

MAPEANDO CONEXÕES ENTRE TECNOLOGIAS DIGITAIS E FLORESTAS URBANAS NA CONSTRUÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS: UMA REVISÃO DE ESCOPO

MAPPING CONNECTIONS BETWEEN DIGITAL TECHNOLOGIES AND URBAN FORESTS IN THE DEVELOPMENT OF SMART AND SUSTAINABLE CITIES: A SCOPING REVIEW

MAPEANDO CONEXIONES ENTRE TECNOLOGÍAS DIGITALES Y BOSQUES URBANOS EN EL DESARROLLO DE CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES: UNA REVISIÓN DE ALCANCE

Adriana Kunen¹
Gilson Ditzel Santos²

RESUMO

Diante da crescente urbanização e das pressões ambientais, as florestas urbanas emergem como aliadas estratégicas para cidades inteligentes e sustentáveis. No entanto, há uma lacuna na literatura quanto à integração de tecnologias digitais na gestão desses espaços. Este estudo mapeia as interações entre florestas urbanas e cidades inteligentes e sustentáveis, com ênfase no papel das tecnologias digitais emergentes. Por meio de uma Revisão de Escopo, foi construído um portfólio de artigos que explora a aplicação de soluções tecnológicas, como Internet das Coisas (IoT), Big Data e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), no monitoramento e gestão de florestas urbanas. A análise evidencia que essas inovações potencializam a sustentabilidade, a resiliência e o bem-estar das populações urbanas. Além disso, destaca-se a relevância da governança inteligente, do planejamento urbano estratégico e da participação cidadã para a efetiva integração dessas tecnologias. A revisão oferece subsídios para futuras pesquisas e políticas públicas voltadas à promoção de cidades mais sustentáveis e resilientes.

Palavras-chave: Cidades Inteligentes e Sustentáveis. Florestas Urbanas. Tecnologias de Informação e Comunicação. Revisão de Escopo.

ABSTRACT

In the face of increasing urbanization and environmental pressures, urban forests are emerging as strategic allies for smart and sustainable cities. However, there is a gap in the literature regarding the integration of digital technologies in the management of these spaces. This study

¹Doutoranda em Desenvolvimento Regional pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: adrianakunen@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3312-2461>.

²Doutor em Administração pela Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Ciências de Administração e Estudos de Políticas Públicas pela Universidade de Tsukuba, Japão. Professor Titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná nos Programas de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Engenharia de Produção e Sistemas. Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: ditzel@utfpr.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7839-2281>.

maps the interactions between urban forests and smart, sustainable cities, emphasizing the role of emerging digital technologies. Through a Scoping Review, a portfolio of articles was constructed to explore the application of technological solutions, such as the Internet of Things (IoT), Big Data, and Geographic Information Systems (GIS), in the monitoring and management of urban forests. The analysis highlights that these innovations enhance sustainability, resilience, and urban well-being. Furthermore, the importance of smart governance, strategic urban planning, and citizen participation in the effective integration of these technologies is emphasized. The review provides insights for future research and public policies aimed at promoting more sustainable and resilient cities.

Keywords: Smart and Sustainable Cities. Urban Forests. Information and Communication Technologies. Scoping Review.

RESUMEN

Frente a la creciente urbanización y las presiones ambientales, los bosques urbanos surgen como aliados estratégicos para las ciudades inteligentes y sostenibles. Sin embargo, existe un vacío en la literatura respecto a la integración de las tecnologías digitales en la gestión de estos espacios. Este estudio mapea las interacciones entre los bosques urbanos y las ciudades inteligentes y sostenibles, destacando el papel de las tecnologías digitales emergentes. A través de una Revisión de Alcance, se construyó un portafolio de artículos que explora la aplicación de soluciones tecnológicas, como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el monitoreo y la gestión de los bosques urbanos. El análisis evidencia que estas innovaciones fortalecen la sostenibilidad, la resiliencia y el bienestar de las poblaciones urbanas. Además, se destaca la relevancia de la gobernanza inteligente, la planificación urbana estratégica y la participación ciudadana para la integración efectiva de estas tecnologías. La revisión ofrece bases para futuras investigaciones y políticas públicas orientadas a promover ciudades más sostenibles y resilientes.

Palavras chave: Cidades Inteligentes y Sostenibles. Bosques Urbanos. Tecnologías de Información y Comunicación. Revisión de Alcance.

Como citar este artigo: KUNEN, Adriana; SANTOS, Gilson Ditzel. Mapeando conexões entre tecnologias digitais e florestas urbanas na construção de cidades inteligentes e sustentáveis: uma revisão de escopo. **DRd – Desenvolvimento Regional em debate**, v. 15, p. 610-635, 02 jul. 2025. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v15.5699>.

Artigo recebido em: 24/10/2024

Artigo aprovado em: 16/05/2025

Artigo publicado em: 02/07/2025

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o conceito de cidade inteligente e sustentável tem ganhado crescente destaque tanto na literatura científica quanto nas políticas internacionais. Para compreender este conceito é importante reconhecer porque as cidades são consideradas elementos-chave para o futuro (Albino; Berardi; Dangelico, 2015). As cidades desempenham papel primordial nos aspectos sociais, econômicos e ambientais, implicando diretamente na

sustentabilidade urbana (Jabareen, 2013). Além disso, as cidades desempenham funções significativas na gestão e renovação da infraestrutura, desenvolvimento econômico local, acesso a habitação, e, principalmente, na promoção de ações ambientais e desenvolvimento sustentável (Fünfgeld, 2015). Nesse processo, o setor público assume papel central, “utilizando-se de ferramentas de gestão para alcançar governança e inteligência na cidade” (Linhares *et al.*, 2020, p. 249).

O processo de urbanização está promovendo uma rápida transformação global em direção a um cenário predominantemente urbano (Organização das Nações Unidas-Habitat, 2022), enquanto a transformação tecnológica, com foco na digitalização, ocorre de maneira ainda mais acelerada. Há evidências de que a era do Antropoceno será digital, definida pela confluência da revolução tecnológica, das alterações climáticas e dos conflitos sociais, econômicos e políticos (Hamel, 2025).

Se, por um lado, a transformação digital acelera a automação e o acesso à informação, por outro, impõe o desafio de integrar essa evolução às demandas ambientais e sociais contemporâneas. Esta evolução tecnológica viabiliza novas formas de geração de informações detalhadas, espaciais e temporais, por meio de sensores e infraestruturas digitais, permitindo avanços significativos em automação, comunicação e governança em tempo real (Bibri, 2018). A tecnologia digital, proporciona meios inovadores para que os indivíduos compreendam e interajam com o ambiente urbano, utilizando soluções como a *Internet das Coisas (IoT)* e as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) (Hammi *et al.*, 2018; Tan; Taeihagh, 2020).

A *IoT* e as TIC's constituem a espinha dorsal das cidades inteligentes (Batty *et al.*, 2012), sendo cada vez mais empregadas para gerenciar, monitorar e avaliar o desempenho da infraestrutura urbana (Bibri; Krogstie, 2017). Dessa forma, autores como Kramers, Wangel e Höjer (2016) e Ismagilova *et al.* (2007), demonstram que a incorporação das TICs é um caminho promissor, mas que requer necessariamente o alinhamento às metas de sustentabilidade. A transição de cidades inteligentes em sustentáveis ocorre quando as TICs são empregadas para promover eficiência ecológica e inclusão social. Além disso, estabelecem uma integração total entre o ambiente urbano, o planejamento urbano e as infraestruturas de TIC (Mora *et al.*, 2021).

Estudos destacam que a dimensão ambiental é parte intrínseca na construção de cidades mais inteligentes e sustentáveis (Giffinger *et al.*, 2007; Höjer; Wangel, 2014; Bibri, 2018). À medida que as TIC's são incorporadas em vários aspectos da vida urbana, as cidades se tornam mais capacitadas para abordar de maneira mais inteligente os problemas relacionados ao meio ambiente (Batty *et al.*, 2012; Piro *et al.*, 2014; Bibri; Krogstie, 2017; Silva e Franz, 2020). Silva e Franz (2020) acrescentam que, para além do uso das tecnologias, é fundamental que as cidades integrem as pessoas e o meio ambiente como elementos centrais de seu desenvolvimento.

Neste contexto, as florestas urbanas surgem não apenas como componentes ecológicos, mas também como infraestruturas naturais que podem ser potencializadas pelas tecnologias digitais. As florestas urbanas, consideradas como toda vegetação da área urbana, incluindo árvores individuais, ao longo de ruas, jardins, parques, espaços verdes e infraestrutura relacionada (Konijnendijk *et al.*, 2006; Steenberg; Duinker; Nitoslawski, 2019; Love *et al.*, 2022) tem a capacidade de fornecer uma série de serviços ecossistêmicos (Wirtz *et al.*, 2021). Estes serviços, que contribuem diretamente para o bem-estar humano (Wallner *et al.*, 2018; Grilli; Mohan; Curtis, 2020) incluem, entre outros benefícios a regulação climática global,

prevenção contra inundações, manutenção da qualidade do solo, redução da poluição atmosférica, oferta de habitat e promoção de recreação ((De Jong et al., 2015; Dobbs; Nitschke; Kendal, 2017; Nyelele; Kroll; Nowak, 2019). Durante a pandemia COVID-19, as florestas urbanas tornaram-se mais relevantes como meio de proporcionar alívio para a saúde física e mental da população durante os períodos de confinamento (Azevedo et al., 2020; Pamukcu-Albers et al., 2021; Borgi et al., 2023).

Avaliar a estrutura e a diversidade das florestas urbanas é uma ferramenta valiosa para obter informações sobre sua função e a capacidade de se adaptar a desafios, ao mesmo tempo que contribui para embasar decisões relacionadas ao planejamento e gestão (Love et al., 2022). As estratégias para a gestão dessas florestas requerem planejamento, governança e implementação em nível local para atender às demandas e características específicas de cada contexto (Fünfgeld, 2015). O desafio reside em preservar as funções fundamentais que as florestas urbanas desempenham no equilíbrio ecossistêmico, na qualidade de vida e na reconexão do ser humano com a natureza (Andersson; Barthel, 2016). Entretanto, a gestão das florestas urbanas é muitas vezes atormentada por desafios específicos a esses contextos locais, como falta de recursos, informações insuficientes, alta demanda por espaço físico, adensamento, percepção indesejável das árvores, acesso desigual ao espaço verde público e ambientes urbanos alterados e frequentemente degradados, ciclos eleitorais e mudanças políticas (Steenberg; Robinson; Duinker, 2018). Superar esses desafios requer mais do que políticas convencionais; demanda o uso estratégico de tecnologias emergentes para promover uma gestão adaptativa e equitativa desses espaços.

Esses fatores destacam a importância de assegurar que os municípios disponham de recursos financeiros, tecnológicos e de governança apropriados para conduzi-los em direção a um futuro mais sustentável. Como reforçam Zaleski et al. (2024), a capacidade institucional e a articulação entre diferentes esferas de governo são fundamentais para viabilizar políticas públicas eficazes em nível local. A governança é um aspecto valioso as cidades inteligentes e sustentáveis, uma vez que se refere à relação entre indivíduos, grupos de interesse, instituições e prestadores de serviços da administração, com ações voltadas à comunidade, à rede e aos participantes (Albino; Berardi; Dangelico, 2015; Linhares et al., 2020). É imperativo reconhecer que as incertezas ambientais representam novos desafios para as cidades e comunidades, desafiando a maneira como têm pensado sobre sua gestão e planejamento (Jabareen, 2013).

Apesar da crescente atenção dada às cidades inteligentes e sustentáveis, a integração das florestas urbanas nesse contexto ainda é pouco explorada. Persistem lacunas sobre como tecnologias digitais emergentes podem apoiar a gestão desses espaços em diferentes realidades urbanas. Este estudo busca mapear e sistematizar as abordagens existentes, contribuindo para o avanço do conhecimento e para o fortalecimento de políticas públicas mais integradas.

Considerando que a conservação das florestas urbanas é de suma importância para a manutenção da sustentabilidade urbana, esta pesquisa teve como ponto de partida as seguintes perguntas norteadoras: (i) Qual é o âmbito da literatura acadêmica relacionada à interação entre florestas urbanas e cidades inteligentes e sustentáveis? e (ii) Quais tecnologias digitais têm sido aplicadas em florestas urbanas?

Nesse contexto, o objetivo desta revisão de escopo é mapear e sintetizar as pesquisas que relacionam as florestas urbanas com as cidades inteligentes e sustentáveis, resultando na

construção de um portfólio de artigos. A escolha por uma revisão de escopo, em vez de uma revisão sistemática tradicional, justifica-se pela necessidade de explorar a abrangência, identificar lacunas de pesquisa e levantar tendências emergentes e tecnologias aplicadas ao tema, características alinhadas à abordagem exploratória e ampliada que esse tipo de revisão proporciona. A seção de Materiais e Métodos descreve o protocolo adotado para coleta, triagem, revisão e análise de dados, baseado na metodologia estruturada do *Methodi Ordinatio*, incluindo a definição das palavras-chave e critérios de exclusão. A seção de Resultados apresenta a evolução temporal da literatura, a distribuição geográfica das pesquisas e as tecnologias digitais e inteligentes aplicadas em florestas urbanas.

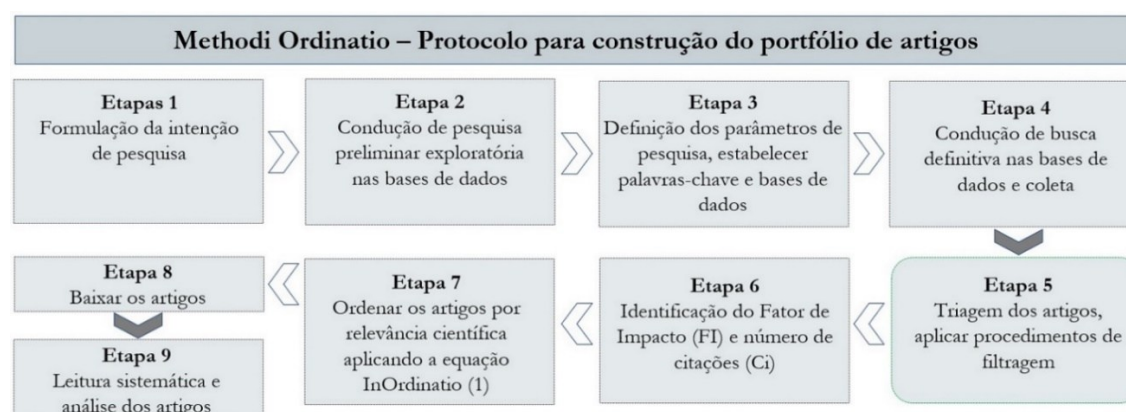
2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo adota uma abordagem de Revisão de Escopo, conforme diretrizes propostas por Arksey e O'Malley (2005) e atualizadas por Levac, Colquhoun e O'Brien (2010). A Revisão de Escopo visa mapear conceitos-chave, identificar lacunas e categorizar a literatura disponível sobre um determinado tema, sem a obrigatoriedade de avaliação crítica da qualidade metodológica dos estudos incluídos.

Para garantir a sistematização do processo de seleção e organização dos artigos, empregou-se o protocolo *Methodi Ordinatio*, conforme proposto por Pagani, Kovaleski e Resende (2015). A *Methodi Ordinatio* é fundamentada em uma técnica de apoio à decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Aid – MCDA*), permitindo ordenar artigos com base em três variáveis principais: (i) fator de impacto da revista; (ii) número de citações do artigo; e (iii) ano de publicação, o que assegura a atualidade dos estudos selecionados. A priorização dos artigos é realizada por meio da aplicação da Equação InOrdinatio, conforme descrito por Pagani, Kovaleski e Resende (2015).

A *Methodi Ordinatio* adota um protocolo estruturado em nove etapas para a construção do portfólio de artigos, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Etapas do protocolo para construção do portfólio de artigos



Fonte: Adaptado de Pagani; Kovaleski; Resende (2015).

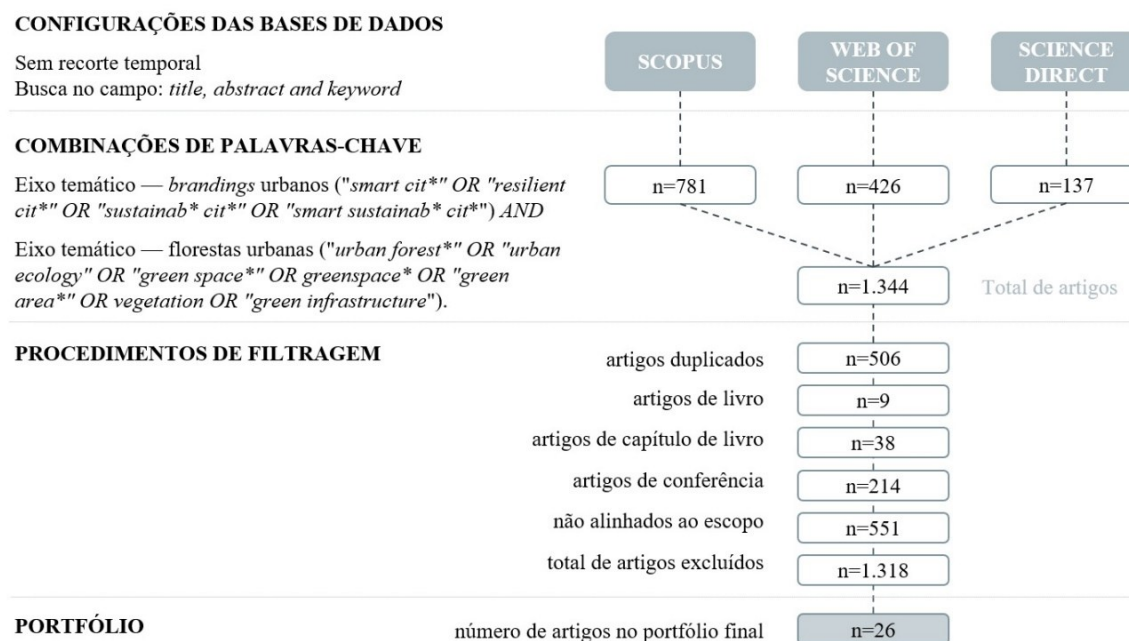
O processo metodológico iniciou-se com a definição da intenção de pesquisa, seguida da condução de uma busca preliminar em bases de dados para a identificação de palavras-chave pertinentes (Etapas 1 a 3). As palavras-chave foram selecionadas entre maio e junho de 2022 e

refinadas iterativamente após leituras exploratórias para garantir a abrangência dos temas relevantes.

A pesquisa definitiva (Etapa 4) foi realizada nas bases Scopus, Web of Science (WoS) e ScienceDirect, sem restrição temporal, abrangendo os campos de título, resumo e palavras-chave. A estratégia de busca combinou dois eixos temáticos — *brandings*³ urbanos e florestas urbanas — utilizando as seguintes combinações: ("smart cit*" OR "resilient cit*" OR "sustainab* cit*" OR "smart sustainab* cit*") AND ("urban forest*" OR "urban ecology" OR "green space*" OR greenspace* OR "green area*" OR vegetation OR "green infrastructure"). A aplicação de operadores booleanos e caracteres curinga (*) permitiu ampliar os resultados e contemplar variações de termos. Essa busca resultou em 1.344 artigos, distribuídos entre Scopus (781), WoS (426) e ScienceDirect (137).

Para a construção do portfólio (Etapa 5), utilizou-se o gerenciador de referências Mendeley⁴ para organização inicial e eliminação de duplicatas (506 artigos). Foram também excluídos artigos de livros (9), capítulos de livro (38) e artigos de conferência (214), pois esses não possuem fator de impacto relevante para os critérios da Methodi Ordinatio. Após a exclusão de artigos não alinhados ao escopo (551), restaram 26 artigos. Os resultados da busca final nas bases de dados e dos procedimentos de filtragem foram resumidos na Figura 2.

Figura 2 – Busca final nas bases de dados e procedimentos de filtragem



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

³ O branding urbano tem como objetivo escolher e comunicar uma variedade de atributos que conferem singularidade à cidade (Silva; Franz, 2020). Para implementar essa estratégia de forma eficaz, é fundamental compreender como desenvolver uma identidade e um posicionamento distintivos, sendo, portanto, essenciais dois conceitos fundamentais: a identidade e a imagem da cidade (Guerreiro, 2013).

⁴ <https://www.mendeley.com>

Na sequência (Etapa 6), com apoio do *software* JabRef⁵, os dados dos artigos foram transferidos para planilhas eletrônicas. Para cada artigo, coletaram-se: Fator de Impacto (obtido via *Journal Citation Reports - JCR*); número de citações (obtido no *Google Scholar*); e ano de publicação.

Na Etapa 7, os artigos foram ordenados de acordo com a relevância científica, utilizando a Equação InOrdinatio (1).

$$InOrdinatio = \left(\frac{IF}{1000} \right) + \alpha * [10 - (ResearchYear - PublishYear)] + (\Sigma Ci) \quad (1)$$

Em que:

IF, é o fator de impacto do periódico;

ResearchYear, é o ano de realização desta pesquisa;

PublishYear, é o ano de publicação do artigo;

ΣCi , é o número total de citações do artigo;

α , é o peso atribuído à atualidade do artigo, fixado em 10 neste estudo, considerando a relevância dos temas emergentes.

Com os cálculos finalizados, estabeleceu-se o portfólio final, disponível no Apêndice. Na Etapa 8, os textos completos dos artigos foram localizados e coletados. Por fim, a Etapa 9 consistiu na leitura sistemática dos artigos e análise dos dados extraídos, orientando a síntese dos principais achados da literatura.

A adoção da *Methodi Ordinatio* permitiu estruturar e priorizar de forma transparente o conjunto de estudos mapeados, respeitando os princípios de uma revisão de escopo: amplo levantamento do estado da arte sem avaliação da qualidade metodológica dos estudos incluídos, conforme recomendado por Munn et al. (2018). A seção subsequente abordará os resultados obtidos nesta etapa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a compilação do portfólio de artigos científicos, os procedimentos de coleta e análise de dados foram iniciados. A seção (3.1) ofereceu uma visão panorâmica das publicações, permitindo responder à questão (i). Na seção (3.2), procedeu-se à análise de conteúdo, identificando as tecnologias aplicadas em florestas urbanas, permitindo responder à questão (ii).

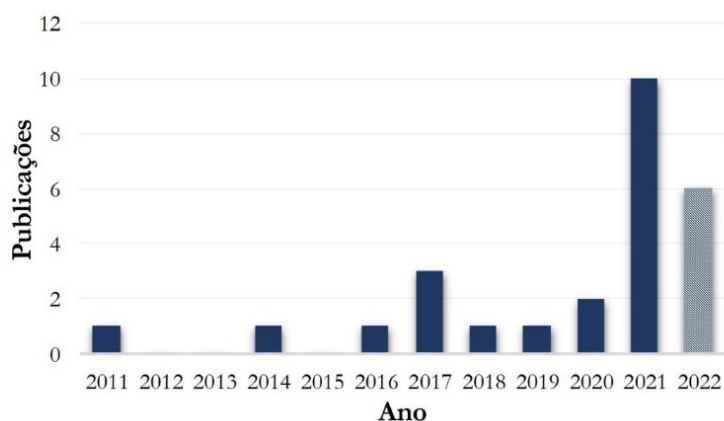
3.1 VISÃO GERAL DAS PUBLICAÇÕES

Nesta pesquisa, não foi estabelecido um recorte temporal específico, permitindo abranger todos os registros relacionados às florestas urbanas e cidades inteligentes e sustentáveis. Foram analisados 838 artigos após a remoção de duplicatas, a triagem compreendeu a leitura em títulos, resumos e palavras-chave, dos quais 26 foram selecionados

⁵ <https://www.jabref.org/>

para análise integral. Os resultados revelaram uma distribuição temporal variada, iniciando em 2011, com um aumento notável nas publicações recentes, especialmente em 2021 e 2022, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Número de publicações ao longo dos anos

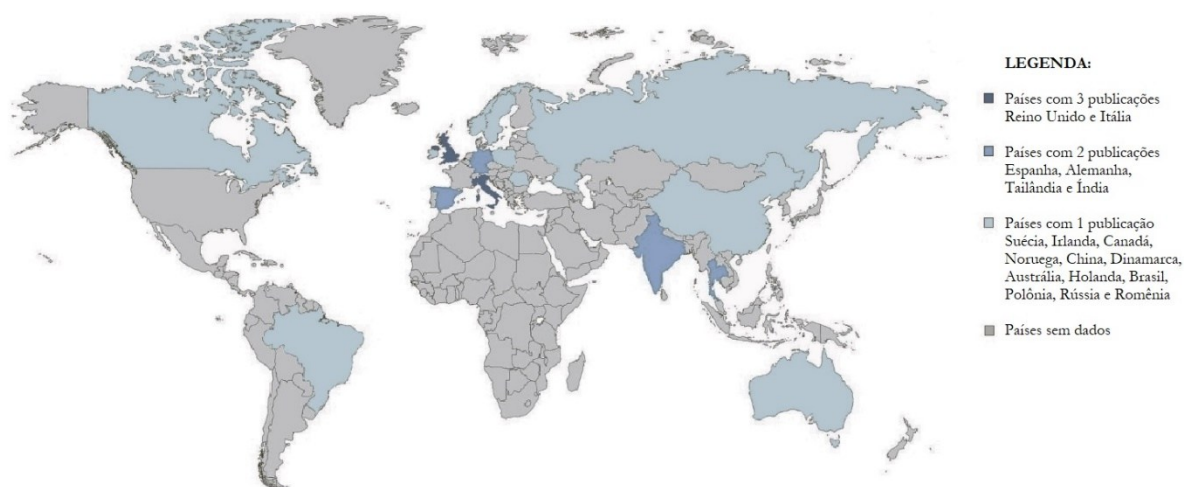


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Entre os artigos selecionados, sete consistiam em revisões de literatura, investigando e analisando diversos aspectos do desenvolvimento de cidades inteligentes e sustentáveis. Outros quatro artigos eram estudos de caso, adotando abordagens diversificada, que abrangiam desde tecnologia da informação e gestão urbana até metabolismo urbano, governança do ecossistema urbano e técnicas geoespaciais. Um conjunto de quinze artigos era composto por pesquisas originais, os quais exploraram uma ampla gama de perspectivas relacionadas à interação entre natureza, sustentabilidade, tecnologia e planejamento urbano. Essas pesquisas visaram examinar a integração de conceitos de cidades inteligentes, cidades verdes e sustentabilidade urbana.

Ao analisar as informações por país e afiliação dos autores, destacou-se a presença de colaborações internacionais em apenas dois artigos, por exemplo, o artigo de Mohammadian e Rezaie (2020), envolveu a colaboração entre Alemanha e Irã, enquanto o artigo de Chelleri et al. (2016) contou com a participação de autores da Itália, Cingapura, Colômbia, Arábia Saudita e África do Sul. Os demais trabalhos envolviam autores do mesmo país, embora com colaborações entre diferentes universidades e departamentos, proporcionando maior abrangência e inter-relação entre as áreas do conhecimento. A Figura 4 mostra a distribuição geográfica das pesquisas, com a Europa liderando em número de publicações, representando 67,30% do total, seguida da Ásia, com 21,15%, e da América, com 7,7%, sendo metade, ou seja 3,85% pela América do Norte e os outros 3,85% pela América do Sul, enquanto a Oceania contribuiu com os mesmo 3,85%.

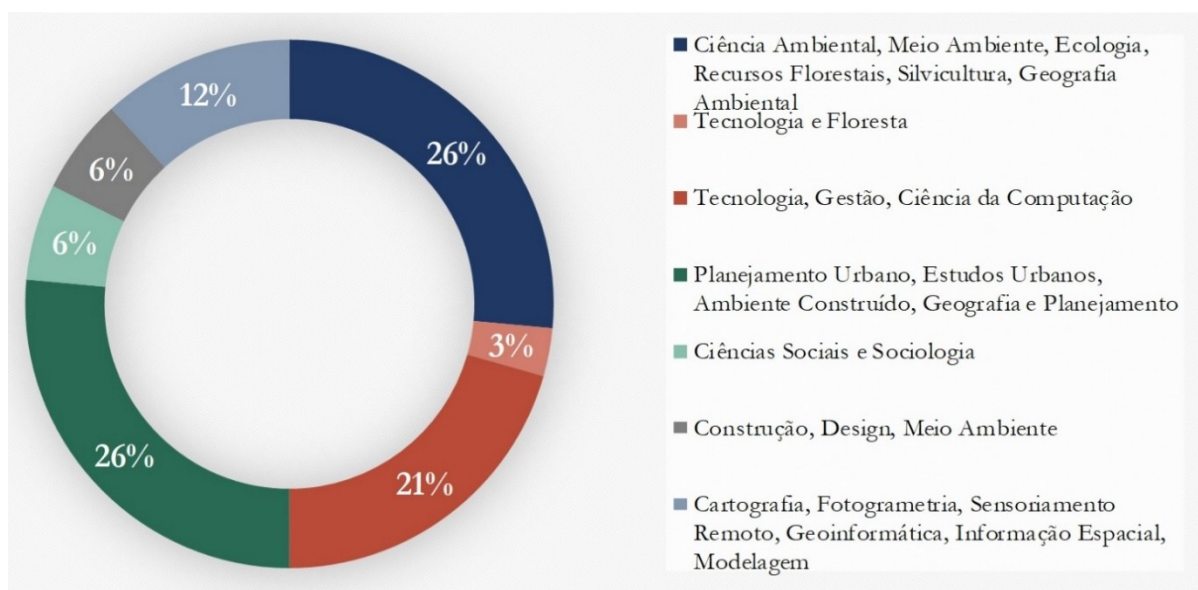
Figura 4 – Localização geográfica das pesquisas



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Nesta revisão, foram identificadas diversas áreas do conhecimento, as quais foram agrupadas tematicamente com base nos departamentos, centros de pesquisa e institutos dos autores (ver Figura 5).

Figura 5 – Áreas do conhecimento

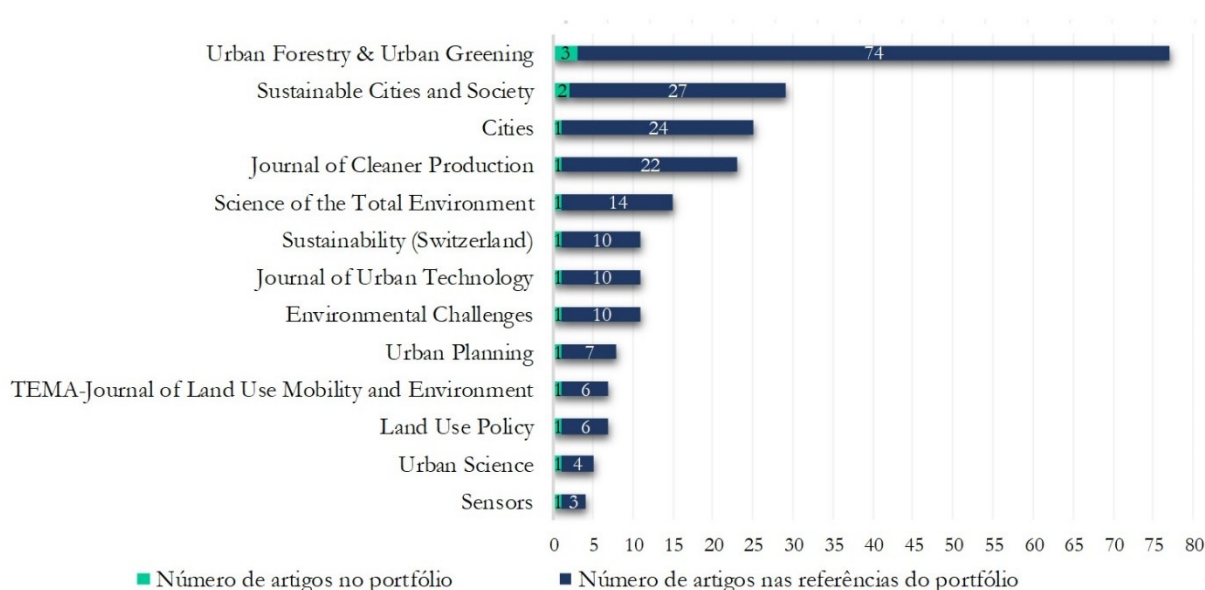


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Cada agrupamento representa diferentes universidades e instituições em vários países, proporcionando uma ampla abrangência temática para a revisão. As duas maiores áreas de concentração estão em Ciências Ambientais (26%) e Planejamento Urbano (26%), seguida pela Tecnologia com 21% e Cartografia (12%). Considerando a agrupamento da Cartografia como subárea da Tecnologia, teríamos um grupo representando 33% das pesquisas. A grande maioria das publicações sobre Cidades Inteligentes Sustentáveis enquadra-se em áreas temáticas de base tecnológica ou social.

Os periódicos mais relevantes para a pesquisa foram determinados considerando a soma de artigos presentes no portfólio e nas referências dos artigos do portfólio (ver Figura 6).

Figura 6 – Periódicos relevantes para a pesquisa

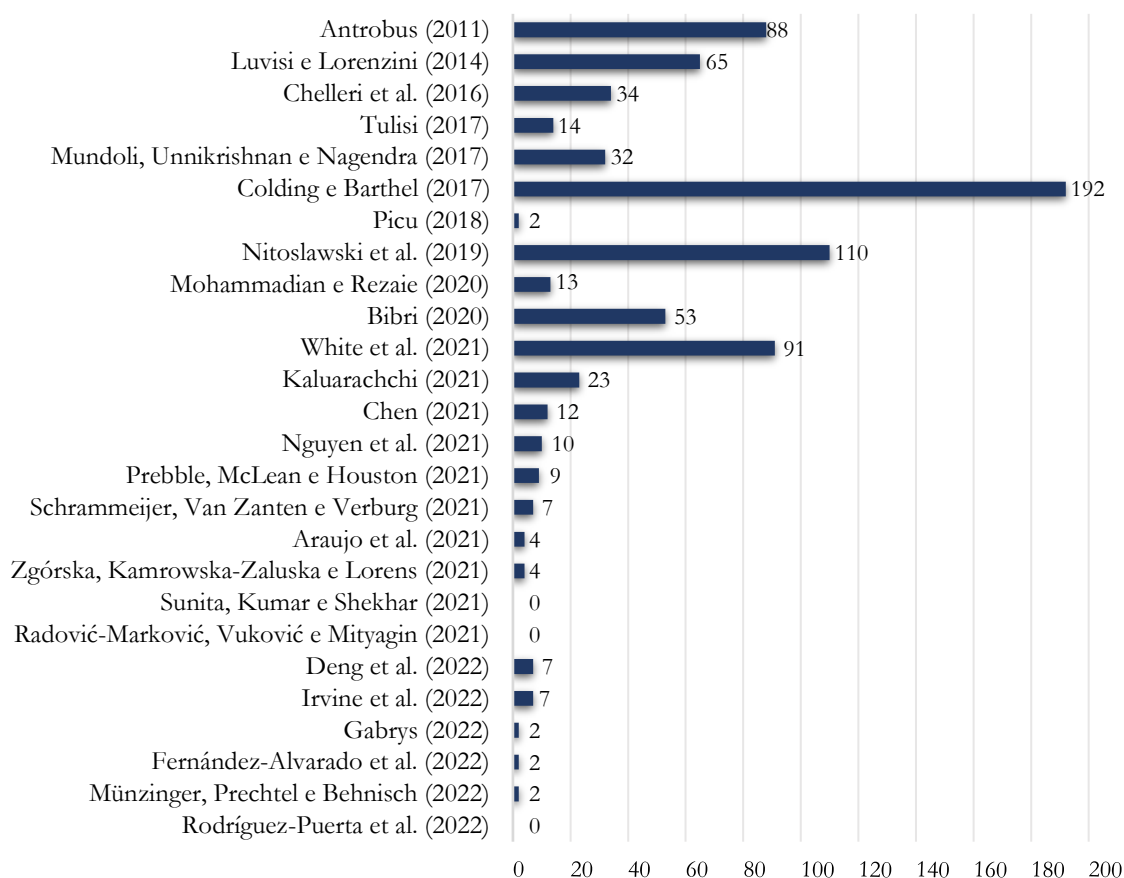


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Notavelmente, o periódico *Urban Forestry & Urban Greening* destacou-se como o mais relevante, contribuindo com três artigos no portfólio e 74 nas referências. Em seguida, figuram os periódicos *Sustainable Cities and Society* e *Cities*. Além da sua relevância para o escopo da pesquisa em questão, esses periódicos detêm grande prestígio na comunidade científica, evidenciado por seu fator de impacto de 4.537 para o *Urban Forestry & Urban Greening*, 7.587 para o *Sustainable Cities and Society* e 5.835 para o *Cities*. Importante mencionar que os três periódicos ostentam a classificação A1 na plataforma Sucupira da Capes.

Os artigos mais citados nesta revisão destacam-se pelo impacto significativo que tiveram na literatura (Figura 7). Em primeiro lugar, o artigo “*An urban ecology critique on the ‘Smart City’ model*” de Colding e Barthel (2017) do Centro de Resiliência de Estocolmo, Suécia, com 192 citações, levanta preocupações críticas e lacunas na literatura sobre cidades inteligentes, examinando-as pela perspectiva da ecologia urbana, com o objetivo de aprimorar a sustentabilidade urbana.

Figura 7 – Citações por artigo



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Em segundo lugar, o estudo “*Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry*”, de Nitoslowski et al. (2019) da University of British Columbia, Canadá, com 110 citações, explora a crescente relevância das cidades inteligentes e propõe investigar as tendências das tecnologias emergentes nas aplicações práticas para a gestão de florestas urbanas. O terceiro artigo mais citado, “*A digital twin smart city for citizen feedback*” de White et al. (2021) da Trinity College Dublin, Irlanda, com 91 citações, apresenta um modelo de gêmeo digital público e aberto da área de Docklands em Dublin, demonstrando como esse modelo pode ser utilizado no planejamento urbano de *skylines* e espaços verdes, incentivando a interação e retorno dos usuários sobre as mudanças planejadas.

A análise das citações revela que o ano de 2017 foi particularmente representativo, com três artigos totalizando 238 citações. Em contraste, o ano de 2021, com onze artigos publicados, acumula 213 citações.

Observa-se uma tendência crescente nas publicações nos último dois anos. Até 29 de junho de 2022 já haviam sido publicados 6 artigos, totalizando 20 citações. Para determinar se essa área de pesquisa representa uma tendência, serão necessárias mais investigações.

3.2 ANÁLISE DE CONTEÚDO

A análise de conteúdo buscou identificar de que maneira os temas urbanos se articulam com as tecnologias digitais, seus objetivos e aplicações práticas na gestão de florestas urbanas. A literatura revisada revelou uma ampla gama de temas, incluindo implicações políticas, planejamento urbano, gestão de espaços verdes e infraestrutura verde, reforçando a centralidade das tecnologias emergentes, como *big data* e *IoT*, na modelagem, monitoramento e manutenção desses espaços urbanos. Esses achados corroboram a perspectiva de Bibri (2018), que defende a utilização de soluções digitais para fomentar a resiliência e a sustentabilidade em cidades inteligentes.

A pandemia da Covid-19, como sugerido por Zgórska, Kamrowska-Zaluska e Lorens (2021), atuou como catalisadora de mudanças espaciais e acelerou a adoção de tecnologias inteligentes no ambiente urbano, evidenciando a necessidade de novos arranjos para a gestão das florestas urbanas. Nesse cenário, a integração de tecnologias digitais não apenas potencializa os serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas urbanas, mas também amplia as possibilidades de participação cidadã, elemento essencial para a efetividade das ações, conforme apontado por Nitoslowski et al. (2019).

As estratégias de gestão de infraestruturas inteligentes, visam programar e otimizar a vegetação como parte integrante de organismos urbanos eficientes, explorando também a incorporação de programas digitais-naturais nas cidades inteligentes (Gabrys, 2022). Este enfoque se alinha à visão de Colding e Barthel (2017), que ressaltam a importância de assegurar que a inovação tecnológica preserve a complexidade ecológica dos sistemas urbanos. Ambos os autores convergem ao destacar que o sucesso da inovação urbana depende da articulação equilibrada entre soluções digitais e os ecossistemas naturais que sustentam a vida urbana.

Do ponto de vista político, destaca-se uma mudança de paradigma, onde governos locais passam a ter papel decisivo na promoção de práticas urbanas sustentáveis, incentivando a inovação e a participação cidadã nos processos de decisão (Antrobus, 2011; Chelleri et al., 2016; Radović-Marković; Vuković; Mityagin, 2021). Essas evidências sugerem que a incorporação de tecnologias digitais para a gestão de florestas urbanas não apenas aprimora a eficiência dos serviços ambientais urbanos, como também fortalece a governança democrática e resiliente.

No âmbito do planejamento urbano, os estudos abrangem desde a análise de espaços inteligentes até urbanismo compacto, evidenciando os desafios enfrentados pelo setor da infraestrutura, a importância da conectividade física e digital e do engajamento do comunitário. A elaboração de mapas digitais é destacada como uma ferramenta essencial para orientar o planejamento urbano, subsidiando decisões relacionadas à conservação ambiental e ao uso sustentável da terra. Além disso, a análise política enfatiza a necessidade de investir em tecnologias de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para monitorar e avaliar o impacto ambiental das atividades humanas, como evidenciado por Nguyen et al. (2021), que revelou mudanças significativas no uso da terra em Phuket, Tailândia.

Ainda no campo do planejamento urbano, Chen (2021) conduz uma análise abrangente de várias cidades e regiões na China, destacando o impacto do ambiente ecológico e a importância do planejamento espacial, orientado pela Tecnologia da Informação (TI) e autômatos celulares. O planejamento urbano baseado em TI pode melhorar a qualidade de vida

e a sustentabilidade. O estudo de Mohammadian e Rezaie (2020) demonstram, por meio da "*Teoria i-Sustainability Plus*", como a TI aplicada ao planejamento urbano pode aprimorar a qualidade de vida e os indicadores de sustentabilidade em cidades dinamarquesas e sul-coreanas.

Bibri (2020), ao revisar práticas de urbanismo compacto, destaca o papel crítico do *big data* na formulação de estratégias de desenvolvimento urbano mais inteligentes e baseadas em evidências. Contudo, alerta para o fato de que o potencial das tecnologias de *big data* ainda permanece subaproveitado nas práticas de planejamento urbano sustentável. Essa constatação reforça a necessidade de um maior alinhamento entre inovação tecnológica, inteligência ambiental e inclusão social nos projetos de cidades inteligentes.

No contexto dos espaços verdes urbanos, as pesquisas identificam elementos-chave para o planejamento, como quantidade, acessibilidade, multifuncionalidade e conectividade. A eficiência de métodos de pesquisa literária e de campo é destacada para compreender os problemas na construção da paisagem urbana, utilizando TI para planejar e projetar paisagens urbanas digitais (Deng et al., 2022). Nesse sentido, a combinação entre dados tradicionais e informações obtidas por aplicativos e mídias sociais, como demonstrado por Schrammeijer, Van Zanten e Verburg (2021), amplia a capacidade de captar percepções e preferências dos cidadãos sobre o uso dos espaços verdes.

A necessidade de redefinir a sustentabilidade urbana, proposta por Mundoli, Unnikrishnan e Nagendra (2017), destaca a importância de reconhecer a diversidade de usos e valores associados aos espaços verdes integrando dimensões ecológicas e socioculturais na construção de cidades inteligentes mais inclusivas e resilientes. Complementamente, Tulisi (2017) contribui ao definir as redes verdes urbanas como estruturas estratégicas cuja eficácia pode ser maximizada pelo uso de tecnologias digitais, reforçando a interconexão funcional entre os elementos naturais e a infraestrutura urbana.

O impacto e as implicações das tecnologias nas cidades destacam a necessidade de uma análise aprofundada sobre sustentabilidade social, resiliência e segurança cibernética em contextos urbanos inteligentes, e mencionam que a digitalização das infraestruturas urbanas, por meio da integração de tecnologias digitais como *big data*, *IoT*, TIC e sensores, permite uma gestão urbana mais eficiente (Colding; Barthel, 2017). Esse conceito é expandido por Irvine et al. (2022), ao considerarem as tecnologias inteligentes como facilitadoras da sustentabilidade ambiental e da resiliência comunitária. De maneira convergente, Prebble, McLean e Houston (2021) destacam que a gestão de florestas urbanas com suporte digital deve integrar de forma equilibrada os elementos naturais e humanos, reforçando a necessidade de abordagens mais holísticas.

A aplicação de tecnologias Geoespaciais destaca-se como estratégia central para a avaliação do desenvolvimento urbano sustentável, evidenciando a relevância do mapeamento de espaços verdes e a interconexão entre inovação tecnológica e promoção de ambientes urbanos resilientes (Sunita; Kumar; Shekhar, 2021). Tecnologias como RFID (*Radio Frequency Identification* – Identificação por Radiofrequência) oferecem possibilidades avançadas de monitoramento e rastreamento de vegetação urbana, possibilitando o acompanhamento individualizado de plantas por meio de etiquetas eletrônicas (Luvisi; Lorenzini, 2014). A combinação de dados de varredura a *laser* e imagens digitais, como

desmostrado por Rodriguez-Puerta et al. (2022), tem se mostrado eficaz no mapeamento detalhado da copa das árvores em ambientes urbanos.

Ferramentas de modelagem tridimensional (3D) surgem como instrumentos interativos capazes de envolver os cidadãos no processo decisório urbano (White et al., 2021). Modelos 3D precisos de árvores urbanas, obtidos por LiDAR (*Light Detection And Ranging*) traduzido como Detecção e Alcance de Luz, um sensor remoto ativo usado em plataformas tripuladas ou não tripuladas – utiliza laser para escanear e mapear, realizando uma varredura das áreas de interesse – demonstram a capacidade de integração entre monitoramento ambiental e planejamento urbano sustentável (Münzinger, Prechtel e Behnisch, 2022; Picu, 2018). Outros modelos como o 3D BIM (*Building Information Modeling* – Modelagem da Informação da Construção) vêm sendo explorado para avaliar dimensões de sustentabilidade ambiental no contexto urbano (Fernandez-Alvarado et al., 2022).

A análise de conteúdo revela que as tecnologias mais citadas nos estudos variam em aplicações e nível de frequência, entre elas estão as Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), mencionadas em nove artigos, a *Internet das Coisas (IoT)* em oito artigos, *Big Data*, LiDAR e GIS em sete artigos cada uma, Aprendizado de Máquina e Sensores em seis artigos, Sensoriamento Remoto em cinco, Inteligência Artificial em quatro. Outras tecnologias como RPAS, BIM, Aprendizado Profundo, Redes Neurais Artificiais, Robótica, APPs, Tecnologias Digitais, Tecnologias Verdes e Gêmeos Digitais, são mencionadas com menos frequência, mas refletem tendências importantes para o futuro da gestão urbana.

Essas tecnologias demonstram convergência em torno da meta de promover ambientes urbanos mais inteligentes, resilientes e sustentáveis. As TICs, conforme discutido por vários autores, são empregadas para melhorar a comunicação, a conectividade e a eficiência dos serviços urbanos, fortalecendo a capacidade das cidades de responder de forma mais eficaz aos desafios socioambientais (Luvisi; Lorenzini, 2014; Colding; Barthel, 2017; Mundoli; Unnikrishnan; Nagendra, 2017; Nitoslowski et al., 2019; Bibri, 2020; Mohammadian; Rezaie, 2020; Kaluarachchi, 2021; Zgórska; Kamrowska-Zaluska; Lorens, 2021; Irvine et al., 2022). A *IoT*, por sua vez, conecta dispositivos e sensores para coleta e compartilhamento de dados em tempo real, otimizando recursos e serviços urbanos (Luvisi; Lorenzini, 2014; Colding; Barthel, 2017; Nitoslowski et al., 2019; Mohammadian; Rezaie, 2020; White et al., 2021; Kaluarachchi, 2021; Zgórska; Kamrowska-Zaluska; Lorens, 2021), e integra a infraestrutura natural e digital, permitindo a criação de ambientes urbanos mais sustentáveis (Gabrys, 2022).

O *Big Data* é utilizado para coletar, analisar e interpretar grandes volumes de dados urbanos, identificando padrões, tendências e percepção que auxiliam nas decisões de planejamento urbano e no desenvolvimento sustentável (Colding; Barthel, 2017; Nitoslowski et al., 2019; Bibri, 2020; Kaluarachchi, 2021; Schrammeijer; Van Zanten; Verburg, 2021; Zgórska; Kamrowska-Zaluska; Lorens, 2021; White et al., 2021). A coleta e análise de *big data* integrada à gestão de florestas urbanas potencializa a formulação de políticas públicas mais dinâmicas, baseadas em evidências ambientais, reforçando o conceito de cidades inteligentes.

Há forte ênfase em inovações baseadas em geotecnologias, voltadas para o monitoramento, planejamento e gestão de recursos florestais. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) ou GIS, na sigla em inglês, emerge como uma plataforma robusta para manipular dados espaciais, permitindo a criação, coleta, processamento, armazenamento e análise de informações espaciais. O SIG permite modelar respostas ambientais complexas,

como apresentado em vários estudos (Luvisi; Lorenzini, 2014; Picu, 2018; Kaluarachchi, 2021; Nguyen et al., 2021; Prebble; McLean; Houston, 2021; Sunita; Kumar; Shekhar, 2021; Münzinger; Prechtel; Behnisch, 2022), oferecendo suporte técnico imprescindível para políticas de uso do solo e conservação urbana. Esses achados corroboram a importância atribuída por Bibri (2018) às tecnologias espaciais como vetores de integração entre planejamento digital e sustentabilidade.

Complementarmente, o sensoriamento remoto, também conhecido como detecção remota (Araujo et al., 2021; Gabrys, 2022), tem a capacidade de adquirir dados da superfície terrestre, incluindo características geográficas, vegetação, uso do solo, entre outros elementos, por meio de sensores instalados em aeronaves ou satélites. Tais dispositivos capturam informações visuais e espectrais que, uma vez processados, proporcionam um panorama detalhado do ambiente urbano, incluindo detecção de vegetação, mapeamento de áreas inundadas, avaliação de riscos naturais, dentre outras aplicações (Luvisi; Lorenzini, 2014; Sunita; Kumar; Shekhar, 2021; Nguyen et al., 2021; Araujo et al., 2021; Deng et al., 2022; Rodríguez-Puerta et al., 2022; Gabrys, 2022).

Outra aplicação significativa no campo das geotecnologias envolve o uso de Sensores que captam dados sobre temperatura, umidade, qualidade do ar, entre outros parâmetros, permitindo a análise e o monitoramento contínuo dessas variáveis (Luvisi; Lorenzini, 2014; Colding; Barthel, 2017; White et al., 2021; Gabrys, 2022). Esses Sensores, muitas vezes integrados em redes sem fio, permitem monitorar e regular parâmetros ambientais em tempo real (Kaluarachchi, 2021), otimizando as condições para o crescimento das árvores e a saúde do ecossistema urbano (Nitoslawski et al., 2019).

As técnicas de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), têm se consolidado como ferramentas estratégicas na coleta, processamento e análise de grandes volumes de dados. Essas técnicas foram amplamente empregadas no tratamento de imagens de sensoriamento remoto e vêm ganhando destaque nas pesquisas voltadas aos ecossistemas florestais. Conforme apontam Zgórska, Kamrowska-Zaluska e Lorens (2021) e White et al. (2021), o avanço das capacidades computacionais, aliado ao refinamento dos métodos estatísticos, tem ampliado significativamente a aplicação de *Machine Learning* em contextos urbanos, possibilitando análises com alta resolução espacial e temporal.

A aplicação de algoritmos de Aprendizado de Máquina permite extrair padrões ocultos em conjuntos complexos de dados, contribuindo para a tomada de decisões embasadas em evidências. Por exemplo, o uso de modelos preditivos tem viabilizado a antecipação de riscos ecológicos, como a perda de cobertura vegetal ou alterações na qualidade do ar, oferecendo subsídios práticos para políticas públicas mais responsivas (Nguyen et al., 2021; Rodríguez-Puerta et al., 2022). Ademais, ao identificar padrões e processar grandes volumes de dados, o Aprendizado de Máquina ajuda na previsão de problemas e na otimização da gestão florestal (Nitoslawski et al., 2019; Araujo et al., 2021).

O Aprendizado Profundo (*Deep Learning*), vertente avançada do *Machine Learning* baseada em redes neurais multicamadas, apresenta um potencial ainda mais sofisticado para representar e interpretar grandes volumes de dados multimodais. Araujo et al. (2021) e Rodríguez-Puerta et al. (2022) destacam sua capacidade de capturar estruturas complexas e não lineares, o que torna essa tecnologia especialmente útil em cenários urbanos densos e heterogêneos. Algoritmos inspirados na aprendizagem adaptativa do cérebro humano têm sido

empregados para estimular com alta acurácia a cobertura das copas das árvores em grandes centros urbanos, permitindo, por exemplo, identificar zonas de vulnerabilidade climática ou déficit de áreas verdes (Nitoslawski et al., 2019).

O uso crescente dos Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS, sigla em inglês para *Remotely Piloted Aircraft System*) termo padronizado internacionalmente pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e também conhecido como Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) ou UAV (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicle*), popularmente denominados drones, vêm sendo cada vez mais integrados a plataformas de sensoriamento remoto, oferecendo vantagens operacionais significativas, como custo reduzido, flexibilidade de voo e alta resolução de imagem. Sua capacidade de realizar voos em baixa altitude, aliada à coleta de dados em tempo real, torna-os ideais para aplicações como levantamento topográfico, avaliação da regeneração florestal, pulverização de insumos e semeadura aérea de precisão (Luvisi e Lorenzini, 2014; Nitoslawski et al., 2019). Além disso, sua integração com *softwares* analíticos permite a modelagem de comportamentos ambientais e o planejamento de cenários futuros urbanos (Kaluarachchi, 2021).

A aplicação de sensores ativos como o LiDAR em conjunto com RPAS representa uma das abordagens mais promissoras para a geração de modelos tridimensionais de alta precisão. Essa tecnologia, identificada em sete estudos analisados, utiliza feixes de laser para mapear a vegetação e a topografia com elevada acurácia, contribuindo significativamente para a construção de modelos digitais de terreno e estruturas florestais (Picu, 2018; Araujo et al., 2021). O LiDAR viabiliza análises detalhadas da morfologia arbórea, como altura, volume e distribuição das copas, elementos críticos para o planejamento e a manutenção das florestas urbanas. Estudos como os de Nitoslawski et al. (2019) e Rodríguez-Puerta et al. (2022) apontam que essas informações podem subsidiar a tomada de decisões em políticas de conservação, mapeamento de riscos ambientais e gestão da arborização urbana.

Adicionalmente, o georreferenciamento de modelos 3D realistas e paramétricos com uso do LiDAR oferece coordenadas espaciais altamente precisas, o que aprimora a análise territorial em projetos urbanos (Prebble, McLean e Houston, 2021; Münzinger, Prechtel e Behnisch, 2022; Fernández-Alvarado et al., 2022). Quando associado a algoritmos de Aprendizado de Máquina, o LiDAR permite a criação de inventários florestais de alta resolução que respondem às exigências contemporâneas por informação rápida, detalhada e territorialmente contextualizada. No entanto, como reconhecido por Nitoslawski et al. (2019), ainda persistem desafios importantes para sua aplicação em larga escala no contexto urbano, especialmente devido aos altos custos de aquisição e processamento de dados.

De forma convergente, o uso de modelos 3D obtidos por RPAS, com suporte de sensores LiDAR, tem sido apontado como uma das estratégias mais escaláveis e eficientes para o monitoramento da restauração florestal em ambientes urbanos. Ao unir acurácia técnica com versatilidade operacional, essas tecnologias oferecem não apenas um panorama detalhado da estrutura ecológica, mas também uma base sólida para a formulação de políticas públicas orientadas à sustentabilidade e à resiliência urbana.

A tecnologia BIM permite a criação de modelos virtuais 3D que agregam informações detalhadas de edifícios, infraestruturas e outros elementos urbanos. Esses modelos BIM podem ser integrados a Gêmeos Digitais para simular cenários urbanos complexo, testar propostas de planejamento e analisar os impactos de alterações físicas no ambiente urbano (White et al.,

2021). Esse processo tem se mostrado eficaz na redução de erros e custos, além de otimizar a sustentabilidade e a eficiência dos projetos urbanos (Fernández-Alvarado et al., 2022). O uso combinado de BIM com tecnologias como *IoT*, *Big Data* e Aprendizado de Máquina enriquece ainda mais os modelos digitais urbanos, permitindo decisões mais informadas e adaptativas, com base em dados e simulações em tempo real.

Além disso, soluções que combinam elementos de infraestrutura verde e tecnologia inteligente, têm sido adotadas como estratégias para mitigar impactos de eventos climáticos extremos, refletindo uma mudança de paradigma no planejamento urbano resiliente (Kaluarachchi, 2021). Essa integração técnico-natural reforça o potencial das cidades inteligentes para responder não apenas com eficiência, mas também com sensibilidade ecológica.

No campo da Inteligência Artificial (IA), os avanços são igualmente expressivos. A IA envolve a capacidade dos sistemas computacionais de interpretar dados, aprender com padrões complexos e adaptar suas respostas com base em informações em constante atualização (Araujo et al., 2021). Em ambientes urbanos, tem sido aplicada em soluções automatizadas voltadas à mobilidade, segurança e serviços públicos (Zgórska, Kamrowska-Zaluska e Lorens, 2021; White et al., 2021), bem como na simulação de eventos críticos, como incêndios florestais, contribuindo para o planejamento de respostas preventivas (Nitoslawski et al., 2019).

Essa aplicação crescente de IA, entretanto, traz à tona a preocupação expressa por Colding e Barthel (2017) sobre a necessidade de equilibrar inovação tecnológica com a complexidade dos sistemas ecológicos urbanos. O risco de uma tecnocracia desconectada das dinâmicas naturais reforça a importância de abordagens integradas que articulem inteligência computacional e resiliência ecológica.

As Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks*), que corresponde a uma vertente da IA, são utilizadas para analisar e interpretar dados, identificar padrões complexos e realizar previsões que podem auxiliar na tomada de decisões e na otimização de sistemas urbanos. Tais redes têm sido empregadas na modelagem e previsão da mortalidade de árvores urbanas (Nitoslawski et al., 2019; Araujo et al., 2021).

Dois estudos se concentraram no uso de tecnologias avançadas para desenvolver Gêmeos Digitais (*Digital Twins*). Os Gêmeos Digitais são réplicas digitais precisas de entidades físicas que permitem simulações e análises detalhadas. Essas tecnologias integram recursos como *IoT*, Aprendizado de Máquina, IA e análise de dados para criar modelos de simulação digital sofisticados (White et al., 2021; Münzinger; Prechtel; Behnisch, 2022). Essa abordagem coloca os Gêmeos Digitais no centro de uma nova geração de políticas públicas baseadas em evidências, com potencial para transformar profundamente a gestão territorial e ambiental das cidades.

As chamadas tecnologias verdes têm como objetivo central minimizar os impactos ambientais e fomentar práticas urbanas mais sustentáveis. Elas englobam desde fontes de energia renovável e soluções para construção sustentável até sistemas de gestão hídrica e de resíduos, sempre com foco na redução do consumo de recursos naturais e na mitigação da emissão de poluentes (Antrobus, 2011; Kaluarachchi, 2021; Radović-Marković; Vuković; Mityagin, 2021). Por outro lado, as tecnologias digitais referem-se a um conjunto de ferramentas baseadas em computação, comunicação em rede e dispositivos inteligentes que

possibilitam a coleta, o processamento e a análise de grandes volumes de dados urbanos (Chelleri et al., 2016; Kaluarachchi, 2021; Radović-Marković; Vuković; Mityagin, 2021). Essa categoria abrange sistemas de informação, redes de comunicação, sensores e aplicativos móveis, sendo essencial para a operacionalização e o monitoramento de soluções sustentáveis em tempo real.

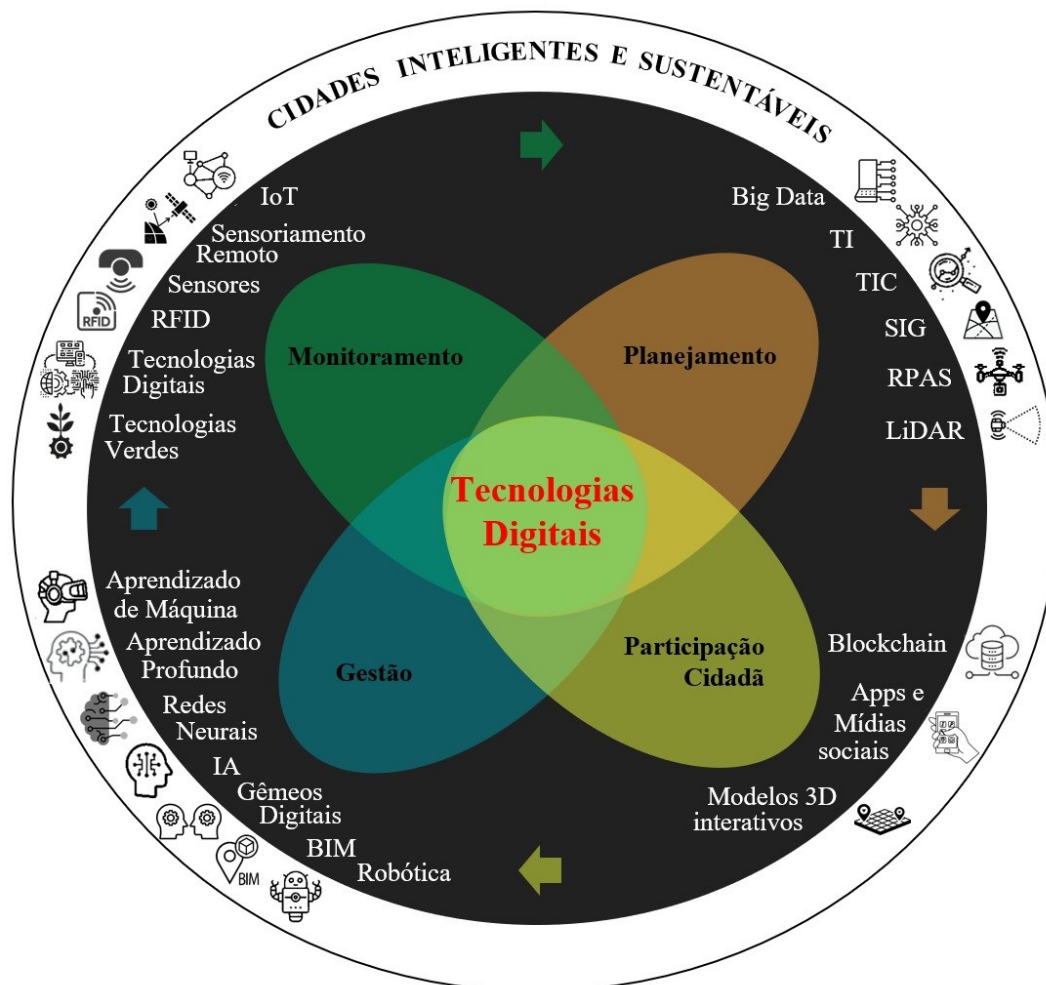
No campo da robótica, automação e cibernética, observa-se uma crescente aplicação voltada ao monitoramento, manutenção e intervenção nas florestas urbanas. Robôs inteligentes têm sido utilizados para coletar dados e simular áreas urbanas, auxiliando na modelagem do comportamento desses ambientes e no planejamento de eventos futuros (Nitoslawski et al., 2019; Kaluarachchi, 2021). Além da captura de imagens em 360 graus de praças e parques, a robótica também vem sendo empregada em atividades como plantio, poda e gerenciamento de árvores com maior precisão e menor custo operacional (Gabrys, 2022). Isso representa um salto significativo na automação de tarefas urbanas ecológicas, ao mesmo tempo em que reforça o papel das tecnologias emergentes na ampliação da capacidade institucional dos municípios.

No que diz respeito à participação cidadã, ferramentas digitais como Aplicativos (APPs) móveis têm se mostrado instrumentos eficazes para capturar percepções, preferências e contribuições dos cidadãos sobre o ambiente urbano em tempo real. Apps específicos desenvolvidos para *smartphones* e *tablets* permitem o registro de opiniões e observações diretamente do local, tornando possível a coleta de dados geolocalizados com alta densidade social (Schrammeijer, Van Zanten e Verburg, 2021). Além disso, diversas prefeituras vêm investindo no desenvolvimento de seus próprios APPs interativos para facilitar a comunicação com os cidadãos e incentivar uma governança mais participativa (Kaluarachchi, 2021). A presença das agências municipais nas redes sociais e em plataformas digitais também tem potencializado o uso de conteúdo gerado pelos usuários, transformando essas mídias em fontes alternativas de dados para pesquisas urbanas (Nitoslawski et al., 2019).

A Figura 8 apresenta uma síntese visual das tecnologias digitais mais recorrentes na literatura e seus principais eixos de aplicação no contexto das florestas urbanas em cidades inteligentes e sustentáveis. A estrutura em diagrama de Venn⁶ foi adotada para representar a interseção entre quatro grandes eixos: Planejamento, Participação Cidadã, Gestão de Florestas Urbanas e Monitoramento.

⁶ Os diagramas de Venn representam classes usando elementos sobrepostos e expressam relações lógicas entre essas classes sombreando regiões. VENN, John. On the diagrammatic and mechanical representation of propositions and reasoning. *Philosophical Magazine*, v. 9, n. 59, p. 1-18, 1880. Disponível em: <https://philarchive.org/rec/VENOTD>.

Figura 8 – Principais tecnologias mencionadas nos artigos



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Cada um dos quatro campos coloridos indica um eixo funcional, ao redor dos quais estão posicionadas as tecnologias mais comumente associadas a esses propósitos. Por exemplo, tecnologias como *Big Data*, SIG, RPAS e LiDAR foram colocadas próximas ao eixo de Planejamento; enquanto *IoT*, Sensoriamento Remoto e RFID aparecem vinculadas ao Monitoramento; BIM, Gêmeos Digitais e IA aparecem associadas à Gestão; e Apps, Blockchain e Modelos 3D interativos no campo da Participação Cidadã.

No entanto, é importante destacar que a organização espacial dessas tecnologias no diagrama não deve ser interpretada de forma restritiva. As tecnologias representadas não são exclusivas de um único eixo de atuação. Pelo contrário, muitas delas possuem caráter transversal, sendo aplicáveis em mais de um domínio funcional. Por exemplo, LiDAR, embora comumente utilizado no planejamento, também desempenha papel estratégico no monitoramento e na modelagem de dados para gestão; *IoT* pode ser empregada tanto na coleta de dados ambientais quanto no engajamento participativo; BIM e IA podem articular processos entre planejamento e gestão, e assim por diante.

Para evidenciar essa dinâmica cíclica e transversal, foram inseridas setas coloridas no entorno da figura, indicando que as tecnologias estão em fluxo constante entre os eixos, promovendo interconectividade e sinergia entre as diferentes funções urbanas. Essa

representação gráfica reforça a compreensão de que o uso de tecnologias digitais no contexto das florestas urbanas inteligentes não é linear nem compartimentalizado, mas sistemicamente integrado, permitindo abordagens multifuncionais e adaptativas na promoção de cidades mais sustentáveis, resilientes e centradas na natureza.

Esses estudos elucidam a diversidade de abordagens e tecnologias empregadas no monitoramento e modelagem de aspectos urbanos, destacando a importância dessas ferramentas para o planejamento e gestão sustentáveis das cidades. A síntese gráfica apresentada pode servir como instrumento interpretativo para que pesquisadores e profissionais identifiquem, com mais clareza, as ferramentas mais relevantes às suas necessidades, escala de atuação e contextos locais. Essas tecnologias visam promover a inovação, a sustentabilidade e a qualidade de vida nas cidades, transformando a forma como os espaços urbanos são planejados, gerenciados e vivenciados.

Além disso, os estudos abordam temas diversos, como a importância dos recursos comuns urbanos, os efeitos da pandemia nas estruturas urbanas e como abordagens centradas nas pessoas podem ser aplicados na infraestrutura física e nos fluxos de recursos. A interdisciplinaridade desses temas destaca a complexidade e a necessidade de abordagens integradas para o desenvolvimento sustentável das cidades.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo, por meio de uma revisão de escopo, reuniu e analisou um conjunto significativo de artigos que exploram o papel das tecnologias digitais na interseção entre florestas urbanas e cidades inteligentes e sustentáveis. A análise revelou tendências emergentes, abordagens metodológicas diversas e aplicações práticas centradas no planejamento, participação cidadã, gestão e monitoramento no contexto urbano, oferecendo subsídios relevantes para pesquisadores, formuladores de políticas e planejadores urbanos.

Contudo, a literatura analisada também evidenciou lacunas importantes que merecem maior atenção em futuras investigações. Entre elas, destaca-se a ausência de estudos comparativos entre diferentes realidades socioespaciais, a carência de abordagens longitudinais orientadas para avaliar o impacto das tecnologias aplicadas ao verde urbano ao longo do tempo, e a escassez de investigações empíricas que articulem efetivamente os aspectos técnicos com os sociais e ecológicos. Além disso, há pouca sistematização crítica sobre os riscos associados à dependência tecnológica em ambientes urbanos ecologicamente sensíveis.

As implicações práticas extraídas dos estudos analisados apontam que a adoção de tecnologias digitais pode não apenas otimizar a gestão de florestas urbanas, mas também transformar a forma como as cidades planejam e vivenciam seus espaços verdes. Isso requer, no entanto, capacitação institucional, envolvimento cidadão e governança intersetorial para que os dados gerados se convertam efetivamente em políticas públicas sustentáveis e inclusivas. O reconhecimento das florestas urbanas como bens comuns reforça a necessidade de integrá-las a uma agenda urbana que articule inovação, equidade e conservação ambiental.

Com base nesses achados, recomenda-se que futuras pesquisas:

- (i) Explore(m) contextos urbanos ainda pouco representados na literatura, especialmente no Sul Global;
- (ii) Investigue(m) a efetividade de tecnologias emergentes (como Gêmeos Digitais, BIM e IA) em escala de bairro ou microrregião;
- (iii) Analise(m) os impactos sociais da digitalização da gestão ambiental, com foco em desigualdades de acesso, participação e justiça territorial.

Do ponto de vista das políticas públicas, recomenda-se o desenvolvimento de plataformas integradas de governança digital, que incorporem a coleta participativa de dados e critérios de justiça socioambiental no planejamento das florestas urbanas.

Por fim, reforça-se que a criação de cidades verdadeiramente inteligentes e sustentáveis exige não apenas infraestrutura tecnológica, mas também uma visão integrada da paisagem urbana como um sistema socioecológico complexo. À medida que a pesquisa avança, será essencial direcionar esforços para antecipar e lidar com as incertezas que acompanham a evolução tecnológica, buscando abordagens que fortaleçam a resiliência urbana sem comprometer a equidade ou a integridade ecológica. Ao contribuir com a identificação de tecnologias-chave, lacunas teóricas e caminhos possíveis, esta revisão oferece um panorama valioso para o avanço das agendas acadêmicas e institucionais voltadas à construção de futuros urbanos mais resilientes, justos e baseados na natureza.

REFERÊNCIAS

ALBINO, V.; BERARDI, U.; DANGELICO, R. M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. **Journal of Urban Technology**, v. 22, n. 1, p. 3–21, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>.

ANDERSSON, E.; BARTHEL, S. Memory carriers and stewardship of metropolitan landscapes. **Ecological Indicators**, v. 70, p. 606-614, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.030>.

ARKSEY, H.; O'MALLEY, L. Scoping studies: Towards a methodological framework. **International Journal of Social Research Methodology**, v. 8, n. 1, p. 19-32, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.

AZEVEDO, J. C. et al. The ethics of isolation, the spread of pandemics, and landscape ecology. **Landscape Ecology**, v. 35, p. 2133-2140, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01092-8>.

BATTY, M. *et al.* Smart cities of the future. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 214, n. 1, p. 481-518, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>.

BIBRI, S. E. The IoT for smart sustainable cities of the future: An analytical framework for sensor-based big data applications for environmental sustainability. **Sustainable Cities and Society**, v. 38, p. 230-253, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.034>.

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, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016>.

BORGI, M. Reduction in the use of green spaces during the COVID-19 pandemic and its impact on mental health. **Health & Place**, v. 83, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2023.103093>.

JONG, M. *et al.* Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. **Journal of Cleaner Production**, v. 109, p. 25-38, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.004>.

DOBBS, C.; NITSCHKE, C. KENDAL, D. Assessing the drivers shaping global patterns of urban vegetation landscape structure. **Science of the Total Environment**, v. 592, p. 171-177, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.058>.

FÜNFELD, H. Facilitating local climate change adaptation through transnational municipal networks. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 12, p. 67-73, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.10.011>.

GIFFINGER, R. *et al.* **Smart Cities: Ranking of European medium-sized cities**. Vienna, UT: Centre of Regional Science, 2007. Doi: <https://doi.org/10.34726/3565>.

GRILLI, G.; MOHAN, G.; CURTIS, J. Public park attributes, park visits, and associated health status. **Landscape and Urban Planning**, v. 199, p. 103814, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103814>.

GUERREIRO, Rúben Emanuel Campôa. **Branding urbano**. A revitalização urbana na construção da identidade da cidade. 85 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/6698>. Acesso em: 02 nov. 2023.

HAMEL, Marcio Renan. O antropoceno e o desenvolvimento sustentável: Implicações epistêmicas e jurídicas. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 15, p. 1-19, 2025. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v15.5146>.

HAMMI, B. *et al.* IoT technologies for smart cities. **IET Networks**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-net.2017.0163>.

HÖJER, M.; WANGEL, J. Smart sustainable cities: Definition and challenges. In: HILTY, L.; AEBISCHER, B. (eds). **ICT innovations for sustainability**. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, v. 310, p. 333-349, 2014. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_20.

ISMAGILOVA, E. et al. Smart cities: Advances in research: An information systems perspective. **International Journal of Information Management**, v. 47, p. 88-100, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.004>.

JABAREEN, Yosef. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. **Cities**, v. 31, p. 220-229, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.05.004>.

KONIJNENDIJK, C. C. et al. Defining urban forestry – A comparative perspective of North America and Europe. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 4, n. 3-4, p. 93-103, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2005.11.003>.

KRAMERS, A.; WANGEL, J.; HÖJER, M. Governing the smart sustainable city: The case of the Stockholm Royal Seaport. In **Proceedings of ICT for sustainability**, v. 46, p. 99-108, 2016. Doi: <https://doi.org/10.2991/ict4s-16.2016.12>.

LEVAC, D.; COLQUHOUN, H.; O'BRIEN, K. K. Scoping studies: Advancing the methodology. **Implementation Science**, v. 5, n. 69, p. 1-9, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>.

LINHARES, J. E. et al. Governança e gestão inteligentes em municípios de pequeno porte: o caso de Luzerna (SC - Brasil). **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 10, n. ed. esp., p. 246-266, 2020. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v10ied.esp..3124>.

LOVE, N. L. R. et al. Diversity and structure in California's urban forest: What over six million data points tell us about one of the world's largest urban forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 74, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127679>.

MORA, H. et al. Blockchain technologies to address smart city and society challenges. **Computers in Human Behavior**, v. 122, n. 19, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106854>.

MUNN, Z. et al. Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. **BMC Medical Research Methodology**, v. 18, n. 1, p. 143, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>.

NITOSLAWSKI, S. A. et al. Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry. **Sustainable Cities and Society**, v. 51, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101770>.

NYELELE, C.; KROLL, C. N.; NOWAK, D. J. Present and future ecosystem services of trees in the Bronx, NY. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 42, p. 10-20, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.018>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS-HABITAT. ONU-Habitat. Por um futuro urbano melhor. **Relatório anual, Brasil 2022**. Disponível em: <https://relatorio-anual-2022.netlify.app/>. Acesso em: 01 set. 2023.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: A proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor,

number of citations, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, p. 2109-2135, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>.

PAMUKCU-ALBERS, P. et al. Building green infrastructure to enhance urban resilience to climate change and pandemics. **Landscape Ecology**, v. 36, p. 665-673, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01212-y>.

PIRO, G. et al. Information centric services in smart cities. **Journal of Systems and Software**, v. 88, p. 169-188, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2013.10.029>.

SILVA, C. L.; FRANZ, N. M. Análise de brandings urbanos contemporâneos na ótica da sustentabilidade: Abordagens centrais, potencialidades e limitações. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 10, n. ed. esp., p. 60-89, 2020. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v10ied.esp..3130>.

STEENBERG, J. W. N.; DUINKER, P. N.; NITOSLAWSKI, S. A. Ecosystem-based management revisited: Updating the concepts for urban forests. **Landscape and Urban Planning**, v. 186, p. 24-35, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.02.006>.

STEENBERG, J. W. N.; ROBINSON, P. J.; DUINKER, P. N. A spatio-temporal analysis of the relationship between housing renovation, socioeconomic status, and urban forest ecosystems. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 46, n. 6, p. 1115-1131, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1177/2399808317752927>.

TAN, S. Y.; TAEIHAGH, A. Smart city governance in developing countries: A systematic literature review. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 899, 2020. Doi: <https://doi.org/10.3390/su12030899>.

WALLNER, P. et al. Reloading pupils' batteries: Impact of green spaces on cognition and wellbeing. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 6, p. 1205, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15061205>.

WIRTZ, Z. et al. What makes urban forest governance successful? – A study among Canadian experts. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 58, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126901>.

ZALESKI, J. et al. Administração pública, desenvolvimento regional e cidades sustentáveis. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, v. 14, p. 255-277, 2024. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v14.5134>.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Brasil (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento parcial do trabalho.

Agradecemos também ao editor e aos revisores pelo precioso trabalho em tornar esta uma pesquisa melhor.

APÊNDICE

Quadro – Portfólio final de artigos pela Methodi Ordinatio

Ranking	Autores	Título	Revista	IF	Ci	InOrdinatio
1	Colding e Barthel (2017)	An urban ecology critique on the “Smart City” model	Journal of Cleaner Production	9,297	192	242,01
2	White et al. (2021)	A digital twin smart city for citizen feedback	Cities	5,835	91	181,01
3	Nitoslawski et al. (2019)	Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry	Sustainable Cities and Society	7,587	110	180,01
4	Bibri (2020)	Compact urbanism and the synergic potential of its integration with data-driven smart urbanism: An extensive interdisciplinary literature review	Land Use Policy	5,398	53	133,01
5	Kaluarachchi (2021)	Potential advantages in combining smart and green infrastructure over silo approaches for future cities	Frontiers of Engineering Management	0	23	113
6	Deng et al. (2022)	Digital city landscape planning and design based on spatial information technology	Neural Computing and Applications	5,606	7	107,01
7	Irvine et al. (2022)	Smart City Thailand: Visioning and design to enhance sustainability, resiliency, and community wellbeing	Urban Science	3,012	7	107
8	Fernández-Alvarado et al. (2022)	Proposing a sustainable urban 3D model to minimize the potential risk associated with green infrastructure by applying engineering tools	Science of the Total Environment	7,963	2	102,01
9	Gabrys (2022)	Programming nature as infrastructure in the smart forest city COMMENT	Journal of Urban Technology	5,465	2	102,01
10	Chen (2021)	Application of environmental ecological strategy in smart city space architecture planning	Environmental Technology & Innovation	5,263	12	102,01
11	Münzinger, Prechtel e Behnisch (2022)	Mapping the urban forest in detail: From LiDAR point clouds to 3D tree models	Urban Forestry & Urban Greening	4,537	2	102
12	Nguyen et al. (2021)	Integrating remote sensing and machine learning into environmental monitoring and assessment of land use change	Sustainable Production and Consumption	5,032	10	100,01
13	Rodríguez-Puerta et al. (2022)	Mapping tree canopy in urban environments using point clouds from airborne laser scanning and street level imagery	Sensors	3,576	0	100
14	Prebble, McLean e Houston (2021)	Smart urban forests: An overview of more-than-human and more-than-real urban forest management in Australian cities	Digital Geography and Society	0	9	99
15	Schrammeijer, Van Zanten e Verburg (2021)	Whose park? Crowdsourcing citizen's urban green space preferences to inform needs-based management decisions	Sustainable Cities and Society	7,587	7	97,01
16	Araujo et al. (2021)	Artificial intelligence in urban forestry- A systematic review	Urban Forestry & Urban Greening	4,537	4	94
17	Zgórska, Kamrowska-Zaluska e Lorens (2021)	Can the pandemic be a catalyst of spatial changes leading towards the smart city?	Urban Planning	2,8	4	94
18	Mohammadian e Rezaie (2020)	i-Sustainability Plus theory as an innovative path towards sustainable world founded on blue-green	Inventions	3,6	13	93

		ubiquitous cities (Case studies: Denmark and South Korea)				
19	Sunita, Kumar e Shekhar (2021)	Spatial distribution analysis of urban blue-green spaces for mitigating excessive heat with earth observation systems	Environmental Challenges	0	0	90
20	Radović-Marković, Vuković e Mityagin (2021)	ICT and smart cities: Case studies of Moscow and Saint-Petersburg	IPSI BGD Transactions on Internet Research	0	0	90
21	Luvisi e Lorenzini (2014)	RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management	Urban Forestry & Urban Greening	4,537	65	85
22	Mundoli, Unnikrishnan e Nagendra (2017)	The "Sustainable" in smart cities: Ignoring the importance of urban ecosystems	Decision	0	32	82
23	Antrobus (2011)	Smart green cities: From modernization to resilience?	Urban Research and Practice	2,4	88	78
24	Chelleri et al. (2016)	Are people responsive to a more sustainable, decentralized, and user-driven management of urban metabolism?	Sustainability (Switzerland)	3,251	34	74
25	Tulisi (2017)	Urban green network design defining green network from an urban planning perspective	TEMA-Journal of Land Use Mobility and Environment	0	14	64
26	Picu (2018)	Updating geospatial data by creating a high resolution digital surface model	Journal of Applied Engineering Sciences	0	2	62