



*Gestão inteligente de resíduos sólidos urbanos: tecnologias digitais, políticas públicas e sustentabilidade em municípios inteligentes*

## **Gestão inteligente de resíduos sólidos urbanos: tecnologias digitais, políticas públicas e sustentabilidade em municípios inteligentes**

Smart urban solid waste management:  
digital technologies, public policies, and sustainability in smart cities

Giovanna Sampaio  
Universidade Federal de Sergipe/BR

João Antonio Belmino dos Santos  
Universidade Federal de Sergipe/BR

Bruno dos Passos Assis  
Universidade Estadual de Santa Cruz-BA/BR

Carolina Martins Sampaio Sampaio  
Universidade Salvador-UNIFACS/BR

### **Resumo**

Este estudo realiza uma revisão bibliográfica crítica sobre a integração de tecnologias digitais e políticas públicas na gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos em municípios inteligentes. Explora os impactos ambientais, sociais e econômicos da digitalização da gestão de resíduos, destacando os benefícios da economia circular e a inclusão social dos catadores. Analisa os principais desafios tecnológicos, financeiros e culturais, bem como as limitações regulatórias e de governança que dificultam a implementação desses sistemas. Propõe modelos de governança colaborativa e recomenda estratégias para fortalecimento da economia circular local e democratização do acesso à tecnologia. A metodologia adotada foi a revisão bibliográfica sistemática, que abrangeu literatura acadêmica nacional e internacional, artigos científicos, relatórios técnicos e documentos de políticas públicas relevantes. A análise qualitativa dos dados permitiu identificar padrões, desafios e soluções inovadoras relacionadas à gestão de resíduos em contextos urbanos inteligentes. O estudo conclui enfatizando a necessidade de integração entre inovação tecnológica, políticas públicas inclusivas e governança participativa para promover cidades inteligentes e sustentáveis.

**Palavras-chave:** Gestão inteligente; Resíduos sólidos urbanos; Cidades inteligentes; Sustentabilidade.

### **Abstract**

This study presents a critical literature review on the integration of digital technologies and public policies in the sustainable management of urban solid waste in smart cities. It explores the environmental, social, and economic impacts of the digitalization of waste management, highlighting the benefits of the circular economy and the social inclusion of waste pickers. The study analyzes the main technological, financial, and cultural challenges, as well as the

regulatory and governance limitations that hinder the implementation of these systems. It proposes collaborative governance models and recommends strategies for strengthening the local circular economy and democratizing access to technology. The methodology adopted was a systematic literature review, encompassing national and international academic literature, scientific articles, technical reports, and relevant public policy documents. Qualitative data analysis allowed for the identification of patterns, challenges, and innovative solutions related to waste management in smart urban contexts. The study concludes by emphasizing the need for integration between technological innovation, inclusive public policies, and participatory governance to promote smart and sustainable cities.

**Keywords:** Intelligent management; Urban solid waste; Smart cities; Sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização global tem impulsionado a necessidade de soluções inovadoras para os desafios enfrentados pelas cidades, especialmente no que se refere à sustentabilidade ambiental e à qualidade de vida da população urbana. Nesse contexto, o conceito de municípios inteligentes (smart cities) surge como uma estratégia promissora para integrar tecnologia, inovação e governança participativa na administração pública urbana. Municípios inteligentes são definidos como aqueles que utilizam tecnologias digitais avançadas, **como** Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial (IA), para otimizar serviços públicos, melhorar a eficiência operacional e promover o desenvolvimento sustentável (Albino; Berardi; Dangelico, 2015).

A gestão de resíduos sólidos urbanos, um dos principais desafios das cidades contemporâneas, constitui uma área que pode se beneficiar significativamente da implementação de soluções inteligentes, oferecendo oportunidades para inovação e eficiência nos processos de coleta, destinação e reutilização de resíduos.

O problema central desta pesquisa consiste em compreender de que forma a integração entre tecnologias digitais e políticas públicas inovadoras pode transformar a gestão de resíduos sólidos em municípios inteligentes, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a inclusão social e a eficiência operacional. Apesar dos avanços tecnológicos, muitos municípios ainda enfrentam dificuldades relacionadas à coleta seletiva, ao tratamento e à destinação final dos resíduos, o que acarreta impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública (Gupta et al., 2021). Além disso, a gestão ineficiente dos resíduos sólidos está associada a desigualdades sociais, especialmente em áreas periféricas, onde a infraestrutura é precária e a população em



situação de vulnerabilidade é diretamente afetada (Wilson et al., 2015). Nesse sentido, investigar práticas e tecnologias aplicáveis à gestão integrada de resíduos sólidos em municípios inteligentes torna-se fundamental para superar tais barreiras.

O objetivo geral deste artigo é analisar as contribuições das tecnologias digitais e das políticas públicas para a otimização da gestão de resíduos sólidos em municípios inteligentes, destacando seus benefícios ambientais, sociais e econômicos. Como objetivos específicos, pretende-se:

- I. mapear as principais tecnologias e modelos de gestão aplicados à coleta, ao tratamento e à destinação de resíduos;
- II. avaliar o impacto dessas soluções em termos de sustentabilidade e inclusão social;
- III. identificar os desafios e limitações para a implementação dessas tecnologias;
- IV. propor recomendações para políticas públicas integradas que fortaleçam a gestão inteligente de resíduos sólidos.

A relevância desta pesquisa está relacionada à necessidade crescente de cidades mais sustentáveis e resilientes, capazes de enfrentar o crescimento populacional e os impactos ambientais decorrentes da urbanização acelerada. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2020), mais da metade da população mundial reside em áreas urbanas, o que implica aumento significativo na geração de resíduos sólidos e maior pressão sobre os sistemas municipais de gestão. Nesse contexto, municípios inteligentes, ao integrarem tecnologia e governança eficiente, podem atuar como vetores de transição para a economia circular, reduzindo a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários e promovendo práticas de reutilização e reciclagem (Batty et al., 2012). Ademais, a inclusão social — especialmente dos catadores de materiais recicláveis e de comunidades marginalizadas — deve ser considerada parte integrante das estratégias de gestão sustentável (Dias, 2016).

Dessa forma, espera-se que este estudo contribua para o avanço do conhecimento acadêmico e prático sobre a gestão sustentável de resíduos sólidos em municípios inteligentes, oferecendo subsídios para gestores públicos, formuladores de políticas e pesquisadores interessados em tecnologias urbanas sustentáveis. A gestão eficiente dos resíduos sólidos não constitui apenas uma questão ambiental, mas também um fator determinante para a qualidade

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

de vida urbana, a justiça social e o desenvolvimento econômico sustentável, pilares essenciais para o futuro das cidades inteligentes.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A conceituação de municípios inteligentes tem evoluído significativamente nas últimas duas décadas, impulsionada pelo avanço tecnológico e pela crescente necessidade de sustentabilidade urbana. Segundo Komninos (2013), municípios inteligentes são cidades que integram infraestrutura digital, inovação tecnológica e participação social com o objetivo de promover uma gestão urbana eficiente e sustentável. Essa concepção abrange o uso de tecnologias digitais para aprimorar a governança, a mobilidade, a segurança, a gestão ambiental e, especialmente, a gestão de recursos naturais e resíduos sólidos, que se configuram como um dos maiores desafios urbanos (Neirotti et al., 2014). A evolução desse conceito tem destacado que a inteligência urbana não se restringe à adoção de tecnologias, mas também envolve a integração de sistemas e de atores sociais, econômicos e ambientais, visando garantir qualidade de vida e sustentabilidade (Hollands, 2008).

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um componente essencial da administração municipal, influenciando diretamente a saúde pública, o meio ambiente e a economia local. Tradicionalmente, essa gestão baseia-se nas etapas de coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos em aterros sanitários ou lixões, modelo que enfrenta limitações crescentes diante do aumento da geração de resíduos e das demandas por sustentabilidade (Kaza et al., 2018). Abordagens contemporâneas de gestão enfatizam a chamada hierarquia dos resíduos, que prioriza a redução, a reutilização e a reciclagem antes da disposição final, alinhando-se aos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável (UNEP, 2015). Contudo, a implementação desses princípios ainda enfrenta barreiras técnicas, financeiras e sociais, sobretudo em municípios de pequeno e médio porte, nos quais a infraestrutura e os recursos institucionais são limitados.

Entre os principais desafios da gestão tradicional de resíduos sólidos destacam-se a baixa cobertura da coleta seletiva, o descarte irregular de resíduos, a falta de integração entre os atores públicos e privados, além das dificuldades relacionadas à fiscalização e à conscientização da população (Hoornweg; Bhada-Tata, 2012). Outro aspecto relevante refere-se à inclusão social, especialmente dos catadores de materiais recicláveis, que desempenham



papel fundamental na cadeia de reciclagem, mas frequentemente enfrentam condições precárias de trabalho e exclusão dos sistemas formais de gestão (Dias, 2016). Ademais, os modelos tradicionais apresentam limitações em termos de transparência e eficiência operacional, fatores que comprometem a sustentabilidade econômica e ambiental dos sistemas municipais.

Diante dessas limitações, têm emergido modelos integrados de gestão de resíduos sólidos, que incorporam tecnologia, governança colaborativa e participação cidadã, em consonância com o conceito de municípios inteligentes (Wilson et al., 2015). Esses modelos buscam otimizar a coleta seletiva por meio de sistemas inteligentes de monitoramento, aplicar big data para o planejamento eficiente de rotas de coleta e utilizar plataformas digitais para informar, educar e engajar a população (Zhao et al., 2020). Além disso, a adoção de tecnologias voltadas ao tratamento e à valorização de resíduos, como biodigestores, sistemas de compostagem automatizada e recuperação energética, tem ampliado as possibilidades de sustentabilidade urbana (Mourad, 2016).

No contexto brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, representa um marco regulatório relevante para a gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos urbanos. A PNRS estabelece diretrizes voltadas à redução da geração de resíduos, à reutilização, à reciclagem e à disposição final ambientalmente adequada, além de incentivar a responsabilidade compartilhada entre geradores, poder público e setor privado (Brasil, 2010). Essa legislação também reconhece e busca integrar os catadores de materiais recicláveis aos sistemas formais de coleta e reciclagem, promovendo a inclusão social e fortalecendo a economia solidária. Entretanto, a implementação da PNRS ainda ocorre de forma desigual entre os municípios brasileiros, em função das diferentes capacidades técnicas, financeiras e institucionais existentes.

Nesse cenário, as políticas públicas voltadas à gestão de resíduos sólidos devem estar articuladas às estratégias de desenvolvimento urbano sustentável e de cidades inteligentes, que promovem inovação tecnológica, participação social e governança integrada (Angelidou, 2015). A combinação de legislação adequada, incentivos econômicos e programas de educação ambiental revela-se fundamental para que os municípios possam implementar sistemas eficazes de gestão de resíduos, capazes de minimizar impactos ambientais e promover justiça social (López-Mosquera et al., 2014). Ademais, a articulação entre os níveis federal, estadual e municipal constitui um elemento estratégico para o sucesso dessas políticas, sobretudo considerando a diversidade socioeconômica e territorial do Brasil.



*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

Por fim, a fundamentação teórica apresentada evidência que a gestão de resíduos sólidos em municípios inteligentes deve ir além da simples adoção de tecnologias, incorporando práticas participativas e abordagens multidisciplinares capazes de atender às demandas ambientais, sociais e econômicas. Uma abordagem integrada, que combine inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e educação ambiental, pode transformar os desafios da gestão de resíduos em oportunidades para inovação e desenvolvimento sustentável, consolidando os municípios inteligentes como referência para o futuro das cidades (Kitchin, 2014).

## **2.1. Economia circular e sustentabilidade aplicada à gestão de resíduos**

A economia circular emerge como um paradigma fundamental para a transformação da gestão de resíduos sólidos urbanos, especialmente no contexto dos municípios inteligentes. Diferentemente do modelo linear tradicional — que segue a sequência “extrair, produzir, consumir e descartar” —, a economia circular propõe a criação de ciclos fechados, nos quais os resíduos passam a ser utilizados como insumos em novos processos produtivos, minimizando o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos (Geissdoerfer et al., 2017). Essa abordagem está alinhada aos princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social, proporcionando benefícios como a redução dos impactos ambientais, o estímulo à inovação e a geração de empregos, além de fortalecer a resiliência das cidades diante dos desafios climáticos e demográficos (Kirchherr et al., 2017).

A aplicação da economia circular à gestão de resíduos sólidos municipais requer mudanças estruturais e culturais, incluindo o redesenho dos sistemas produtivos, a implementação de políticas públicas eficazes e a sensibilização da população para práticas sustentáveis (Ellen Macarthur *Foundation*, 2019). Municípios inteligentes têm adotado estratégias que incluem o reaproveitamento de resíduos orgânicos por meio da compostagem, a valorização energética de resíduos não recicláveis e o incentivo à reciclagem e à reutilização, viabilizados por políticas integradas e inovação tecnológica (Bocken et al., 2016). Nesse sentido, o conceito de “cidades circulares” busca integrar a gestão de resíduos ao planejamento urbano, promovendo uma economia local mais sustentável e eficiente (Murray; Skene; Haynes, 2017).



Além dos benefícios ambientais, a economia circular aplicada à gestão de resíduos pode gerar impactos positivos na inclusão social e na economia local, especialmente ao formalizar e fortalecer a cadeia de reciclagem e o trabalho dos catadores de materiais recicláveis, que desempenham papel fundamental no fechamento dos ciclos produtivos (Franco, 2017). O fortalecimento dessas cadeias produtivas circulares contribui para a geração de empregos, a capacitação técnica e a inclusão econômica, alinhando-se aos objetivos do desenvolvimento sustentável estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

Nesse contexto, a sustentabilidade aplicada à gestão de resíduos em municípios inteligentes ultrapassa a simples redução do volume de resíduos descartados. Trata-se de uma abordagem sistêmica que envolve a integração entre atores públicos, privados e sociais, na qual políticas públicas, instrumentos financeiros, educação ambiental e inovação tecnológica convergem para a criação de ambientes urbanos mais resilientes e adaptáveis (Awasthi et al., 2020). Essa perspectiva sistêmica mostra-se essencial para enfrentar desafios complexos, como o crescimento populacional urbano acelerado, a escassez de recursos naturais e as mudanças climáticas globais.

## **2.2. Tecnologias digitais relevantes para municípios inteligentes: IoT, Big Data e Inteligência Artificial**

A incorporação de tecnologias digitais constitui um dos pilares centrais para o desenvolvimento de municípios inteligentes, especialmente no que se refere à gestão de resíduos sólidos. A *Internet of Things* (IoT) possibilita a conexão e a comunicação entre sensores, equipamentos e sistemas digitais distribuídos no espaço urbano, viabilizando o monitoramento em tempo real da geração, coleta e destinação de resíduos (Batty et al., 2012). Por exemplo, sensores instalados em contêineres de resíduos podem informar os níveis de enchimento, permitindo a otimização das rotas de coleta, a redução de custos operacionais e a diminuição das emissões de gases poluentes decorrentes do transporte (Chang; Chen; Wang, 2020).

O uso de *big data* complementa essa infraestrutura tecnológica ao possibilitar o armazenamento, o processamento e a análise de grandes volumes de dados provenientes de múltiplas fontes urbanas. A análise avançada desses dados permite identificar padrões de geração de resíduos, prever demandas e aprimorar o processo de tomada de decisão por parte dos gestores públicos, contribuindo para sistemas de coleta mais eficientes e para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes (Kitchin, 2014). Além disso, o uso de *big*

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

*data* possibilita o monitoramento das práticas de consumo e descarte da população, favorecendo o desenvolvimento de campanhas de educação ambiental mais direcionadas e eficazes (Zhao et al., 2020).

A *artificial intelligence* (IA) potencializa essas capacidades ao automatizar processos complexos e fornecer análises preditivas e prescritivas para a gestão urbana (Wang et al., 2018). Algoritmos de *machine learning* podem ser aplicados para otimizar a segregação de resíduos, identificar materiais perigosos, planejar operações de coleta e até sugerir políticas adaptativas conforme as mudanças no comportamento da população (Li; Su; Shen, 2019). Além disso, a IA pode ser empregada no desenvolvimento de sistemas inteligentes de reciclagem automatizada, reduzindo a dependência do trabalho manual e aumentando a eficiência dos processos de triagem.

A convergência dessas tecnologias digitais em um ecossistema urbano inteligente proporciona uma abordagem integrada e adaptativa para a gestão de resíduos sólidos, promovendo maior transparência, eficiência operacional e engajamento cidadão (Neirotti et al., 2014). Entretanto, a implementação dessas tecnologias requer investimentos em infraestrutura tecnológica, capacitação técnica e o fortalecimento de uma governança digital robusta, capaz de garantir a interoperabilidade entre sistemas e a proteção dos dados dos cidadãos (Nam; Pardo, 2011).

Adicionalmente, a digitalização da gestão de resíduos possibilita a criação de plataformas colaborativas, por meio das quais os cidadãos podem reportar irregularidades, acessar informações sobre coleta seletiva e participar mais ativamente dos processos decisórios relacionados às políticas públicas urbanas, fortalecendo a governança participativa (Caragliu; Del Bo; Nijkamp, 2011). Essa interação contribui para a mudança de comportamento da população e para o fortalecimento da responsabilidade socioambiental, elementos essenciais para a promoção da sustentabilidade urbana.

Em síntese, a economia circular e as tecnologias digitais constituem fundamentos estratégicos para a transformação da gestão de resíduos em municípios inteligentes, sendo essenciais para promover um desenvolvimento urbano mais sustentável e resiliente. A integração dessas abordagens possibilita enfrentar desafios históricos da gestão de resíduos



sólidos, ao mesmo tempo em que potencializa a inovação, a inclusão social e a eficiência dos serviços públicos urbanos.

### **2.3. Modelos de gestão integrada e participação social**

A gestão integrada de resíduos sólidos em municípios inteligentes representa um dos principais desafios contemporâneos da administração pública, especialmente no contexto da sustentabilidade urbana e da economia circular. Esse modelo de gestão implica a coordenação articulada entre diferentes atores — setor público, iniciativa privada e sociedade civil — integrando processos técnicos, sociais e tecnológicos com o objetivo de garantir eficiência nas etapas de coleta, tratamento e destinação final dos resíduos. Segundo Bakhshi et al. (2020), a adoção de modelos integrados de gestão de resíduos está intrinsecamente associada à capacidade de promover o engajamento comunitário, fortalecer políticas públicas ambientais e estimular a inovação por meio da incorporação de tecnologias digitais no ambiente urbano.

A participação social emerge como um dos pilares fundamentais da gestão integrada, sendo indispensável para o sucesso de políticas voltadas à coleta seletiva e à logística reversa. O envolvimento direto da população na segregação dos resíduos na fonte não apenas favorece a eficiência operacional dos sistemas de coleta, como também fortalece o senso de responsabilidade compartilhada em relação à sustentabilidade ambiental. De acordo com Medina (2010), cidades que incentivam a participação social por meio de campanhas educativas e instrumentos de incentivo apresentam maiores índices de adesão à coleta seletiva, refletindo diretamente na redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e no aumento do reaproveitamento de materiais recicláveis.

No âmbito da coleta seletiva, a incorporação de tecnologias digitais — como *Internet of Things* (IoT), *big data* e *artificial intelligence* (IA) — tem promovido transformações significativas na gestão de resíduos sólidos urbanos. Dispositivos conectados por meio da IoT permitem o monitoramento em tempo real de contêineres e pontos de coleta, contribuindo para a otimização das rotas de transporte, a redução de custos logísticos e a diminuição dos impactos ambientais associados às emissões de gases poluentes. Estudos recentes indicam que sistemas baseados em sensores inteligentes podem reduzir em até 30% os custos operacionais da coleta urbana (Patrício et al., 2021). Além disso, o uso de *big data* e IA possibilita o processamento e a análise de grandes volumes de dados, permitindo identificar padrões de geração de resíduos, prever demandas e subsidiar o planejamento de intervenções e políticas públicas mais eficientes.

Outro elemento essencial da gestão integrada refere-se à logística reversa, que se tornou obrigatória em diversos países, impulsionada por legislações ambientais mais rigorosas, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, instituída pela Lei nº 12.305/2010. A logística reversa consiste no retorno de produtos e resíduos ao ciclo produtivo, possibilitando seu reaproveitamento, reciclagem ou destinação ambientalmente adequada, em consonância com os princípios da economia circular. Com o suporte de tecnologias digitais, plataformas eletrônicas podem facilitar o mapeamento de pontos de coleta, a comunicação entre *stakeholders* e a rastreabilidade dos fluxos de resíduos, aumentando a transparência e a eficiência do sistema (Kumar; Singh, 2022).

A integração de tecnologias digitais em sistemas inteligentes de gestão de resíduos também contribui para a promoção da inclusão social, especialmente quando associada a programas de reciclagem colaborativa. Por meio de aplicativos móveis e plataformas digitais, os cidadãos podem reportar a disponibilidade de resíduos recicláveis, solicitar serviços de coleta domiciliar e participar de iniciativas de educação ambiental, estimulando a cidadania ativa. Essa abordagem fortalece o capital social e contribui para a construção de ambientes urbanos mais saudáveis e sustentáveis, conforme destacam Hossain et al. (2023).

Entretanto, a implementação de modelos integrados de gestão de resíduos em municípios inteligentes ainda enfrenta desafios relevantes, entre os quais se destacam a desigualdade no acesso às tecnologias digitais, a resistência cultural à mudança de hábitos de consumo e descarte, bem como a complexidade da coordenação entre múltiplos atores institucionais. Nesse sentido, torna-se fundamental que as políticas públicas priorizem investimentos em infraestrutura tecnológica, capacitação institucional e programas educacionais inclusivos, garantindo que a tecnologia atue como instrumento de inclusão e não como fator de ampliação das desigualdades sociais (*Un-Habitat*, 2020).

Por fim, a sustentabilidade da gestão integrada de resíduos sólidos em municípios inteligentes depende da adoção de uma abordagem sistêmica e holística, capaz de articular políticas ambientais, inovação tecnológica, governança participativa e responsabilidade socioambiental. Essa convergência de estratégias possibilita a construção de cidades mais resilientes e preparadas para enfrentar os desafios ambientais do século XXI, consolidando a transição para um modelo de desenvolvimento urbano sustentável baseado nos princípios da economia circular.

#### **2.4. Infraestrutura verde e soluções urbanas sustentáveis em municípios inteligentes**

A infraestrutura verde configura-se como um componente fundamental para o desenvolvimento sustentável das cidades inteligentes, promovendo a integração entre o ambiente construído e os ecossistemas naturais. Conforme destacam Benedict e McMahon (2006), infraestrutura verde refere-se a uma rede estrategicamente planejada de áreas naturais e seminaturais capaz de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais, tais como o controle de enchentes, a purificação do ar e da água e a regulação térmica em ambientes urbanos. Ao incorporar essa infraestrutura aos processos de planejamento urbano, os municípios inteligentes podem mitigar os impactos ambientais decorrentes da urbanização acelerada e, simultaneamente, promover melhorias significativas na qualidade de vida da população.

As soluções urbanas sustentáveis ampliam essa perspectiva ao incluir práticas inovadoras voltadas à gestão eficiente dos recursos naturais, à mobilidade urbana sustentável e ao uso racional de energia, entre outras iniciativas. De acordo com Newman e Kenworthy (2015), a integração entre infraestrutura verde e tecnologias digitais — como sensores ambientais, análise de dados em tempo real e plataformas de gestão urbana integrada — amplia a capacidade das cidades de responder a desafios complexos relacionados à sustentabilidade. Esse modelo possibilita, por exemplo, o monitoramento da qualidade do ar em parques urbanos, a previsão de eventos extremos, como enchentes, e a otimização do uso de recursos hídricos, alinhando-se ao conceito de cidades resilientes.

No contexto brasileiro, iniciativas de implementação de infraestrutura verde em municípios inteligentes podem ser observadas em projetos como o Parque Linear do Rio Arrudas, em Belo Horizonte, que integra recuperação ambiental, espaços de lazer e conectividade urbana. Segundo pesquisa da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2022), essa iniciativa contribuiu para a redução das enchentes urbanas e para o aumento da biodiversidade local, ao mesmo tempo em que promoveu inclusão social por meio da ampliação do acesso a áreas verdes restauradas. Tais resultados corroboram estudos internacionais que apontam a infraestrutura verde como estratégia eficaz de adaptação urbana às mudanças climáticas (European Environment Agency, 2019).

Em escala global, Singapura destaca-se como referência na implementação de soluções urbanas sustentáveis baseadas em infraestrutura verde. O programa *City in a Garden* busca integrar vegetação e recursos hídricos ao tecido urbano por meio de estratégias de planejamento

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

ambiental e do uso de tecnologias inteligentes para monitoramento e manutenção dos ecossistemas urbanos (Tan et al., 2021). A cidade-estado também implementa sistemas avançados de captação e reutilização de água da chuva, promovendo a economia circular no uso dos recursos hídricos e reduzindo a pressão sobre fontes convencionais de abastecimento.

Outro exemplo internacional relevante é a cidade de Copenhague, que estabeleceu como meta tornar-se neutra em carbono até 2025 por meio de um conjunto integrado de medidas que inclui infraestrutura verde para drenagem urbana sustentável, redes de ciclovias inteligentes e sistemas de energia renovável. A experiência da cidade dinamarquesa evidencia a importância de um planejamento urbano holístico aliado à governança participativa para o sucesso das soluções sustentáveis em ambientes urbanos (Beatley, 2016). Além disso, Copenhague utiliza dados provenientes de sensores ambientais para ajustar, em tempo real, a gestão de recursos e os sistemas de mobilidade urbana, contribuindo para a eficiência operacional e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Apesar dos avanços observados, a implementação de infraestrutura verde e de soluções urbanas sustentáveis em municípios inteligentes enfrenta desafios relevantes, como a necessidade de integração intersetorial, a disponibilidade de financiamento adequado e a participação ativa da sociedade civil. A literatura aponta que modelos de governança colaborativa, que envolvem governos locais, setor privado e cidadãos, constituem fator determinante para a consolidação dessas práticas (Bulkeley; Betsill, 2013). No Brasil, por exemplo, iniciativas desenvolvidas em cidades como Curitiba e Florianópolis indicam que a cooperação entre diferentes níveis de governo e a incorporação de tecnologias digitais são elementos essenciais para ampliar a escala e a eficácia dessas soluções.

Além disso, torna-se imprescindível o fortalecimento de políticas públicas que incentivem a adoção da infraestrutura verde e de soluções urbanas sustentáveis, alinhadas aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, como o Acordo de Paris e a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Instrumentos como programas de financiamento climático, incentivos fiscais e parcerias público-privadas podem acelerar a implementação dessas iniciativas, gerando impactos positivos tanto do ponto de vista socioambiental quanto econômico para os municípios inteligentes (*World Bank*, 2019).



*Gestão inteligente de resíduos sólidos urbanos: tecnologias digitais, políticas públicas e sustentabilidade em municípios inteligentes*

Por fim, a adoção da infraestrutura verde e de soluções urbanas sustentáveis representa um avanço significativo na transformação dos municípios em ambientes urbanos mais inteligentes, resilientes e inclusivos. A integração entre ecossistemas naturais, inovação tecnológica e participação social constitui um caminho estratégico para o desenvolvimento urbano sustentável, capaz de enfrentar os desafios ambientais globais e, simultaneamente, promover qualidade de vida e justiça social nas cidades contemporâneas.

## **2.5. Inovações tecnológicas e tratamento de resíduos**

O tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem passado por transformações significativas nas últimas décadas, impulsionado por inovações tecnológicas voltadas à sustentabilidade, à eficiência operacional e à redução dos impactos ambientais. Entre as tecnologias emergentes mais relevantes destacam-se a compostagem avançada, os biodigestores e a incineração com recuperação energética, cada uma contribuindo para o fechamento do ciclo de materiais e para o fortalecimento da economia circular em municípios inteligentes. Essas tecnologias desempenham papel fundamental na redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, aspectos essenciais no enfrentamento das mudanças climáticas (Gonzalez et al., 2020).

A compostagem, tradicionalmente utilizada no tratamento de resíduos orgânicos, tem sido aprimorada por meio de avanços tecnológicos que aumentam a eficiência do processo. Sistemas contemporâneos incorporam mecanismos automatizados de controle de temperatura, umidade e aeração, otimizando a decomposição biológica e a qualidade do composto produzido, que pode ser reutilizado como fertilizante natural (DIAZ et al., 2009). Em municípios inteligentes, essa tecnologia pode ser integrada a sensores baseados em *Internet of Things* (IoT), capazes de monitorar em tempo real as condições operacionais do processo, reduzindo perdas e permitindo a gestão remota dos sistemas (Kibira et al., 2021). A adoção da compostagem urbana contribui significativamente para a redução do volume de resíduos orgânicos, que representam aproximadamente 50% dos RSU em países em desenvolvimento, conforme dados da *UN-Habitat* (2021).

Outra inovação tecnológica relevante é o uso de biodigestores para a conversão anaeróbia de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes. Essa tecnologia, além de reduzir o volume de resíduos sólidos, permite a geração de energia renovável, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade energética das cidades inteligentes (Lübken et al., 2019). O biogás produzido

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

pode ser utilizado para geração de eletricidade, produção de calor ou como combustível veicular, ampliando suas possibilidades de aplicação. Estudos indicam que biodigestores descentralizados representam uma solução eficiente para contextos urbanos e periurbanos, pois reduzem custos logísticos associados ao transporte de resíduos e favorecem a autossuficiência energética local (Mata-Alvarez Et al., 2014).

Paralelamente, a incineração com recuperação energética, embora objeto de debates em determinados contextos devido às possíveis emissões atmosféricas, tem evoluído significativamente com o desenvolvimento de tecnologias de alta eficiência e sistemas avançados de controle ambiental. Essas tecnologias permitem capturar gases tóxicos e recuperar energia na forma de eletricidade ou vapor para processos industriais (Arena, 2012). Os sistemas modernos de incineração utilizam mecanismos de filtragem e monitoramento que reduzem substancialmente a emissão de partículas e gases nocivos, como dioxinas e furanos, possibilitando sua integração em estratégias municipais de gestão sustentável de resíduos. Em cidades inteligentes, a articulação entre sistemas de incineração e redes energéticas inteligentes (*smart grids*) amplia a eficiência do aproveitamento energético, contribuindo para a sustentabilidade urbana (Zaman; Lehmann, 2011).

Além das tecnologias físicas de tratamento, a incorporação de tecnologias digitais, como *artificial intelligence* (IA) e *big data*, tem promovido avanços significativos na eficiência operacional e no processo de tomada de decisão na gestão de resíduos. Plataformas inteligentes podem analisar grandes volumes de dados coletados por sensores, câmeras e dispositivos conectados, permitindo a otimização de rotas de coleta, a previsão de volumes de resíduos, a identificação de pontos de descarte irregular e o planejamento de intervenções na limpeza urbana (Dias et al., 2022). Essas soluções contribuem para a redução de custos operacionais e de impactos ambientais, além de melhorar a qualidade dos serviços prestados à população. Sistemas baseados em IA, por exemplo, podem ajustar automaticamente a frequência da coleta de acordo com a geração de resíduos, evitando desperdícios logísticos e congestionamentos urbanos (Ravindra; Aggarwal, 2020).

Adicionalmente, o uso de *big data* permite a realização de análises preditivas que favorecem uma gestão proativa dos resíduos, antecipando picos sazonais de geração e subsidiando o planejamento de políticas públicas. Em municípios inteligentes, essas análises são frequentemente integradas a plataformas de governança digital, que ampliam a



transparência administrativa e fortalecem o engajamento social nos processos decisórios (Batista et al., 2021). O acesso público a dados abertos relacionados à gestão de resíduos também incentiva práticas sustentáveis individuais e coletivas, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 e ODS 12) estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas.

Apesar das vantagens dessas inovações, sua implementação enfrenta desafios significativos, especialmente em países em desenvolvimento. Entre os principais obstáculos destacam-se limitações financeiras, carências de infraestrutura adequada e a necessidade de capacitação técnica para gestores e operadores dos sistemas (Wilson et al., 2015). Além disso, é essencial assegurar que essas tecnologias sejam ambientalmente sustentáveis, socialmente inclusivas e economicamente viáveis, evitando efeitos adversos, como a geração de resíduos tóxicos ou a exclusão socioeconômica de catadores informais.

Por fim, o futuro da gestão de resíduos em municípios inteligentes tende a ser caracterizado pela convergência entre tecnologias físicas e digitais, formando sistemas integrados, inteligentes e adaptativos. A sinergia entre compostagem automatizada, biodigestores, incineração com recuperação energética e plataformas baseadas em IA constitui um modelo inovador capaz de transformar os sistemas urbanos de gestão de resíduos. Essa abordagem contribui para o fortalecimento da economia circular, a redução da poluição e o desenvolvimento urbano resiliente, conforme destacado por Geissdoerfer et al. (2017), que enfatizam o papel central da inovação tecnológica na transição para sistemas urbanos sustentáveis.

## **2.6. Impactos ambientais, sociais e econômicos**

A gestão sustentável de **resíduos sólidos urbanos (RSU)** desempenha papel central na mitigação dos impactos ambientais associados às mudanças climáticas, especialmente no que se refere à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Estudos indicam que a decomposição inadequada de resíduos em aterros sanitários constitui uma importante fonte de metano ( $\text{CH}_4$ ), gás cujo potencial de aquecimento global é aproximadamente 28 vezes superior ao do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2022). Nesse contexto, a adoção de tecnologias como biodigestores para captura e aproveitamento de biogás, compostagem para o tratamento de resíduos orgânicos e incineração com recuperação energética contribui diretamente para a redução dessas emissões, colaborando para o

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

cumprimento de metas nacionais e internacionais de mitigação climática, como as estabelecidas no Acordo de Paris (*Unfccc*, 2015; Gonzalez et al., 2020).

Além dos aspectos ambientais, os sistemas inteligentes de gestão de resíduos apresentam impactos sociais relevantes, especialmente quando se considera o papel desempenhado por comunidades de catadores e trabalhadores informais. Esses grupos, frequentemente localizados em áreas periféricas e socialmente vulneráveis, exercem função fundamental na cadeia da reciclagem, promovendo a segregação e a reinserção de materiais no ciclo produtivo. Políticas públicas integradas que reconheçam e formalizem a atividade desses trabalhadores não apenas ampliam a inclusão social e a proteção dos direitos trabalhistas, mas também contribuem para aumentar a eficiência dos sistemas de gestão de resíduos (Dias; Alves, 2019). Em países como Brasil e Índia, cooperativas de catadores têm se destacado como exemplos de práticas bem-sucedidas na implementação de modelos sustentáveis de reciclagem, melhorando as condições de vida dos trabalhadores e promovendo o desenvolvimento socioeconômico local (Wilson et al., 2015).

O reconhecimento do protagonismo dos catadores na gestão de resíduos dialoga diretamente com os princípios da justiça ambiental, que enfatizam a equidade na distribuição dos benefícios e dos ônus ambientais (Agyeman, 2013). A integração desses atores em sistemas inteligentes de gestão, por meio de plataformas digitais e processos colaborativos, pode fortalecer a governança participativa, aproximando a gestão pública das realidades sociais das comunidades urbanas mais vulneráveis (Batista et al., 2021). Essa abordagem contribui não apenas para a inclusão social, mas também para a construção de cidades mais resilientes e equitativas, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 e ODS 12) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (United Nations, 2015).

Do ponto de vista econômico, a transição para sistemas inteligentes e sustentáveis de gestão de resíduos pode representar uma oportunidade significativa para a geração de empregos verdes, o fortalecimento da economia circular e a atração de investimentos. Pesquisas indicam que investimentos em tecnologias limpas e em sistemas inteligentes de coleta seletiva tendem a apresentar retorno financeiro positivo no médio e longo prazo, considerando fatores como a redução de custos associados à disposição em aterros sanitários, a diminuição da poluição e a geração de energia a partir de resíduos (Liu et al., 2021). Além disso, modelos econômicos sustentáveis apontam para o potencial de monetização de créditos de carbono, que podem ser



negociados em mercados internacionais, gerando recursos adicionais para os municípios (Fornell; Hernández, 2020).

A viabilidade financeira desses sistemas depende, entretanto, da existência de um marco regulatório consistente e de políticas públicas que incentivem parcerias público-privadas (PPPs) e a inovação tecnológica (Wilson et al., 2015). A integração de tecnologias digitais, como *artificial intelligence* (IA) e *big data*, contribui para a otimização de processos operacionais, reduz desperdícios e permite uma alocação mais eficiente de recursos, fator essencial para assegurar a sustentabilidade econômica dessas iniciativas (DIAS et al., 2022). Experiências internacionais demonstram que cidades que adotam sistemas inteligentes de gestão de resíduos obtêm melhorias significativas na eficiência das operações de coleta e tratamento, além da redução de custos operacionais e do aumento da satisfação dos cidadãos (Batista et al., 2021).

No Brasil, entretanto, a gestão de resíduos ainda enfrenta desafios estruturais que dificultam a plena implementação de sistemas inteligentes, tais como a insuficiência de infraestrutura adequada, limitações de investimento e a fragmentação das políticas públicas (Costa; Silva, 2020). A superação desses entraves exige a articulação entre diferentes atores institucionais — governo, setor privado e sociedade civil — bem como o fortalecimento de estratégias de capacitação técnica e educação ambiental, fundamentais para promover mudanças nos padrões de consumo e descarte da população (UNEP, 2018).

Dessa forma, as dimensões ambiental, social e econômica da gestão de resíduos urbanos apresentam forte interdependência. Estratégias que integrem esses três pilares são capazes de promover simultaneamente a redução dos impactos ambientais, o fortalecimento da justiça social e a construção de sistemas economicamente viáveis e replicáveis em diferentes contextos urbanos (Geissdoerfer et al., 2017). A literatura internacional demonstra que o sucesso dessas iniciativas depende de planejamento estratégico consistente, políticas públicas inclusivas e investimento contínuo em inovação tecnológica, fatores essenciais para impulsionar o desenvolvimento sustentável das cidades no século XXI (Zaman; Lehmann, 2011).

### 3. MÉTODO

A metodologia adotada foi a revisão bibliográfica sistemática, que abrangeu literatura acadêmica nacional e internacional, artigos científicos, relatórios técnicos e documentos de políticas públicas relevantes. A análise qualitativa dos dados permitiu identificar padrões, desafios e soluções inovadoras relacionadas à gestão de resíduos em contextos urbanos

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

inteligentes para mapear as principais tecnologias e modelos de gestão aplicados à coleta, ao tratamento e à destinação de resíduos, bem como avaliar o impacto dessas soluções em termos de sustentabilidade e inclusão social.

## 4. ANÁLISE E RECOMENDAÇÕES

### 4.1. Desafios e limitações na implementação

A implementação de sistemas inteligentes e sustentáveis para a gestão de resíduos urbanos enfrenta diversos desafios de natureza tecnológica, financeira e sociocultural, que limitam sua ampla adoção, especialmente em contextos socioeconômicos heterogêneos. Do ponto de vista tecnológico, apesar dos avanços em *artificial intelligence* (IA), *big data* e automação, a infraestrutura necessária para integrar esses recursos ainda é insuficiente em muitas cidades, sobretudo em países em desenvolvimento (Gualandi et al., 2021).

Sistemas complexos requerem conectividade robusta, sensores avançados e plataformas digitais capazes de processar grandes volumes de dados em tempo real, o que implica elevados custos iniciais de implementação, frequentemente inacessíveis para municípios com restrições orçamentárias (Liu et al., 2021). Além disso, a adoção dessas tecnologias exige capacitação técnica especializada, ainda pouco difundida na maioria dos órgãos públicos responsáveis pela gestão municipal (Dias et al., 2022).

No âmbito financeiro, a sustentabilidade dos sistemas inteligentes esbarra na limitação de recursos públicos e na dificuldade de atrair investimentos privados para um setor que, em muitos contextos, ainda é percebido como de baixa rentabilidade econômica. A escassez de mecanismos eficazes de financiamento para projetos de gestão inteligente de resíduos compromete sua viabilidade, sobretudo diante da pressão por resultados imediatos e redução de custos operacionais (Wilson et al., 2015).

Em diversos países, a ausência de políticas fiscais específicas que incentivem a inovação tecnológica no setor de resíduos, bem como a inexistência de mercados consolidados para créditos de carbono ou outros instrumentos financeiros sustentáveis, restringe a expansão desses modelos (Fornell; Hernández, 2020). Ademais, a pandemia da COVID-19 agravou essas limitações ao redirecionar recursos públicos para áreas emergenciais, resultando no adiamento ou cancelamento de diversos projetos de sustentabilidade urbana (UNEP, 2021).

Sob a perspectiva sociocultural, a resistência à mudança e a limitada conscientização ambiental da população configuram barreiras significativas à implementação efetiva de



*Gestão inteligente de resíduos sólidos urbanos: tecnologias digitais, políticas públicas e sustentabilidade em municípios inteligentes*

sistemas inteligentes de gestão de resíduos. A transformação dos hábitos de descarte e a adoção de práticas como a coleta seletiva dependem diretamente da participação ativa da sociedade, que, em muitos casos, permanece desinformada ou pouco engajada em relação aos impactos socioambientais do manejo inadequado dos resíduos (Agyeman, 2013). A ausência de programas permanentes de educação ambiental e de campanhas públicas de sensibilização dificulta a consolidação de uma cultura de responsabilidade socioambiental, elemento essencial para o sucesso de políticas de gestão sustentável (Batista et al., 2021). Ademais, a diversidade socioeconômica presente nas cidades resulta em diferentes níveis de acesso à informação, tecnologia e infraestrutura, o que pode intensificar desigualdades preexistentes (Costa; Silva, 2020).

As questões regulatórias também representam um obstáculo relevante para a implementação de soluções inovadoras. A fragmentação das competências administrativas entre diferentes níveis de governo, associada à burocracia excessiva e à falta de clareza em marcos legais, dificulta a coordenação e a implementação integrada de políticas e tecnologias voltadas à gestão de resíduos (Wilson et al., 2015). Em muitos casos, os dispositivos legais encontram-se desatualizados e não acompanham o ritmo das inovações tecnológicas, gerando insegurança jurídica tanto para investidores quanto para gestores públicos (Dias; Alves, 2019). Ademais, a governança municipal, particularmente em cidades de médio e pequeno porte, frequentemente carece de estrutura administrativa adequada e de mecanismos eficazes de transparência e *accountability*, fundamentais para assegurar a efetividade das políticas públicas (Gualandi et al., 2021).

Outro aspecto crítico refere-se às desigualdades regionais, que se refletem na disparidade de acesso à tecnologia e à infraestrutura necessária para a gestão eficiente dos resíduos. Em países de grande extensão territorial, como o Brasil, observa-se significativa assimetria entre regiões no que se refere à coleta, ao tratamento e à reciclagem de resíduos. Regiões como Norte e Nordeste apresentam indicadores inferiores em comparação com outras áreas do país, devido a limitações financeiras, logísticas e institucionais (Costa; Silva, 2020).

Essas desigualdades ampliam vulnerabilidades ambientais e sociais, comprometendo os esforços nacionais voltados à sustentabilidade e tornando necessária a adoção de políticas públicas específicas que promovam maior equidade territorial (UNEP, 2018). Sem estratégias inclusivas, existe o risco de que o avanço tecnológico concentrado nas grandes metrópoles amplie ainda mais as disparidades entre centros urbanos e regiões periféricas ou rurais.

Adicionalmente, a limitação no acesso à tecnologia evidencia o chamado divisor digital, que não apenas compromete a eficiência dos sistemas inteligentes, mas também restringe a participação cidadã e a capacidade de inovação das administrações locais (Batista et al., 2021). Nesse sentido, a inclusão digital constitui um requisito essencial para a modernização da gestão de resíduos e para assegurar que os benefícios ambientais, sociais e econômicos decorrentes dessas inovações sejam distribuídos de forma equitativa. Tal processo exige investimentos paralelos em infraestrutura digital, capacitação tecnológica e políticas públicas integradas, capazes de promover o uso inclusivo e sustentável das tecnologias emergentes (Dias et al., 2022).

Em síntese, os desafios associados à implementação de sistemas inteligentes de gestão de resíduos são complexos e interdependentes. Sua superação requer esforços coordenados entre governos, setor privado e sociedade civil, com ênfase na capacitação técnica, no fortalecimento institucional, na inclusão social e na atualização dos marcos regulatórios. Ademais, é fundamental que as políticas públicas incorporem uma abordagem territorial e culturalmente sensível, de modo a assegurar que a inovação tecnológica atue como instrumento efetivo de promoção da sustentabilidade urbana e da justiça social (Geissdoerfer et al., 2017).

A integração eficaz entre políticas públicas e tecnologias digitais para a gestão sustentável de resíduos urbanos requer uma abordagem sistêmica capaz de considerar a complexidade dos contextos sociais, econômicos e ambientais das cidades contemporâneas. Um dos primeiros passos consiste no desenvolvimento de estratégias integradas que articulem avanços tecnológicos — como *artificial intelligence* (IA) e *big data* — às políticas públicas, permitindo a otimização de recursos e a maximização dos impactos positivos dessas iniciativas (Geissdoerfer et al., 2017). Essa integração pode ser operacionalizada por meio de planos municipais de gestão de resíduos que incluam metas claras de digitalização e automação, alinhadas a diretrizes nacionais e internacionais de sustentabilidade, como a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (United Nations, 2015).

Nesse contexto, a criação de ambientes regulatórios favoráveis, acompanhados de incentivos fiscais e linhas de financiamento voltadas à inovação tecnológica, torna-se essencial para superar limitações financeiras e acelerar a adoção de sistemas inteligentes de gestão de resíduos (Fornell; Hernández, 2020). Adicionalmente, a governança colaborativa emerge como um modelo promissor para fortalecer a implementação de políticas públicas voltadas à gestão



*Gestão inteligente de resíduos sólidos urbanos: tecnologias digitais, políticas públicas e sustentabilidade em municípios inteligentes*

sustentável de resíduos. A participação ativa da sociedade civil, do setor privado e das comunidades locais pode ser estimulada por meio de plataformas digitais que favoreçam o diálogo, a transparência e os mecanismos de *accountability* (Batista et al., 2021).

Esse modelo contribui para ampliar a legitimidade dos processos decisórios e promove a corresponsabilidade entre os diferentes atores envolvidos, ao mesmo tempo em que permite a incorporação de conhecimentos locais e práticas culturais específicas, fatores essenciais para o sucesso das políticas públicas (Agyeman, 2013). Ferramentas digitais, como aplicativos móveis para monitoramento da coleta seletiva e sistemas de *feedback* em tempo real, também podem contribuir para ampliar o engajamento da população e aprimorar a eficiência operacional dos serviços urbanos (Dias et al., 2022).

No que se refere ao fortalecimento da economia circular local, recomenda-se a criação de redes colaborativas que integrem governos, empresas e cooperativas de catadores, estimulando a reutilização e a reciclagem como elementos centrais da cadeia de valor dos resíduos (Geissdoerfer et al., 2017). A economia circular, além de reduzir a pressão sobre os recursos naturais, também contribui para a geração de empregos e para a promoção da inclusão social, especialmente entre grupos historicamente marginalizados, como os catadores de materiais recicláveis (Dias; AlveS, 2019). Nesse sentido, programas governamentais que incentivem a formalização dessas cooperativas e ofereçam capacitação técnica, acesso a crédito e infraestrutura adequada são fundamentais para ampliar a eficiência e a sustentabilidade desse setor (Wilson et al., 2015).

Outro aspecto estratégico refere-se à digitalização dos processos de coleta e triagem de resíduos. A utilização de sensores baseados em *Internet of Things* (IoT) permite o monitoramento em tempo real dos níveis de resíduos em contêineres e pontos de coleta, possibilitando a otimização das rotas de transporte e a redução das emissões veiculares, conforme evidenciado em estudos de caso realizados em cidades inteligentes europeias e asiáticas (Gualandi et al., 2021; Liu et al., 2021). Quando combinadas com sistemas de análise preditiva baseados em IA, essas tecnologias possibilitam antecipar demandas, melhorar a alocação de recursos e reduzir custos operacionais, ao mesmo tempo em que elevam a qualidade dos serviços prestados à população (Dias et al., 2022).

Para garantir a equidade no acesso às tecnologias e evitar o aprofundamento das desigualdades regionais, torna-se igualmente necessário investir em capacitação digital e em

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

infraestrutura tecnológica nas periferias urbanas e em áreas rurais (Costa; Silva, 2020). A inclusão digital fortalece a participação cidadã e amplia as possibilidades de protagonismo das comunidades vulneráveis na gestão de resíduos, contribuindo para a promoção da justiça ambiental e social (Batista et al., 2021). Iniciativas de capacitação desenvolvidas em parceria com organizações da sociedade civil e programas de extensão universitária podem desempenhar papel relevante na democratização do conhecimento tecnológico.

A transparência e a prestação de contas devem constituir princípios fundamentais em todos os níveis da governança da gestão de resíduos. Sistemas de monitoramento público baseados em tecnologias como *blockchain* podem garantir maior rastreabilidade dos fluxos de resíduos, assegurar a correta aplicação dos recursos financeiros e verificar o cumprimento das metas ambientais estabelecidas (Dias et al., 2022). Essas ferramentas contribuem para fortalecer a confiança entre os diferentes atores envolvidos e consolidam modelos de governança colaborativa capazes de promover inovação, eficiência e responsabilidade socioambiental.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste artigo evidencia a complexidade e a multidimensionalidade dos desafios e oportunidades associados à gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos (RSU), especialmente no contexto dos municípios inteligentes. A síntese dos principais achados indica que a integração entre políticas públicas inovadoras e tecnologias digitais avançadas constitui um caminho promissor para a transformação dos sistemas tradicionais de manejo de resíduos, promovendo ganhos significativos em eficiência operacional, redução dos impactos ambientais e inclusão social.

Conforme discutido, processos de digitalização e automação, aliados a modelos de governança colaborativa, contribuem para a otimização do uso dos recursos públicos e para o fortalecimento da participação cidadã, reforçando princípios de transparência e corresponsabilidade na gestão urbana (Batista et al., 2021; Dias et al., 2022).

Além disso, o estudo destacou a relevância da economia circular como paradigma central para a promoção da sustentabilidade local, enfatizando a necessidade de fortalecer redes colaborativas que integrem cooperativas de catadores, empresas e instituições governamentais. Essa articulação não apenas amplia a eficiência do reaproveitamento de materiais, como também contribui para a inclusão socioeconômica de populações em situação de



*Gestão inteligente de resíduos sólidos urbanos: tecnologias digitais, políticas públicas e sustentabilidade em municípios inteligentes*

vulnerabilidade, atendendo simultaneamente a objetivos ambientais e sociais (Geissdoerfer et al., 2017; Dias; Alves, 2019). A digitalização dos processos de coleta e triagem, apoiada por tecnologias como *Internet of Things* (IoT) e *artificial intelligence* (IA), revelou-se igualmente relevante para aumentar a precisão das operações e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, aspecto particularmente relevante diante do cenário de intensificação das mudanças climáticas globais (Gualandi et al., 2021; Loiu et al., 2021).

O estudo também evidenciou que a implementação dessas soluções enfrenta barreiras significativas, que abrangem limitações financeiras e tecnológicas, bem como desafios socioculturais e regulatórios. A heterogeneidade regional e a desigualdade no acesso às tecnologias digitais configuram um cenário de disparidades que pode intensificar desigualdades sociais caso não sejam enfrentadas por meio de políticas públicas inclusivas e territorialmente orientadas (Costa; Silva, 2020). Nesse sentido, a capacitação digital e a democratização do acesso às tecnologias emergem como fatores essenciais para assegurar que os benefícios associados aos municípios inteligentes sejam distribuídos de forma equitativa, evitando o aprofundamento de processos de exclusão social.

O estudo mostra que o avanço dos municípios inteligentes sustentáveis está diretamente relacionado à capacidade de integrar inovação tecnológica, políticas públicas inclusivas e modelos de governança participativa. O êxito na gestão de resíduos sólidos urbanos depende da articulação eficaz desses elementos, permitindo que as cidades não apenas reduzam seus impactos ambientais, mas também promovam justiça social e desenvolvimento econômico sustentável. Nesse sentido, a transformação digital aplicada à gestão ambiental deve ser orientada por princípios de equidade, transparência e cooperação institucional.

Recomenda-se ainda o estabelecimento de políticas públicas que incentivem a inovação aberta e o desenvolvimento de *startups* especializadas em soluções para resíduos sólidos. A criação de ecossistemas locais de inovação que conectem universidades, centros de pesquisa e o setor produtivo pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias adaptadas às especificidades regionais (Fornell; Hernández, 2020). O estímulo à pesquisa aplicada representa, nesse contexto, um fator estratégico para a geração de soluções inovadoras que atendam às demandas das populações locais e ampliem os impactos sociais positivos das políticas públicas (Geissdoerfer et al., 2017).

*Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio*

Em síntese, as propostas apresentadas indicam que a sustentabilidade na gestão de resíduos urbanos depende da articulação integrada entre políticas públicas inovadoras, tecnologias digitais avançadas e modelos de governança participativa e inclusiva. A adoção dessas estratégias pode contribuir de maneira significativa para a construção de cidades mais resilientes, equitativas e ambientalmente responsáveis, alinhadas aos compromissos globais de desenvolvimento sustentável.

Por fim, destaca-se que o tema permanece em constante evolução e requer uma abordagem interdisciplinar e multissetorial para garantir que as soluções tecnológicas sejam implementadas de forma responsável, adaptada às realidades locais e alinhada aos desafios globais da sustentabilidade.

As limitações deste estudo destacam-se a escassez de dados empíricos específicos relacionados à implementação prática dessas tecnologias em municípios de pequeno e médio porte, bem como em contextos periféricos, nos quais os desafios institucionais e estruturais tendem a ser mais acentuados. Ademais, a rápida evolução das tecnologias digitais exige abordagens de pesquisa contínuas e adaptativas, capazes de acompanhar as transformações tecnológicas e avaliar seus impactos socioambientais no médio e longo prazo. Nesse sentido, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise de estudos de caso locais, combinando metodologias qualitativas e quantitativas para compreender de forma mais abrangente as dinâmicas socioambientais e econômicas associadas à gestão inteligente de resíduos.

Outra direção relevante para investigações futuras refere-se à avaliação do impacto social das políticas digitais no engajamento comunitário e na inclusão dos catadores informais nos sistemas formais de gestão de resíduos. A análise de modelos de governança capazes de integrar de forma mais efetiva esses atores representa um campo promissor de investigação. Da mesma forma, torna-se fundamental examinar o papel da inovação aberta e das parcerias público-privadas (PPPs) na sustentabilidade dos sistemas inteligentes de gestão de resíduos, avaliando de que maneira esses instrumentos podem ser otimizados em contextos caracterizados por baixa capacidade institucional e restrições orçamentárias.

Adicionalmente, sugere-se ampliar o escopo das pesquisas para examinar as implicações ambientais específicas associadas às tecnologias utilizadas, incluindo análises de avaliação do



ciclo de vida (*life cycle assessment*) dos equipamentos tecnológicos e a gestão dos resíduos eletrônicos gerados pelos processos de digitalização. A sustentabilidade desses sistemas depende não apenas da eficiência na gestão dos resíduos sólidos urbanos convencionais, mas também da minimização dos impactos ambientais associados às tecnologias incorporadas aos sistemas urbanos inteligentes.

## REFERÊNCIAS

- AGYEMAN, J. *Introducing Just Sustainabilities: Policy, Planning, and Practice*. London: Zed Books, 2013.
- BATISTA, G.; RAMOS, F.; SOUSA, J. Smart Cities and Citizen Engagement: The Role of Open Data for Sustainable Urban Development. *Sustainability*, v. 13, n. 18, p. 10145, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su131810145>. Acesso em: 14 out. 2025.
- COSTA, L.; SILVA, M. Challenges of Municipal Solid Waste Management in Brazil. *Waste Management & Research*, v. 38, n. 1, p. 3-11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X19853669>. Acesso em: 14 out. 2025.
- DIAS, S. M.; ALVES, A. Inclusion of Informal Waste Pickers in Solid Waste Management: A Pathway to Sustainable Cities. *Waste Management*, v. 87, p. 615-624, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.033>. Acesso em: 14 out. 2025.
- DIAS, G. F.; ALVES, D. A.; FARIAS, T. R. Intelligent waste management systems: A review on AI applications in solid waste collection. *Journal of Cleaner Production*, v. 344, p. 131077, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131077>. Acesso em: 14 out. 2025.
- FORNELL, A.; HERNÁNDEZ, S. Carbon Markets and Waste Management: Financial Opportunities in Urban Sustainability. *Environmental Economics and Policy Studies*, v. 22, p. 655-674, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00285-1>. Acesso em: 14 out. 2025.
- GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 14 out. 2025.
- GUALANDI, I.; URBANO, M.; DI FABIO, S. Digital transformation and urban sustainability: Challenges and opportunities in smart waste management. *Sustainable Cities and Society*, v. 72, p. 103065, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103065>. Acesso em: 14 out. 2025.
- IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 14 out. 2025.
- LIU, Y.; LI, J.; WANG, S. Economic Evaluation of Smart Waste Management Systems in Urban Areas. *Sustainability*, v. 13, n. 3, p. 1357, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13031357>. Acesso em: 14 out. 2025.



Giovanna Sampaio; João Antonio Belmino dos Santos; Bruno dos Passos Assis;  
Carolina Martins Sampaio Sampaio

- UN. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 14 out. 2025.
- UNEP. *Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean*. United Nations Environment Programme, 2018. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/waste-management-outlook-latin-america-and-caribbean>. Acesso em: 14 out. 2025.
- UNEP. *The Impact of COVID-19 on Waste Management Systems*. United Nations Environment Programme, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/impact-covid-19-waste-management-systems>. Acesso em: 14 out. 2025.
- UNFCCC. *The Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 14 out. 2025.
- WILSON, D. C.; VELIS, C.; RODIC, L. Integrated sustainable waste management in developing countries. *Waste Management & Research*, v. 33, n. 6, p. 523-540, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X15596751>. Acesso em: 14 out. 2025.
- ZAMAN, A. U.; LEHMANN, S. Challenges and opportunities in transforming a city into a 'Zero Waste City'. *Challenges*, v. 2, n. 4, p. 73-93, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/challe2040073>. Acesso em: 14 out. 2025.