Sustentáveis, que busca tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (United Nations, 2015). No âmbito da agenda climática e do Acordo de Paris, as áreas urbanas têm um papel central na implementação de estratégias de descarbonização, visando contribuir com os processos de mitigação e adaptação às alterações climáticas. A transição para uma EC urbana pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e aumentar a resiliência climática. No entanto, a falta de integração entre subsistemas como edificações, mobilidade e manufatura ainda é um desafio (Çetin et al., 2021). Nesse sentido, as ferramentas computacionais desempenham um papel crucial, oferecendo suporte para coleta de dados, simulação e otimização do fluxo de recursos nos sistemas urbanos.

A tecnologia digital oferece oportunidades para otimizar os fluxos de materiais nas cidades e melhorar a circularidade urbana (Sukhdev et al., 2017). No entanto, a pesquisa sobre o uso de tecnologias da Indústria 4.0 nesse contexto ainda é limitada, exigindo uma abordagem mais sistêmica e holística para integrar múltiplos fatores no design e na avaliação da circularidade urbana (Weil et al., 2023a; D'Amico et al., 2022). Neste contexto, os Gêmeos Digitais (GD) emergem como uma ferramenta crucial para promover a circularidade urbana.

Os modelos de GDs aplicados na escala urbana são ferramentas essenciais para testar e otimizar políticas urbanas, minimizando riscos e maximizando a eficiência. Com réplicas digitais que simulam fluxos em tempo real, eles facilitam a análise integrada dos subsistemas urbanos, identificando sinergias e pontos de desperdício, oferecendo uma plataforma para a experimentação de políticas públicas e maior envolvimento comunitário (Grieves & Vickers, 2017; Doody, 2019). Entretanto, os GDs enfrentam limitações na aplicação para circularidade urbana, com maior foco na coleta de dados do que no suporte à decisão, evidenciando a necessidade de maior desenvolvimento metodológico (Çetin et al., 2021). Para superar esse desafio, é necessário desenvolver métricas dinâmicas que integrem múltiplas escalas temporais e espaciais (D'amico et. al., 2022).

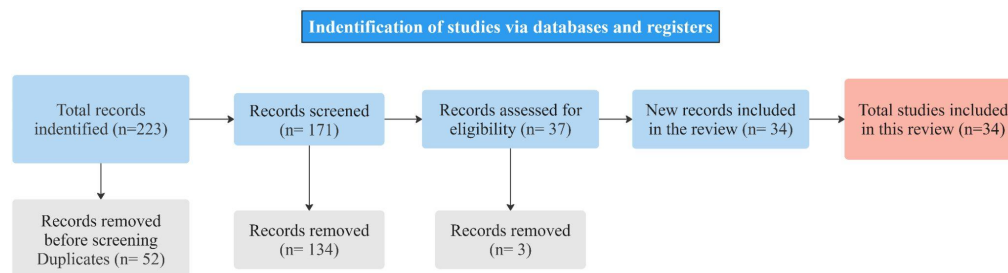
Nesta pesquisa, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a aplicação de GDs na EC em áreas urbanas. O objetivo foi identificar os principais métodos computacionais utilizados e relacioná-los com os indicadores de avaliação da circularidade urbana, conforme apresentados em uma RSL recentemente publicada sobre EC para Áreas Urbanas (Gejer & Silva, 2024). Com isso, busca-se fundamentar o desenvolvimento de um Gêmeo Digital Urbano (GDU) capaz de auxiliar de forma eficaz na gestão e no planejamento urbano, alinhado com os princípios da sustentabilidade e da resiliência climática.

2. METODOLOGIA

A RSL visou mapear pesquisas sobre GDUs, de acordo com o conceito de EC (Booth et al., 2016). Considerando a natureza emergente e interdisciplinar do tema, foram incluídos termos relacionados como "metabolismo urbano", "circularidade urbana" e "cidade circular". O termo “*City Information Model*” (CIM) também foi adicionado, pois, nos campos de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), CIMs e BIMs (*Building Information Modeling*) são, muitas vezes, utilizados de forma intercambiável com GDs. A literatura sugere que modelos baseados em CIM e BIM evoluem para GDs ao incorporar simulações preditivas e dados em tempo real (Grieves & Vickers, 2017). A RSL seguiu as diretrizes da PRISMA 2020 (Page et al., 2021) para garantir transparência e reprodutibilidade.

Entre 25 de agosto de 2024 e 09 de setembro de 2024, foram realizadas buscas nas bases de dados Dimensions e Web of Science, escolhidas pela sua abrangência e alta qualidade. Foram incluídos apenas documentos revisados por pares, incluindo artigos publicados em periódicos científicos, conferências e livros, nos idiomas inglês, espanhol e português. Os critérios de inclusão exigiam que os estudos abordassem a aplicação de GDs à circularidade urbana. Ferramentas de automação, como Elsevier Mendeley para gestão de referências e Rayyan para remoção de documentos duplicados e triagem de estudos, foram utilizadas para otimizar o processo. No total, 223 documentos foram examinados por dois pesquisadores, mas apenas 34 atenderam aos critérios de inclusão e foram avaliados na RSL, conforme o procedimento apresentado na figura 1. Análises usando metadados bibliográficos do Crossref.org foram realizadas com o software VOSviewer.

Figura 1 - Fluxo de procedimento da RSL



Fonte: autores, 2024.

Indicadores de circularidade urbana foram extraídos de uma RSL sobre EC em Áreas Urbanas (Gejer & Silva, 2024). Esses indicadores foram sistematizados para integração em um GD da cidade. De um total de 110 indicadores, 37 foram considerados relevantes e agrupados em 9 categorias, conforme a classificação de suas autoras, para maior concisão. Para a elaboração de um fluxo de trabalho para o desenvolvimento de um GDU, os 34 estudos selecionados na RSL acerca de GD aplicados na EC foram classificados dentro dessas 9 categorias de acordo com sua abrangência.

Para facilitar a visualização e compreensão dos resultados, o método de *mind mapping* foi utilizado com o auxílio da ferramenta MIRO. Essa abordagem permitiu organizar e relacionar de maneira clara os indicadores e suas aplicações no contexto de GDUs e da circularidade urbana.

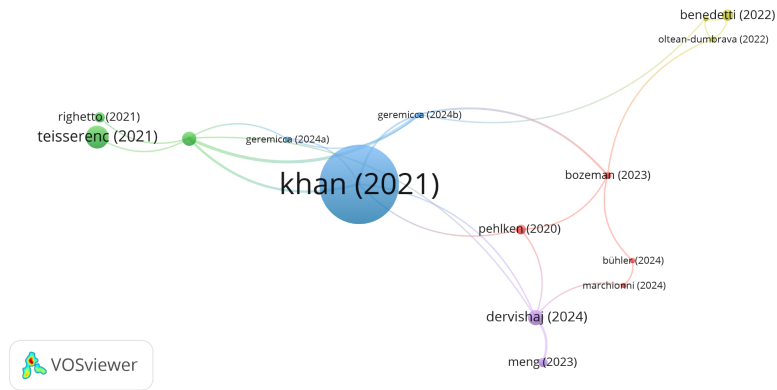
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da RSL sobre publicações que discutem GDs aplicados à EC em escala urbana demonstram que o tema ainda está em sua fase inicial. Dos 34 artigos incluídos, a publicação mais antiga da amostra é de 2019, aumentando em número de publicações a partir

de 2021 e, apesar do mapeamento ter sido realizado em agosto de 2024, o número de publicações foi maior neste ano. Embora apenas dois artigos tenham sido classificados como revisões em seus metadados, após uma análise mais detalhada, ficou claro que mais da metade da amostra poderia ser classificada como tal. Esses artigos não discutiram implementações ou indicadores específicos, mas sim a importância da digitalização para alcançar a circularidade em escala urbana, utilizando revisões de literatura, grupos focais e entrevistas com especialistas (Bozeman et. al., 2023; Çetin et. al., 2021).

A análise do acoplamento bibliométrico por documentos (*Bibliometric coupling by documents*), realizado no VOSviewer, mostra a falta de documentos influentes na área, ilustrando a ausência de um consenso sobre o que é um GDU para a EC (Figura 2). Os documentos com o maior número de conexões são artigos de revisão da literatura que utilizam métodos sistemáticos (Çetin et al., 2021; Khan et al., 2021). Já a análise de coautoria mostra que ainda há pouca colaboração cruzada sobre o tema. Dos 91 autores na amostra, apenas 13 colaboraram em diferentes documentos na amostra.

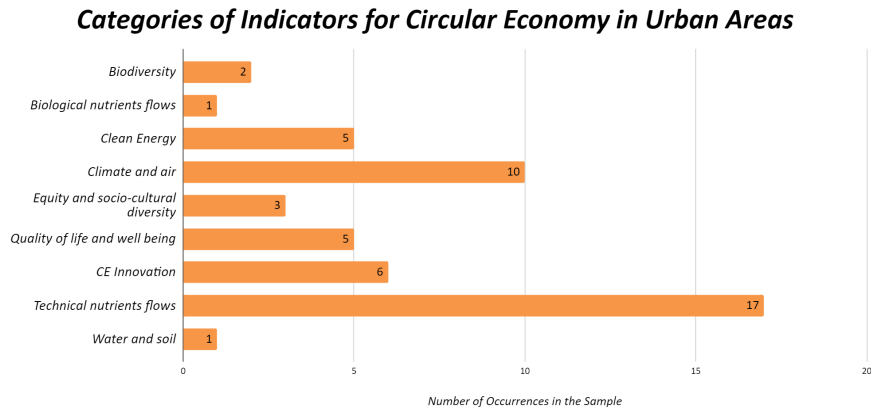
Figura 2 - *Bibliometric coupling by documents* no VOSviewer.



Fonte: autores, 2024.

Conforme mostrado na Figura 3, a análise dos 34 estudos, organizados nas 9 categorias desenvolvidas por Gejer e Silva (2024), revelou que o tema mais prevalente foi "*Technical nutrients flows*", com 17 documentos discutindo esse tópico. O segundo tema mais comum foi "*Climate and air*", abordado em 10 estudos. Apenas um artigo focou especificamente na aplicação de GDs para o metabolismo urbano e cinco estudos exploraram o uso de GDs em relação a resíduos sólidos urbanos.

Figura 3 - Distribuição da RSL nas categorias desenvolvidas por Gejer e Silva (2024)



Fonte: autores, 2024.

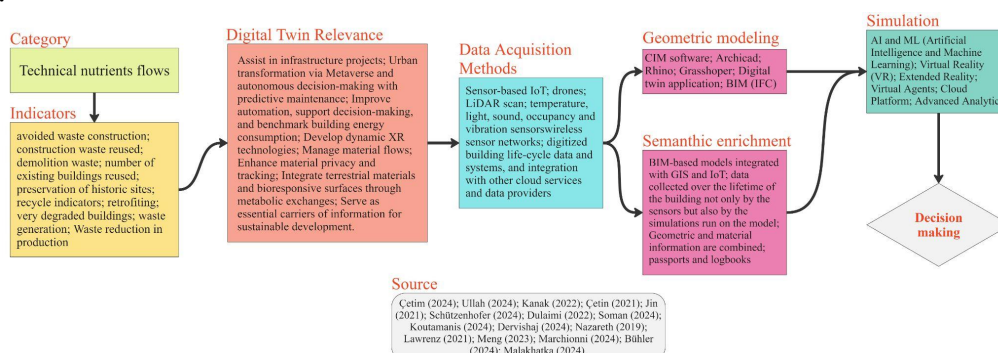
Dos indicadores analisados nos documentos da amostra, destacam-se materiais reciclados e reutilizados para construção, geração de resíduos, reutilização de resíduos de construção e demolição. Isso se deve ao foco da maioria dos estudos no estoque de edifícios, uma área bem desenvolvida no uso de GDs para a gestão e avaliação do ciclo de vida dos edifícios, utilizando principalmente o BIM. Nesses estudos, conceitos de circularidade em edifícios foram aplicados a uma escala urbana. No entanto, nenhum estudo abordou GDs relacionados à mobilidade urbana, sugerindo a necessidade de mais pesquisas nesse tema.

Os estudos mostram que GDUs podem simplificar a sua complexidade geométrica e computacional sem perder sua utilidade no planejamento urbano. Dulaimi et al. (2022) destacam que esses GDs não precisam depender de dados geométricos, enquanto Martindale & Lucas (2022) utilizam Sistema de Informação Geográfica (SIG) para mapear fluxos de alimentos e bebidas. Benedetti et al. (2022) combinam GDs e SIG para prever o impacto de edifícios antigos em Bologna, visando melhorar a circularidade urbana. Esses GDs simplificados podem facilitar sua aplicação em planejamento e gestão urbana, além de promover maior transparência, *accountability* e participação pública.

A RSL revelou uma escassez de implementações práticas de GDUs voltadas para a circularidade urbana. A maioria dos casos foca no ciclo de vida dos edifícios e na gestão de resíduos de construção, com pouca atenção ao uso de GDUs para melhorar a participação pública ou a governança. Políticas públicas para GDs devem ser integradas e coordenadas entre diferentes níveis de governo e setores. A participação ativa da sociedade, facilitada por plataformas digitais, é essencial para o sucesso dos projetos. Apesar do potencial dos GDUs para a governança, faltam diretrizes claras sobre indicadores e métodos de dados.

Foi realizado um fluxo de trabalho para o desenvolvimento de GDUs com base nos resultados da RSL. Os indicadores e métodos de aquisição de dados aplicáveis com ferramentas computacionais, tanto *hardware* quanto *software*, citados pelos estudos na amostra revisada, foram organizados e sintetizados. O fluxo detalha os indicadores agrupados em suas respectivas categorias, destacando os critérios de relevância para a aplicação de GDUs. Devido à limitação de espaço, apresenta-se apenas o fluxograma relacionado à categoria 'Technical Nutrients Flows' na figura 4. (removido por ocasião da revisão por pares, 2024).

Figura 4 - Fluxo para o desenvolvimento de um GDU na categoria “Technical Nutrients Flows”.



Fonte: removido por ocasião da revisão por pares, 2024.

O fluxo demonstra que ao se tratar de indicadores relacionados a “Technical Nutrients Flows”, os GDs podem auxiliar em projetos de infraestrutura, transformar áreas urbanas através da ferramenta ‘Metaverse’, apoiar tomada de decisões autônomas com manutenção preditiva, melhorar a automação, apoiar decisões e definir padrões de consumo energético, podem desenvolver tecnologias de realidade estendida dinâmicas, gerenciar fluxos

de materiais, aprimorar privacidade e rastreamento de materiais, e integrar materiais terrestres e superfícies bio responsivas para o desenvolvimento sustentável (Çetim, 2024; Ullah, 2024; Kanak, 2022; Çetin, 2021; Jin, 2021; Schützenhofer, 2024; Dulaimi, 2022; Meng, 2023). A aquisição de dados é feita por meio de sensores IoT (*Internet of Things*), drones e LiDAR (*Light Detection and Ranging*), processados por ferramentas de CIM e BIM para modelagem geométrica. O enriquecimento semântico integra BIM com SIG e IoT, otimizando simulações. Tecnologias avançadas, como inteligência artificial e realidade virtual, permitem análises e previsões, apoiando a tomada de decisões com base nos dados fornecidos.

Esta análise dos indicadores, destacando a relevância do GDU e suas diferentes abordagens ao uso de ferramentas computacionais dentro da circularidade urbana, deve auxiliar na gestão e no planejamento urbano, permitindo a transição para uma EC.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo contribui para o avanço nas análises de correlação entre métodos computacionais avançados e indicadores de circularidade urbana, visando o desenvolvimento de GDUs mais eficientes e abrangentes. Igualmente, potencializa a capacidade de gestores e planejadores urbanos implementarem estratégias de EC de forma mais precisa e fundamentada. A integração desses indicadores em um esboço de GDU para circularidade sistematiza métodos aplicáveis de aquisição de dados e ferramentas computacionais, promovendo uma abordagem mais abrangente e sustentável. Entretanto, para que esse potencial seja plenamente aproveitado, há desafios a serem superados, como a interoperabilidade entre diferentes plataformas tecnológicas e a criação de padrões que garantam a integração eficaz dos dados. Para avançar na aplicação prática, recomenda-se a realização de estudos de aplicação que testem essas novas abordagens a cenários urbanos reais. Além disso, a criação de plataformas participativas e integradas que permitam a colaboração contínua entre governos, setor privado e cidadãos pode facilitar a implementação e otimização dos GDUs.

REFERÊNCIAS

- BENEDETTI, A. C.; COSTANTINO, C.; GULLI, R.; PREDARI, G. The process of digitalization of the urban environment for the development of sustainable and circular cities: a case study of Bologna, Italy. *Sustainability*, v. 14, n. 21, p. 13740, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142113740>.
- BOOTH, A.; SUTTON, A.; PAPAIOANNOU, D. *Systematic approaches to a successful literature review*. 2. ed. London: SAGE Publications, 2016.
- BOZEMAN, J. F.; CHOPRA, S. S.; JAMES, P.; MUHAMMAD, S.; CAI, H.; TONG, K.; CARRASQUILLO, M.; RICKENBACKER, H.; NOCK, D.; ASHTON, W.; HEIDRICH, O.; DERRIBLE, S.; BILEC, M. Three research priorities for just and sustainable urban systems: Now is the time to refocus. *Journal of Industrial Ecology*, v. 27, n. 2, p. 382–394, 2023. <https://doi.org/10.1111/jiec.13360>.
- ÇETIN, S.; DE WOLF, C.; BOCKEN, N. Circular digital built environment: an emerging framework. *Sustainability*, v. 13, n. 11, p. 6348, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13116348>.
- D'AMICO, G.; ARBOLINO, R.; SHI, L.; YIGITCANLAR, T.; IOPPOLO, G. Digitalisation driven urban metabolism circularity: a review and analysis of circular city initiatives. *Land Use Policy*, v. 112, p. 105819, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105819>.
- DE WOLF, C.; ÇETIN, S.; BOCKEN, N. M. P. (Eds.). *A circular built environment in the digital age*. Springer International Publishing, 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39675-5>.

DOODY, L. Value of Digital Twins: Cities. DIGITAL TWIN: TOWARDS A MEANINGFUL FRAMEWORK. Arup, 2019.

DULAIMI, A.; HAMIDA, R.; NASER, M.; MAWED, M. Digital twin solution implemented on energy hub to foster sustainable smart energy city, case study of sustainable smart energy hub. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. X-4/W3-2022, p. 41–48, 2022. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2022-41-2022.

GEJER, L.; SILVA, V. G. da. Revisão integrativa sobre economia circular em áreas urbanas. *PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção*, v. 15, p. e024007, 2024. DOI: 10.20396/parc.v15i00.8672770.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. BRIDGES, D. (Org.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, 2017. p. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

JIN, R.; PANUWATWANICH, K.; ADAMU, Z.; MADANAYAKE, U.; EBOHON, O. J. Developing a methodological framework for adopting digitalization for deconstruction planning. *Journal Name*, v. X, n. Y, p. 030001, 2021. DOI: 10.1063/5.0071722

KANAK, A.; ARIF, I.; TERZIBAS, C.; DEMIR, O. F.; ERGUN, S. BIMyVerse: Towards a Semantic Interpretation of Buildings in the City and Cities in the Universe. In: *2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2022. p. 1072–1077.

AUTOR1; AUTOR2 . Workflow for Urban Digital Twin development based on Systematic Literature Review Results. Zenodo, 2024. removido por ocasião da revisão por pares.

MARTINDALE, W.; LUCAS, K. Global resource flows in the food system. *Environment and climate-smart food production*. Springer International Publishing, 2022. p. 219–257. DOI: 10.1007/978-3-030-71571-7_7.

MENG, X.; DAS, S.; MENG, J. Integration of Digital Twin and Circular Economy in the Construction Industry. *Sustainability*, v. 15, n. 17, p. 13186, 2023.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; McDONALD, S.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n. 71, 2021. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

SCHÜTZENHOFER, S. et al. Digital ecosystem to enable circular buildings – The circular twin framework proposal. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, v. 12, n. 2, p. 1–20, 2024. DOI: 10.13044/j.sdewes.d12.0500.

SUKHDEV, A.; VOL, J.; BRANDT, K.; YEOMAN, R. Cities in the circular economy: The role of digital technologies.

THE ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition. 2015.

TURRADO DOMÍNGUEZ, E.; HERNÁNDEZ LÓPEZ, R.; FERNÁNDEZ LÓPEZ, M. A. Circular economy and urbanism: A sustainable approach to the growth of cities. In: *Circular Economy and Sustainability*. Amsterdam: Elsevier, 2022. p. 347–367. DOI: 10.1016/B978-0-12-819817-9.00022-3.

ULLAH, F.; OLATUNJI, O.; QAYYUM, S. A scoping review of green Internet of Things in construction and smart cities: current applications, adoption strategies and future directions. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2024.

UNITED NATIONS. The Sustainable Development Goals. New York, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 18 set. 2024

WEIL, C.; BIBRI, S. E.; LONGCHAMP, R.; GOLAY, F.; ALAHI, A. Urban digital twin challenges: A systematic review and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 99, p. 104862, 2023. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104862.