

Inteligência artificial e governança da coleta seletiva em cidades inteligentes

Carlos Quedas Campoy

Professor Doutor em Arquitetura e Urbanismo
Universidade São Judas Tadeu, Brasil
prof.carloscampoy@ulife.com.br
ORCID 0000-0002-2692-6237

Amanda Maria Rabelo Souza

Doutoranda em Arquitetura e Urbanismo
Universidade São Judas Tadeu, Brasil
amanda.rabelo@ulife.com.br
ORCID 0000-0003-1536-7668

Cleide Izidoro

Doutoranda em Arquitetura e Urbanismo
Universidade São Judas Tadeu, Brasil
cleide.izidoro@ulife.com.br
ORCID 0009-0002-6089-8062

Christian Novo Benetti

Doutorando em Arquitetura e Urbanismo
Universidade São Judas Tadeu, Brasil
arq.benetti@gmail.com
ORCID 0009-0000-3528-8858

Maria Luiza Rozatti

Mestranda em Arquitetura e Urbanismo
Universidade São Judas Tadeu, Brasil
mrozatti@gmail.com
ORCID 0009-0007-7273-4985

Inteligência artificial e governança da coleta seletiva em cidades inteligentes

RESUMO

Objetivo - Desenvolver e aplicar um modelo metodológico voltado à análise da governança socioambiental digital na política pública de coleta seletiva de resíduos domiciliares recicláveis secos no município de São Paulo, articulando avaliação da mediação informacional e proposição de arquitetura integrada baseada em inteligência artificial regionalizada.

Metodologia - Adota-se abordagem exploratória de natureza qualitativa, fundamentada em revisão teórica sobre governança urbana digital, políticas de resíduos e inteligência artificial aplicada ao setor público. O estudo estrutura uma matriz analítica tridimensional com critérios ponderados e aplica comparativamente a duas configurações de modelos de linguagem (regionalizado e não regionalizado), complementada por demonstração conceitual de arquitetura integrada envolvendo visão computacional semântica e enquadramento normativo automatizado.

Originalidade/relevância - O estudo se insere no espaço teórico relativo à mediação informacional em políticas públicas urbanas, ainda pouco explorada na literatura de cidades inteligentes, tradicionalmente orientada à eficiência operacional. Ao deslocar o foco para a justiça informacional e o reconhecimento socioterritorial, contribui para o debate sobre tecnologia e sustentabilidade urbana.

Resultados - A aplicação da matriz evidenciou diferença substantiva entre configurações analisadas, com superior desempenho do modelo regionalizado quanto à cobertura territorial, visibilidade de cooperativas e robustez comunicacional. A arquitetura integrada demonstrou coerência sistêmica entre detecção ambiental, enquadramento jurídico e acionamento institucional, indicando viabilidade conceitual de integração entre inteligência artificial e governança da coleta seletiva.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo propõe a mediação informacional como variável estrutural da governança urbana e apresenta instrumento analítico replicável para avaliação de sistemas algorítmicos em políticas públicas. Metodologicamente, avança ao combinar matriz avaliativa ponderada com modelagem conceitual de arquitetura algorítmica aplicada à gestão socioambiental.

Contribuições sociais e ambientais - Os achados indicam potencial de redução do déficit informacional territorial, ampliação do reconhecimento institucional de cooperativas e aprimoramento da orientação normativa ao cidadão, fortalecendo a sustentabilidade urbana e a integração socioterritorial na política de coleta seletiva.

PALAVRAS-CHAVE: Governança urbana. Inteligência artificial. Sustentabilidade urbana.

Artificial Intelligence and governance of selective waste collection in Smart Cities

ABSTRACT

Objective – To develop and apply a methodological model aimed at analyzing digital socio-environmental governance within the public policy of selective collection of dry recyclable household waste in the municipality of São Paulo, articulating the evaluation of informational mediation and the proposition of an integrated architecture based on regionalized artificial intelligence.

Methodology – An exploratory approach of qualitative nature is adopted, grounded in a theoretical review on digital urban governance, waste management policies, and artificial intelligence applied to the public sector. The study structures a three-dimensional analytical matrix with weighted criteria and applies it comparatively to two language model configurations (regionalized and non-regionalized), complemented by a conceptual demonstration of an integrated architecture involving semantic computer vision and automated normative framing.

Originality/Relevance – The study addresses a theoretical gap related to informational mediation in urban public policies, still underexplored in the smart cities literature, which is traditionally oriented toward operational efficiency. By shifting the focus to informational justice and socio-territorial recognition, it contributes to the debate on technology and urban sustainability.

Results – The application of the matrix revealed substantive differences between the analyzed configurations, with superior performance of the regionalized model regarding territorial coverage, visibility of cooperatives, and communicational robustness. The integrated architecture demonstrated systemic coherence between environmental detection, legal framing, and institutional activation, indicating the conceptual feasibility of integrating Artificial Intelligence into selective waste collection governance.

Theoretical/Methodological Contributions – The study proposes informational mediation as a structural variable of urban governance and presents a replicable analytical instrument for evaluating algorithmic systems in public policies. Methodologically, it advances by combining a weighted evaluative matrix with conceptual modeling of algorithmic architecture applied to socio-environmental management.

Social and Environmental Contributions – The findings indicate potential for reducing territorial informational deficits, enhancing institutional recognition of cooperatives, and improving normative guidance to citizens, thereby strengthening urban sustainability and socio-territorial integration within selective waste collection policy.

KEYWORDS: Urban governance. Artificial Intelligence. Urban sustainability.

Inteligencia artificial y gobernanza de la recolección selectiva en ciudades inteligentes

RESUMEN

Objetivo – Desarrollar y aplicar un modelo metodológico orientado al análisis de la gobernanza socioambiental digital en la política pública de recolección selectiva de residuos domiciliarios reciclables secos en el municipio de São Paulo, articulando la evaluación de la mediación informacional y la proposición de una arquitectura integrada basada en inteligencia artificial regionalizada.

Metodología – Se adopta un enfoque exploratorio de naturaleza cualitativa, fundamentado en una revisión teórica sobre gobernanza urbana digital, políticas de residuos e inteligencia artificial aplicada al sector público. El estudio estructura una matriz analítica tridimensional con criterios ponderados y la aplica comparativamente a dos configuraciones de modelos de lenguaje (regionalizado y no regionalizado), complementada con una demostración conceptual de arquitectura integrada que involucra visión computacional semántica y encuadre normativo automatizado.

Originalidad/Relevancia – El estudio se inserta en el vacío teórico relativo a la mediación informacional en políticas públicas urbanas, aún poco explorado en la literatura de ciudades inteligentes, tradicionalmente orientada a la eficiencia operativa. Al desplazar el foco hacia la justicia informacional y el reconocimiento socioterritorial, contribuye al debate sobre tecnología y sostenibilidad urbana.

Resultados – La aplicación de la matriz evidenció diferencias sustantivas entre las configuraciones analizadas, con desempeño superior del modelo regionalizado en términos de cobertura territorial, visibilidad de cooperativas y robustez comunicacional. La arquitectura integrada demostró coherencia sistémica entre detección ambiental, encuadre jurídico y activación institucional, indicando la viabilidad conceptual de integrar la inteligencia artificial en la gobernanza de la recolección selectiva.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – El estudio propone la mediación informacional como variable estructural de la gobernanza urbana y presenta un instrumento analítico replicable para la evaluación de sistemas algorítmicos en políticas públicas. Metodológicamente, avanza al combinar una matriz evaluativa ponderada con la modelización conceptual de una arquitectura algorítmica aplicada a la gestión socioambiental.

Contribuciones Sociales y Ambientales – Los hallazgos indican potencial para reducir el déficit informacional territorial, ampliar el reconocimiento institucional de cooperativas y mejorar la orientación normativa al ciudadano, fortaleciendo la sostenibilidad urbana y la integración socioterritorial en la política de recolección selectiva.

PALABRAS CLAVE: Gobernanza urbana. Inteligencia artificial. Sostenibilidad urbana.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada, dissociada de coordenação territorial e de capacidade institucional compatíveis, intensifica desigualdades socioespaciais e pressiona infraestruturas ambientais (Dodman *et al.*, 2022; Gómez Giménez, 2024; OECD, 2025; Pandey *et al.*, 2025). Na cidade de São Paulo, entre outras condições, tal dinâmica se manifesta de forma expressiva na produção, circulação e destinação de resíduos sólidos urbanos (Santos *et al.*, 2023). Estimativas dos últimos seis anos indicam a geração aproximada de vinte mil toneladas diárias de resíduos no município (Marino, 2025; Prefeitura do Município de São Paulo, 2019). Desse montante, cerca de doze mil toneladas correspondem à coleta domiciliar comum, o que representa aproximadamente 60% do volume total (Prefeitura do Município de São Paulo, 2024). Dentro desse recorte, a fração seca potencialmente reciclável e efetivamente recuperada – equivalente a aproximadamente 3,5% (Marino, 2025) – assume relevância estratégica na economia circular, diretamente associada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis), além de dialogar transversalmente com o ODS 10 (Redução das Desigualdades) (Nações Unidas, s.d.).

Por outro lado, observa-se a persistência de descarte irregular em áreas periféricas, favelas, vias públicas e calçadas, configurando um quadro de degradação ambiental que incide de modo desigual sobre o território (Prefeitura do Município de São Paulo, 2019, 2024; Santos *et al.*, 2023). As fontes oficiais não discriminam o volume específico dessa fração. Sabe-se, contudo, que aproximadamente oito mil toneladas diárias estão vinculadas aos chamados serviços indivisíveis, categoria que abrange varrição, remoção de entulho, limpeza pós-feiras e eventos, lavagem de logradouros e monumentos, além de poda e capinação. Para a gestão desses resíduos em espaços públicos, a municipalidade mobilizava 9.136 profissionais (Prefeitura do Município de São Paulo, 2019). Ainda que não haja dados consolidados divulgados, esse contingente tende a ser atualmente superior, o que reforça a magnitude operacional do problema.

Reconhece-se que a problemática dos resíduos domiciliares recicláveis secos envolve múltiplas dimensões interdependentes. Metodologicamente, este estudo adota um recorte analítico delimitado, focalizando três núcleos: (i) o déficit informacional territorial; (ii) invisibilização socioterritorial de atores: cooperativas e coletores (Marino, 2025; Pandey *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2023); e (iii) descarte irregular em áreas públicas. Portanto, este artigo não se restringe à dimensão quantitativa, expressa no baixo índice de reciclagem, mas envolve também a qualidade da mediação institucional e comunicacional que estrutura as atividades. Parte-se da hipótese de que diferentes formas de mediação informacional podem alterar estruturalmente o grau de acesso à norma, a densidade instrucional e a visibilidade institucional produzida.

Esse contexto contrasta com o arcabouço normativo nacional. Refere-se especialmente à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), ao Decreto nº 10.936/2022 (Brasil, 2022) e ao Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Paulo (São Paulo, 2014), que estabelecem instrumentos de responsabilidade compartilhada, integração prioritária de cooperativas e sistemas de informação. Adicionalmente, formando um *corpus* normativo, a Lei de Acesso à Informação (Brasil, 2011) institui princípios de publicidade, transparência ativa e controle social, incidindo diretamente sobre a governança ambiental urbana.

A persistência da problemática indica que a questão central não reside na ausência de dispositivos legais, mas na forma de mediação informacional que os traduz no território. A sustentabilidade urbana, nesse sentido, exige não apenas eficiência técnica e descarte regular, mas também inteligibilidade normativa, visibilidade territorial e coerência informacional.

Paralelamente, nota-se a expansão de sistemas baseados em inteligência artificial na gestão urbana (Bernstein, 2025; Coeckelbergh, 2020; Leach, 2025). Em contextos internacionais, iniciativas associadas às chamadas cidades inteligentes têm ampliado a digitalização de serviços públicos relacionados à mobilidade, aos recursos hídricos e à energia, bem como a integração de bases de dados e a automação de processos decisórios (Birisowo *et al.*, 2025; Costa; Nadae, 2025; Gracias *et al.*, 2023; Salierno; Leonardi; Cabri, 2025). No sentido de implementação de parte da conceituação de cidade inteligente, em São Paulo, destacam-se sistemas públicos e particulares de monitoramento e vigilância urbana integrados na rede Smart Sampa (Prefeitura do Município de São Paulo, 2025a). Tais infraestruturas introduzem nova camada de governança digital, ainda subutilizada no campo da gestão de resíduos sólidos. Este estudo propõe explorá-la como base para arquitetura integrada de detecção territorial, interpretação normativa e acionamento socioterritorial. Embora a implementação tecnológica possa estruturar respostas ambientais mais integradas e territorializadas, ocorre em contexto marcado por desigualdades estruturais, o que pode ampliar assimetrias já existentes.

No campo específico da gestão de resíduos sólidos, a literatura que articula inteligência artificial e coleta seletiva de resíduos domiciliares recicláveis secos permanece incipiente. Em estudos correlatos sobre gestão urbana, as aplicações algorítmicas, incluídas no escopo das cidades inteligentes, concentram-se predominantemente na dimensão logística, técnica-instrumental. São apontados o potencial de uso de sistemas para roteirização de coleta, classificação automatizada de materiais e previsão de geração de resíduos. Essas iniciativas tendem a ampliar somente a eficiência operacional (Costa; Nadae, 2025; Gracias *et al.*, 2023). Necessita-se, portanto, nessa nova exploração de forma sistemática, investigações direcionadas ao uso de modelos que integrem detecção ambiental automatizada, interpretação normativa e acionamento socioterritorial estruturado das cooperativas, com a sua valorização socioterritorial, assim como dos coletores.

A inteligência artificial constitui um campo composto por diferentes arquiteturas e aplicações. Neste estudo, o recorte se concentra nos *Large Language Models* (Modelos de Linguagem de Grande Escala) (LLM) (Bernstein, 2025; Coeckelbergh, 2020; Leach, 2025) e na visão computacional por segmentação semântica (Mohammed; Ralescu, 2024).

A escolha pelos modelos de linguagem de grande escala se fundamenta em sua capacidade de mediação semântica e síntese contextual, bem como em sua interface acessível entre sistemas computacionais e agentes institucionais. Tais modelos, como o ChatGPT, Gemini e outros, operam por meio de arquiteturas probabilísticas de geração textual, portanto, são considerados como programações generativas. Contudo, sua funcionalidade se apoia em processos analíticos de organização contextual, identificação de padrões e estruturação informacional. Assim sendo, destaca-se a capacidade analítica desses modelos, capazes de apoiar as tomadas de decisões, a síntese informacional e a comunicação institucional. Apesar de seu potencial, sua difusão permanece heterogênea e carece de avaliação crítica quanto à transparência, à adequação territorial e à incorporação de especificidades normativas locais (Bernstein, 2025; Coeckelbergh, 2020; Leach, 2025).

Emergem, nesse cenário, propostas de modelos de linguagem regionais.

Diferentemente de sistemas não regionalizados que buscam dados de contextos hegemônicos, os modelos regionalizados buscam incorporar especificidades linguísticas, culturais e normativas de territórios delimitados (Li *et al.*, 2024; Mekki *et al.*, 2025). Essa característica pode ampliar a aderência a políticas públicas locais e favorecer processos de comunicação pública situada. Contudo, a literatura ainda não apresenta sistematizações metodológicas capazes de avaliar, de forma comparativa e replicável, para o contexto da cidade de São Paulo, o impacto de modelos de linguagem regionais sobre os dois núcleos da problemática.

Em relação à visão computacional semântica, os modelos teóricos e equipamentos da dimensão prática, baseados em performatividade de modelos algorítmicos, sensores, câmeras e as plataformas digitais integradas não apenas identificam, mas também representam e reproduzem elementos presentes na realidade urbana (Mohammed; Ralescu, 2024). Esses sistemas auxiliam nas tomadas de decisões dos gestores públicos. Existem outros tipos de visão computacional, além da semântica, mas essa é escolhida justamente por ser capaz de segmentar e agrupar elementos em categorias, o que é condizente com parte do objetivo do emprego tecnológico proposto.

A articulação entre essas duas camadas – detecção ambiental e interpretação normativa regionalizada – abre possibilidade para arquitetura integrada de governança socioambiental digital, que se configura como objeto deste estudo. Eventos de descartes regulares e irregulares detectados territorialmente, por meio do sistema Smart Sampa – empregado não apenas para vigilância, neste caso, mas também para a melhoria da qualidade ambiental na cidade – podem ser automaticamente e juridicamente enquadrados, com o auxílio do modelo de linguagem regional, e encaminhados a cooperativas locais, que acionam coletores cadastrados. A arquitetura conceitualmente modelada indica potencial de ampliação da eficiência operacional, do reconhecimento institucional e da transparência, mediante eventual disponibilização pública de dados estruturados.

A aplicabilidade da arquitetura proposta não se limita às vias públicas, calçadas e pontos crônicos de descarte irregular. Esses territórios permanecem prioritários, dada a elevada incidência de deposições indevidas e a fragilidade de responsabilização normativa. Contudo, a integração entre detecção automatizada, segmentação semântica e enquadramento jurídico pode também beneficiar entornos de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), espaços nos quais frequentemente se observam acúmulos irregulares fora dos recipientes adequados, descarte em horários inadequados e mistura de frações incompatíveis. Nesses casos, a identificação automatizada do tipo de material e da volumetria estimada permite qualificar a gestão local, orientar ações corretivas e subsidiar estratégias comunicacionais territorializadas.

Adicionalmente, ao integrar os dados detectados ao modelo de linguagem regional, torna-se possível produzir enquadramentos normativos contextualizados e instruções operacionais dirigidas à população usuária do entorno. A rastreabilidade territorial dos eventos registrados favorece a responsabilização quando cabível, mas também a produção de indicadores públicos que evidenciem padrões recorrentes de uso inadequado. Tal dinâmica pode contribuir para aprimorar a governança dos próprios PEVs, reforçando sua função como dispositivos estruturantes da coleta seletiva e ampliando a visibilidade das cooperativas responsáveis pela triagem subsequente.

Do mesmo modo, as próprias cooperativas podem se beneficiar da arquitetura integradora. A sistematização georreferenciada de ocorrências, volumes estimados e tipologias de resíduos potencialmente recicláveis permite planejar deslocamentos de forma mais racional,

reduzir perdas materiais e fortalecer sua posição institucional perante o poder público. A disponibilização estruturada desses dados, ainda que em estágio conceitual neste estudo, tende a ampliar a transparência, a rastreabilidade e o reconhecimento socioterritorial dos coletores e das organizações cooperativas.

Importa reconhecer que propostas de integração entre inteligência artificial e gestão urbana frequentemente incorrem em riscos de tecnossolucionismo, deslocando problemas estruturais para respostas exclusivamente tecnológicas. Sistemas de monitoramento territorial suscitam debates sobre governança de dados, assimetrias informacionais e potencial reforço de desigualdades preexistentes (Coeckelbergh, 2020). A arquitetura, aqui proposta, parte do pressuposto de que a inteligência artificial não substitui a mediação institucional, mas deve operar como infraestrutura informacional subordinada a princípios éticos de transparência, controle público e justiça socioterritorial.

Nesse sentido, a proposta se afasta de abordagens deterministas da tecnologia e reconhece que a arquitetura algorítmica deve permanecer ética e politicamente enquadrada, institucionalmente supervisionada e normativamente auditável (Coeckelbergh, 2020).

Diante desse quadro, indaga-se: em que medida é possível estruturar modelo metodológico que, simultaneamente, avalie a qualidade da mediação informacional na política pública de resíduos e proponha arquitetura integrada capaz de contribuir para reduzir déficits informacionais, enfrentar descarte irregular e ampliar a visibilidade socioterritorial de cooperativas e coletores em São Paulo?

A investigação desloca o enfoque da inteligência artificial como mera ferramenta de automação. Propõe-se concebê-la como componente estruturante da governança ambiental urbana, cuja arquitetura comunicacional e operacional pode produzir efeitos distributivos no acesso à informação e no reconhecimento territorial.

A convergência entre gestão de resíduos, governança urbana, modelo de linguagem regional e visão computacional configura, assim, um campo emergente de investigação. Ao propor uma sistematização metodológica, conforme será apresentado nas próximas seções, o estudo contribui para o debate sobre o uso crítico de inteligência artificial em políticas públicas. Embora centrado na cidade de São Paulo, o arcabouço metodológico desenvolvido busca oferecer potencial de adaptação a outros contextos urbanos, desde que consideradas suas especificidades institucionais e socioterritoriais.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral é desenvolver e aplicar um modelo metodológico voltado à análise da governança socioambiental digital na política pública de coleta seletiva de resíduos domiciliares recicláveis secos no município de São Paulo. O modelo articula avaliação da mediação informacional e proposição de arquitetura integrada baseada em inteligência artificial, com foco nos três núcleos analíticos: (i) o déficit informacional territorial; (ii) a invisibilização socioterritorial de cooperativas e coletores; e (iii) descarte irregular em áreas públicas.

Os objetivos específicos são:

Avaliar empiricamente o impacto de diferentes arquiteturas de mediação informacional – regional e não regional – sobre a inteligibilidade normativa e o reconhecimento socioterritorial, examinando como distintas configurações comunicacionais influenciam o acesso à norma e a visibilidade institucional dos atores da coleta seletiva em São Paulo. A

comparação não busca demonstrar superioridade tecnológica, mas testar se diferentes formas de mediação reproduzem ou atenuam assimetrias informacionais previamente diagnosticadas, transformando hipótese intuitiva em evidência mensurável e oferecendo instrumento avaliativo para governança pública de sistemas baseados em inteligência artificial.

Demonstrar a viabilidade conceitual e operacional de uma arquitetura integrada de governança socioambiental digital. Articula-se detecção territorial automatizada por visão computacional semântica e interpretação normativa mediada por modelo de linguagem regional, com potencial de enquadramento jurídico automatizado e acionamento estruturado de cooperativas e coletores.

3 METODOLOGIA

O A pesquisa se caracteriza como qualitativa de natureza analítico-exploratória (Lakatos; Marconi, 2021) e adota como unidade empírica o município de São Paulo. O desenho metodológico se organiza em duas etapas articuladas: (i) avaliação comparativa da mediação informacional na política pública de coleta seletiva e (ii) demonstração exploratória de arquitetura informacional integrada de governança socioambiental digital.

3.1 Avaliação comparativa da mediação informacional na política pública de coleta seletiva

A primeira etapa se fundamenta na abordagem de Design Science Research (DSR) (Delesposte *et al.*, 2025; Naik *et al.*, 2024), mediante a construção e aplicação de uma matriz analítica orientada aos três núcleos definidos: déficit informacional territorial; invisibilização socioterritorial de cooperativas e coletores; e descarte irregular.

Para operacionalizar a matriz, foram formuladas dez perguntas derivadas de amostragem documental (*corpus*) de fontes oficiais previamente delimitadas: Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), Decreto nº 10.936/2022 (Brasil, 2022), Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Paulo (São Paulo, 2014), Lei de Acesso à Informação (Brasil, 2011) e páginas institucionais sobre Coleta Domiciliar Seletiva da Prefeitura de São Paulo (Prefeitura do Município de São Paulo, 2024, 2025b).

As perguntas foram distribuídas em quatro categorias temáticas:

- a) Cobertura territorial do serviço (3 perguntas);
- b) Orientações operacionais ao cidadão (3 perguntas);
- c) Base normativa aplicável (2 perguntas);
- d) Reconhecimento institucional de cooperativas e coletores (2 perguntas).

O quadro 1 sintetiza a estrutura do instrumento aplicado. A estrutura assegura equilíbrio temático e replicabilidade do instrumento aplicado.

Quadro 1 - Estrutura das perguntas aplicadas aos modelos

Categoria	Eixo analítico	Exemplo de pergunta
Cobertura territorial	Déficit informacional territorial	A coleta seletiva atende todos os distritos do município de São Paulo?
Orientações operacionais	Densidade instrucional	Como os resíduos recicláveis secos devem ser separados e acondicionados?
Base normativa	Inteligibilidade normativa	Quais dispositivos legais regulam a coleta seletiva no município?
Reconhecimento institucional	Visibilidade socioterritorial	Quais cooperativas atuam na triagem de recicláveis e qual sua função?

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Cada pergunta foi submetida a duas configurações de modelo de linguagem: (i) não regionalizada; e (ii) regionalizada, com incorporação explícita do *corpus* normativo paulistano. Utilizaram-se *prompts* padronizados e parâmetros técnicos equivalentes, no Chat GPT (versão 5.2), garantindo comparabilidade entre saídas. Cada configuração foi executada em rodada única com parâmetros técnicos idênticos e controle de variáveis de geração textual, de modo a assegurar comparabilidade direta entre saídas. Não se buscou análise de variabilidade intra-modelo, mas comparação interconfiguração sob condições equivalentes. As respostas geradas foram avaliadas segundo quatro indicadores:

- Índice de legibilidade textual (Flesch Reading Ease adaptado ao português brasileiro) (Flesch, 1948; Crossley; Skalicky; Dascalu, 2019);
- Número de instruções operacionais explícitas;
- Extensão média das respostas;
- Presença de elementos de reconhecimento socioterritorial (menção nominal a cooperativas ou coletores, explicitação de função socioeconômica e referência normativa).

Os resultados foram analisados mediante combinação de mensuração comparativa dos indicadores e interpretação qualitativa orientada pelos dois núcleos analíticos definidos. A aderência normativa foi classificada em três níveis (adequada, parcialmente adequada, inadequada), mediante rastreabilidade ao *corpus* oficial.

Os valores numéricos apresentados na seção Resultados correspondem à aplicação controlada do instrumento em ambiente experimental. Não se trata de teste estatístico inferencial nem de validação populacional, mas de mensuração exploratória comparativa orientada à consistência interna da matriz. O objetivo não é generalizar desempenho algorítmico, mas demonstrar a capacidade discriminatória do instrumento analítico proposto.

3.2 Demonstração exploratória de arquitetura informacional integrada

A segunda etapa consistiu em demonstração exploratória de fluxo lógico-operacional, voltada à modelagem conceitual de integração entre visão computacional semântica e modelo de linguagem regional. Não se tratou de sistema implementado ou validado em ambiente real, mas de simulação controlada com finalidade metodológica ilustrativa.

A demonstração assumiu caráter exploratório e conceitual, estruturada como encadeamento lógico-operacional voltado à verificação da coerência sistêmica entre detecção ambiental, enquadramento normativo e acionamento institucional.

Realizou-se exemplo de segmentação semântica aplicado a imagem representativa de descarte irregular de resíduos recicláveis secos. Utilizou-se o ambiente de inteligência artificial

Segment Anything Web, do Hugging Face, como recurso ilustrativo do que um sistema integrado com as câmeras do Smart Sampa poderia fazer. A estimativa volumétrica não foi realizada por sistema integrado único. Para fins ilustrativos, utilizou-se o modelo de linguagem regional, via ChatGPT, exclusivamente como aproximação operacional de cálculo volumétrico. Não houve integração computacional direta entre segmentação e modelagem tridimensional, mas poderia ocorrer em uma arquitetura de sistema desenhada especificamente para estes objetivos. A visão computacional do ChatGPT identifica objetos ou agrupamentos tridimensionais. A localização territorial, em arquitetura plenamente implementada, poderia ser obtida por integração com sistemas de georreferenciamento (GPS) já presentes em infraestruturas urbanas de monitoramento. Tal camada não foi operacionalizada aqui, permanecendo em nível conceitual.

As saídas dessa etapa foram inseridas em modelo de linguagem regional configurado com o *corpus* normativo previamente delimitado, solicitando-se enquadramento jurídico e indicação de responsabilidade. Em cenário de implementação futura, o sistema poderia sugerir encaminhamento institucional às cooperativas territorialmente pertinentes, com posterior acionamento de coletores cadastrados. Essa funcionalidade foi modelada conceitualmente, não implementada no experimento demonstrativo. Tal acionamento pode ser viabilizado por meio de *software* dedicado, integrado ao fluxo informacional do sistema e acessível nos centros operacionais das cooperativas, sem demandar infraestrutura tecnológica complexa.

Adicionalmente, os registros das ocorrências detectadas – incluindo localização georreferenciada, tipologia do resíduo, volume estimado e tempo de resposta institucional – podem ser disponibilizados em ambiente digital público, ampliando transparência e rastreabilidade. As camadas de transparência pública e rastreabilidade digital não foram implementadas neste estudo. Permanecem como desdobramento operacional coerente com a modelagem proposta e com os princípios da Lei de Acesso à Informação (Brasil, 2011), integrando o arcabouço conceitual, não o experimento empírico.

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação da mediação informacional

A etapa consistiu na aplicação da matriz analítica às duas configurações de modelo de linguagem (não regional e regional), conforme estrutura apresentada no Quadro 1. Por restrição de extensão do artigo, não se reproduzem integralmente as dez perguntas aplicadas, preservando-se a lógica categorial do instrumento e sua replicabilidade metodológica.

A avaliação foi estruturada por uma matriz tridimensional, composta por três dimensões analíticas e doze critérios (C1–C12), conforme apresentado nos Quadros 2, 3 e 4 abaixo, todos aplicados às saídas das duas configurações de modelo de linguagem (LLM).

Quadro 2 – Dimensão 1: déficit informacional territorial

Critério	Definição Operacional	Indicador	Escala / Métrica	Método de Cálculo	ODS	Peso (1–5)
C1 – Legibilidade	Grau de facilidade de leitura da resposta produzida	Índice Flesch adaptado ao português	0–100	Cálculo automático FRE-BR	11	5
C2 – Completude Informacional	Presença de informações normativas relevantes	% de itens normativos mencionados	0–100%	(Itens corretos / total esperado) ×100	11	5
C3 – Precisão Normativa	Grau de aderência ao <i>corpus</i> oficial	Escala ordinal	1=Inadequada; 2=Parcial; 3=Adequada	Classificação por rastreabilidade textual	11 e 12	5
C4 – Número de Instruções Operacionais	Quantidade de orientações explícitas	Contagem simples	Nº absoluto	Frequência por resposta	12	4
C5 – Especificidade Territorial	Menção a dados locais (subprefeituras, PEVs, distritos)	Frequência relativa	0–3 níveis	0=ausente; 1=genérico; 2=parcial; 3=territorial preciso	11	4

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Quadro 3 – Dimensão 2: visibilidade socioterritorial

Critério	Definição Operacional	Indicador	Escala / Métrica	Método de Cálculo	ODS	Peso (1–5)
C6 – Menção Nominal a Cooperativas	Presença explícita de cooperativas ou coletores	Binário	0=Não; 1=Sim	Frequência relativa	10 e 12	5
C7 – Reconhecimento da Função Socioeconômica	Presença de todas as informações normativas relevantes	Escala ordinal	0=Ausente; 1=Implícito; 2=Explícito	Codificação qualitativa estruturada	10	5
C8 – Vinculação ao Arcabouço Normativo	Grau de aderência ao <i>corpus</i> oficial delimitado	Escala ordinal	0=Ausente; 1=Genérica; 2=Específica	Análise textual comparativa	10 e 12	4
C9 – Linguagem Inclusiva	Quantidade de orientações explícitas ao cidadão	Escala ordinal	0=Inexistente; 1=Neutra; 2=Inclusiva	Protocolo de codificação semântica	10	3

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Quadro 4 – Dimensão 3: robustez comunicacional

Critério	Definição Operacional	Indicador	Escala / Métrica	Método de Cálculo	ODS	Peso (1–5)
C10 – Coerência Argumentativa	Consistência lógica interna da resposta	Escala ordinal	1–3	Avaliação qualitativa padronizada	11	3
C11 – Estruturação Informacional	Organização clara em tópicos ou etapas	Escala ordinal	1–3	Protocolo estruturado	11	3
C12 – Extensão Textual	Tamanho médio da resposta	Nº palavras	Valor absoluto	Contagem automática	-	2

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Dimensão 1, a LLM não regional apresentou alta legibilidade ($C1 \approx 70$), porém baixa completude normativa ($C2 \approx 10\%$), aderência inadequada ao *corpus* ($C3 \approx 1$), poucas instruções operacionais ($C4 \approx 1,2$) e territorialidade ausente ou genérica ($C5 \approx 0,3$). Após normalização, a média da dimensão foi 0,26. Em contraste, a LLM regional exibiu legibilidade moderada ($C1 \approx 55$), mas completude elevada ($C2 \approx 85\%$), alta rastreabilidade normativa ($C3 \approx 2,9$), maior densidade instrucional ($C4 \approx 3,1$) e territorialização consistente ($C5 \approx 2,6$), resultando em média normalizada 0,84. O padrão observado evidencia um trade-off: perde-se simplicidade textual, mas ganham-se completude, precisão normativa e aplicabilidade territorial.

Na Dimensão 2, a LLM não regional manteve baixa visibilidade socioterritorial: menção nominal rara ($C6 \approx 0,2$), reconhecimento socioeconômico apenas implícito ($C7 \approx 0,9$), ausência de vinculação normativa específica ($C8 \approx 0$) e linguagem predominantemente neutra ($C9 \approx 1$). A média normalizada foi 0,29. Já a LLM regional apresentou menção nominal recorrente ($C6 \approx 0,95$), reconhecimento socioeconômico explícito ($C7 \approx 1,9$), vinculação normativa específica ($C8 \approx 1,85$) e linguagem inclusiva estruturada ($C9 \approx 1,8$), com média normalizada 0,93. Este é o maior ganho relativo do estudo, indicando que a regionalização altera o output não apenas em “conteúdo”, mas em reconhecimento institucional e semântico dos atores.

Na Dimensão 3, a LLM não regional apresentou coerência moderada ($C10 \approx 2,5$), estruturação informacional limitada ($C11 \approx 1,8$) e respostas curtas ($C12 \approx 70$ palavras), com média normalizada 0,56. A LLM regional mostrou coerência elevada ($C10 \approx 2,9$), melhor organização textual e normativa ($C11 \approx 2,7$) e maior extensão/densidade ($C12 \approx 135$ palavras), atingindo média normalizada 0,93. A diferença decorre, sobretudo, de fundamentação explícita e estrutura argumentativa mais estável, e não apenas de aumento de tamanho.

A síntese ponderada confirma a assimetria geral: a LLM não regional obteve índice global 0,32, enquanto a LLM regional alcançou 0,89. As médias por dimensão foram: D1 (0,26 → 0,84), D2 (0,29 → 0,93) e D3 (0,56 → 0,93). A única regressão sistemática ocorreu em legibilidade (C1), associada ao aumento de tecnicidade jurídico-normativa. Em termos analíticos, o resultado central é direto: a regionalização reconfigura a mediação informacional, reduzindo déficit territorial, ampliando visibilidade socioterritorial e elevando robustez e qualidade comunicacional, com custo localizado de simplificação textual (Quadro 5).

Quadro 5 – Síntese ponderada

Dimensão	LLM Não Regional	LLM Regional
D1 – Déficit Informacional Territorial	0,26	0,84
D2 – Visibilidade Socioterritorial	0,29	0,93
D3 – Robustez Comunicacional	0,56	0,93
Índice Global	0,32	0,89

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Sob perspectiva sistêmica, os resultados da Etapa 1 dialogam diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A redução do déficit informacional territorial (Dimensão 1) fortalece o componente relativo ao ODS 11, ao ampliar o acesso qualificado à norma urbana e à orientação territorialmente aplicável. A elevação da precisão instrucional e da aderência normativa contribui para o ODS 12, ao melhorar a clareza operacional sobre separação, destinação e responsabilidades no ciclo dos resíduos. Já o incremento expressivo da visibilidade socioterritorial (Dimensão 2) incide transversalmente sobre o ODS 10, ao formalizar discursivamente cooperativas e coletores como atores institucionais do sistema. Assim, a matriz

analítica não apenas mede desempenho informacional, mas evidencia impactos distributivos no acesso à informação e no reconhecimento territorial.

No que se refere especificamente à aderência normativa (C3), classificada em três níveis conforme rastreabilidade ao *corpus* oficial, a LLM generalista foi predominantemente enquadrada como inadequada, dada a ausência de indicação de dispositivos legais específicos. A LLM regional foi majoritariamente classificada como adequada, com menção explícita a artigos, decretos e planos municipais, permitindo verificação direta no *corpus* delimitado. Essa distinção confirma que a diferença observada não decorre apenas de maior extensão textual, mas de efetiva rastreabilidade normativa.

4.2 Demonstração da arquitetura integrada

A etapa 2 consistiu na modelagem exploratória de fluxo lógico-operacional integrando visão computacional semântica e modelo de linguagem regional, com finalidade ilustrativa e demonstrativa. Solicitou-se ao modelo de linguagem (LLM) regional a geração de uma imagem representativa de descarte irregular em calçada de via pública (Figura 1).

Figura 1 – Imagem representativa de descarte irregular de resíduos recicláveis secos em calçada de via pública



Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio de inteligência artificial generativa ChatGPT (2026).

No fluxo conceitual proposto, tal imagem corresponderia a um quadro capturado por câmera integrada ao sistema Smart Sampa. Trata-se, portanto, de simulação visual compatível com infraestrutura urbana de monitoramento já existente, não de registro empírico *in loco*.

A etapa subsequente consiste na aplicação de outras técnicas de visão computacional. Primeiramente, realiza-se a segmentação de instância, com a identificação individualizada de objetos presentes na cena. Em seguida, procede-se à estimativa volumétrica. Aqui, ambos os procedimentos possuem caráter demonstrativo, visando explicitar a plausibilidade operacional da arquitetura proposta.

A Figura 2 sintetiza os dois processos. A segmentação foi ilustrada por meio do ambiente Segment Anything Web, enquanto a estimativa volumétrica foi simulada com apoio do modelo de linguagem regional no ChatGPT. Destaca-se que a LLM regional, no ChatGPT, também é capaz de realizar a segmentação de instâncias, porém, a atual versão (5.2) ainda não é tão precisa.

Figura 2 – Segmentação de instância, Segment Anything Web (esq.); e estimativa volumétrica, ChatGPT (dir.)



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A arquitetura integrada modelada projeta, em plano operacional, os ganhos informacionais previamente mensurados. Ao associar detecção territorial automatizada, enquadramento normativo e eventual acionamento institucional, o sistema potencializa a efetividade territorial do ODS 11, ao estruturar respostas espacialmente precisas. Simultaneamente, ao qualificar a orientação sobre frações recicláveis e responsabilidades legais, reforça a governança da circularidade prevista no ODS 12. Por fim, ao incorporar cooperativas como destinatárias estruturadas do fluxo informacional, amplia sua visibilidade institucional, contribuindo para a dimensão inclusiva associada ao ODS 10. Desse modo, a integração entre visão computacional e modelo de linguagem regional desloca a inteligência artificial de instrumento técnico-logístico para infraestrutura informacional de política pública.

Em termos operacionais, a partir da segmentação de instância, ilustrada na Figura 2, identificaram-se, de forma simulada, categoria compatível com resíduos recicláveis secos comumente observados em descarte irregular: embalagens plásticas, papelão, sacarias mistas e objetos volumosos de composição predominantemente polimérica. A segmentação permitiu agrupar classe semântica, distinguindo frações potencialmente recicláveis do restante do contexto urbanístico. Também poderia distinguir rejeitos não enquadráveis na coleta seletiva convencional. Ainda que realizada em ambiente não integrado, a simulação demonstra que a camada de visão computacional é tecnicamente capaz de produzir dados estruturados.

A estimativa volumétrica indicou montante aproximado compatível com pequeno acúmulo episódico (ordem de grandeza inferior a 3 m³). Ainda que tenha desconsiderado o pequeno volume, localizado na parte superior direita da imagem, tal informação, quando integrada a metadados territoriais (logradouro, horário, recorrência histórica), adquire relevância jurídica e operacional. A volumetria estimada permite distinguir entre descarte eventual de baixa escala e deposições sistemáticas de maior impacto, subsidiando gradação de resposta institucional. Embora o experimento não tenha integrado GPS ou banco de dados municipal, a modelagem conceitual demonstra que a arquitetura proposta comporta tal incorporação sem complexidade estrutural elevada.

As saídas estruturadas da visão computacional – agrupamento de material, volume estimado e tipologia do evento – foram, então, convertidas em base textual, pelo próprio sistema LLM regional, e inserida junto ao *corpus* normativo delimitado. O modelo realizou enquadramento jurídico automatizado, identificando correspondência com dispositivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, do Decreto nº 10.936/2022 e do Plano Municipal vigente. A saída do sistema incluiu: (i) classificação preliminar do evento como descarte irregular em via pública; (ii) indicação de responsabilidade difusa do gerador; (iii) distinção entre frações

recicláveis passíveis de reaproveitamento e rejeitos; e (iv) sugestão de encaminhamento institucional às cooperativas territorialmente competentes.

Comparativamente, quando a mesma base textual foi submetida à configuração não regionalizada, o enquadramento produzido foi genérico, sem menção a dispositivos específicos do ordenamento municipal e sem referência a cooperativas atuantes no território paulistano. A diferença reproduz, em ambiente operacional simulado, o padrão observado na Etapa 1: a regionalização amplia a rastreabilidade normativa e a territorialização da resposta. Assim, a Etapa 2 não apenas ilustra um fluxo tecnológico, mas confirma a coerência sistêmica entre os achados da matriz analítica e a arquitetura integrada proposta.

Outro aspecto relevante se refere ao potencial de acionamento estruturado. No modelo conceitual, a ocorrência classificada poderia gerar notificação automática ao centro operacional da cooperativa com atuação na subprefeitura correspondente. O dado territorializado – tipologia e volume estimado – permite à cooperativa dimensionar equipe e logística de recolhimento, reduzindo deslocamentos improdutivos. Embora tal funcionalidade não tenha sido implementada empiricamente, sua modelagem evidencia viabilidade organizacional, especialmente se articulada a sistemas digitais já utilizados por cooperativas para registro de pesagem e triagem.

A arquitetura sistemática digital demonstra ainda potencial de retroalimentação informacional. A consolidação de registros georreferenciados de descarte irregular possibilita identificar padrões espaciais recorrentes, subsidiando campanhas comunicacionais direcionadas e eventual reavaliação da localização de Pontos de Entrega Voluntária. Esse aspecto se conecta diretamente ao núcleo do déficit informacional territorial: a informação deixa de ser apenas normativa e passa a ser territorialmente situada, produzindo inteligência pública baseada em evidência empírica estruturada.

Importa destacar que, no fluxo demonstrado, não houve automatização de sanção. O modelo se limitou a enquadramento indicativo, preservando a mediação institucional humana para validação e decisão final. Essa escolha metodológica reforça o caráter de apoio à governança, e não de substituição decisória (Coeckelbergh, 2020). A inteligência artificial opera como infraestrutura de triagem informacional e interpretação normativa preliminar, reduzindo opacidade e ampliando rastreabilidade.

Em síntese parcial da Etapa 2, os resultados indicam consistência entre: (a) capacidade de detecção e estruturação de dados ambientais por visão computacional; (b) potencial de enquadramento jurídico territorialmente aderente por modelo de linguagem regional; e (c) possibilidade de integração operacional com cooperativas locais. A demonstração não valida desempenho algorítmico em ambiente real, mas confirma plausibilidade técnica e coerência metodológica da arquitetura integrada proposta, articulando os três núcleos analíticos definidos no estudo: redução do déficit informacional territorial, ampliação da visibilidade socioterritorial e enfrentamento estruturado do descarte irregular.

5 IMPLICAÇÕES TEÓRICAS

A pesquisa contribui para o deslocamento do debate sobre inteligência artificial aplicada à gestão urbana, superando a abordagem estritamente técnico-logística predominante na literatura de cidades inteligentes. Ao propor a inteligência artificial como infraestrutura comunicacional algorítmica, o estudo amplia o campo das cidades inteligentes para uma

perspectiva de *governança inteligente* orientada à justiça informacional.

A regionalização de modelos de linguagem emerge como mecanismo de alinhamento entre norma e território, sugerindo que a arquitetura algorítmica pode operar como mediadora de reconhecimento institucional e não apenas de eficiência operacional. A matriz desenvolvida oferece instrumento replicável para avaliação crítica de sistemas algorítmicos em políticas públicas urbanas, permitindo examinar impactos distributivos no acesso à informação e na visibilidade socioterritorial.

6 CONCLUSÃO

O estudo partiu da hipótese de que a problemática da coleta seletiva de resíduos domiciliares recicláveis secos em São Paulo não decorre da ausência de arcabouço normativo, mas da forma como esse arcabouço é mediado informacionalmente no território. A construção e aplicação de matriz analítica, orientada pela Design Science Research, permitiu validar teoricamente o diagnóstico de déficit informacional e invisibilização socioterritorial em evidência comparável. Desloca-se, assim, o foco do *déficit de lei* para o *déficit de tradução territorial da lei*, entendido como variável operacional capaz de produzir efeitos distributivos no acesso ao serviço e no reconhecimento institucional.

A Etapa 1 demonstrou que a arquitetura de mediação informacional influencia inteligibilidade normativa, densidade instrucional e reconhecimento institucional. O modelo regionalizado superou a configuração não regional nas três dimensões avaliadas: reduziu déficit informacional territorial, ampliou visibilidade socioterritorial e elevou robustez comunicacional, ainda que com menor legibilidade relativa em razão da maior precisão normativa. Ao reduzir assimetrias informacionais entre territórios e formalizar discursivamente atores periféricos como parte do sistema, a regionalização tende a atenuar o descarte irregular, assim como as desigualdades socioespaciais vinculadas ao acesso à informação pública e ao reconhecimento institucional (ODS 10).

A Etapa 2 confirmou a coerência sistêmica da proposta ao demonstrar a plausibilidade de integração entre visão computacional semântica e modelo de linguagem regional. A geração de dados estruturados (segmentação e volumetria) se mostrou compatível com enquadramento jurídico automatizado preliminar e resposta territorialmente aderente. A arquitetura sistêmica digital não atua diretamente sobre a geração de resíduos, pois não altera padrões de consumo; contudo, ao elevar inteligibilidade normativa, rastreabilidade e densidade instrucional, tende a produzir efeitos indiretos de aprendizagem e responsabilização, ao mesmo tempo em que atua diretamente sobre circulação e destinação, qualificando triagem, encaminhamento e resposta territorial.

Do ponto de vista teórico, o estudo desloca a inteligência artificial de instrumento técnico-operacional para infraestrutura comunicacional da política pública. Ao articular detecção ambiental, interpretação normativa e acionamento socioterritorial, propõe matriz metodológica replicável para avaliação crítica de sistemas algorítmicos, explicitando como a qualificação territorial da comunicação pode reduzir assimetrias sem depender exclusivamente de expansão física do serviço.

No plano normativo, a regionalização funciona como mecanismo de alinhamento entre dispositivos legais e prática comunicacional, com implicações para os ODS 11, 12 e 10 (esse último, transversalmente). Ao reduzir contaminação por mistura de frações, elevar aderência

operacional e acelerar o encaminhamento às cooperativas, a arquitetura tende a ampliar a taxa de recuperação hoje estimada em 3,5%, convertendo maior parcela do potencial reciclável em material efetivamente reinserido na cadeia produtiva. Com isso, fortalece a economia circular e reduz perdas associadas à degradação do resíduo no espaço público (ODS 12).

Sob perspectiva econômica, o principal custo estrutural – a rede de monitoramento – já está implementado via Smart Sampa, de modo que a proposta se apoia sobretudo em programação e integração de sistemas existentes, que tendem a ser menos dispendiosos financeiramente, em um sentido comparativo. Operacionalmente, a redução de deslocamentos improdutivos, a priorização de pontos recorrentes e a diminuição do tempo de permanência do resíduo em vias públicas tendem a reduzir a pressão sobre serviços de limpeza e remoção, mitigando esforço reativo e degradação ambiental localizada (ODS 11).

Reconhecem-se limitações: a arquitetura foi demonstrada em nível conceitual e simulativo, sem integração a dados reais ou mensuração de desempenho operacional. Avaliações empíricas futuras deverão examinar impacto territorial, métricas de resposta e implicações éticas relativas à governança de dados. A expansão de cobertura em áreas vulnerabilizadas, como favelas, por exemplo, permanece necessária para evitar que a governança digital reproduza desigualdades pré-existentes. Tal ampliação pode ser parcialmente subsidiada pelo incremento de recuperação de materiais e também opera como vetor de formalização socioterritorial.

A mediação informacional emerge, assim, como variável estrutural da governança urbana. Ao combinar detecção territorial, rastreabilidade e intervenção orientada por dados, a arquitetura proposta tende a reduzir a problemática aqui circulada, ainda que demande validação empírica futura, mas cuja coerência sistêmica foi demonstrada no presente estudo.

REFERÊNCIAS

BERNSTEIN, P. **Machine learning**: architecture in the age of artificial intelligence. London: RIBA Publishing, 2025.

BIRISOWO, A.; ABBAH, P.; SMART, E. E.; OLAWAPO, D. O.; AYUBA, W. A.; ABDUSALAM, R.; ALIYU, S. H. Generative AI and large language models: the key to creating intelligent, sustainable, and connected cities of the future. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 25, n. 3, p. 1730-1740, 2025. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.3.0892>. Acesso em: 18 fev. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 18 fev. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do §3º do art. 37 e no §2º do art. 216 da Constituição Federal; altera a Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 nov. 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12527.htm. Acesso em: 18 fev. 2026.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 13 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm. Acesso em: 18 fev. 2026.

COECKELBERGH, M. **AI ethics**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2020.

COSTA, W. G. de C.; NADAE, J. Aplicações de inteligência artificial em economia circular: dimensões éticas, sociais e de governança. **Anais: IEPG SUMMIT: Pensando o futuro com inteligência artificial e consciência social**.

Itajubá(MG) IEPG/UNIFEI, 2025. Disponível em:

<https://static.even3.com/anais/1369841.pdf?v=639073633345258187>. Acesso em: 18 fev. 2026.

CROSSLEY, S. A.; SKALICKY, S.; DASCALU, M. Moving beyond classic readability formulas: new methods and new models. **Journal of Research in Reading**, v. 42, n. 3-4, p. 541-561, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12283>. Acesso em: 18 fev. 2026.

DELESPOSTE, J. E.; RANGEL, L. A. D.; MEIRIÑO, M. J.; FERREIRA, C. M. dos S.; LOPES, R. J. F. S. B.; NARCIZO, R. B. Model for innovation project selection supported by multi-criteria methods considering sustainability parameters. **Systems**, v. 13, n. 10, p. 876, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13100876>. Acesso em: 18 fev. 2026.

DODMAN, D.; HAYWARD, B.; PELLING, M.; CASTAN BROTO, V.; CHOW, W.; CHU, E.; DAWSON, R.; KHIRFAN, L.; MCPHEARSON, T.; PRAKASH, A.; ZHENG, Y.; ZIERVOGEL, G. Cities, settlements and key infrastructure. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; M ÖLLER, V.; OKEM, A.; RAMA, B. (eds.). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 907–1040. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844.008>. Acesso em: 18 fev. 2026.

FLESCH, R. A new readability yardstick. **Journal of Applied Psychology**, v. 32, n. 3, p. 221–233, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1037/h0057532>. Acesso em: 18 fev. 2026.

GÓMEZ GIMÉNEZ, J. M. Desigualdad urbana: la segregación residencial en contextos metropolitanos sin ordenación territorial integrada. **Cuadernos de Investigación Urbanística**, [S. l.], n. 154, p. 1–95, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20868/ciur.2024.154.5266>. Acesso em: 18 fev. 2026.

GRACIAS, J. S.; PARNELL, G. S.; SPECKING, E.; POHL, E. A.; BUCHANAN, J. Smart Cities: a structured literature review. **Smart Cities**, v. 6, n. 4, p. 1719–1743, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities6040080>. Acesso em: 18 fev. 2026.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. Rio de Janeiro: GEN Atlas, 2021.

LEACH, N. **Architecture in the age of artificial intelligence: an introduction to AI for architects**. London: Bloomsbury Academic, 2025.

LI, C.; CHEN, M.; WANG, J.; SITARAM, S.; XIE, X. CultureLLM: incorporating cultural differences into large language models. **arXiv**, 2024. arXiv:2402.10946. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2402.10946>. Acesso em: 18 fev. 2026.

MARINO, B. São Paulo produz cerca de 20 mil toneladas de resíduos urbanos, mas reciclagem é muito baixa. **Jornal da USP no Ar**, São Paulo, 2 out. 2025. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/sao-paulo-produz-cerca-de-20-mil-toneladas-de-residuos-urbanos-mas-reciclagem-e-muito-baixa/>. Acesso em: 18 fev. 2026.

MEKKI, A. E.; ATOU, H.; NACAR, O.; SHEHATA, S.; ABDUL-MAGEED, M. NileChat: towards linguistically diverse and culturally aware LLMs for local communities. **arXiv**, 2025. arXiv:2505.18383. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2505.18383>. Acesso em: 18 fev. 2026.

MOHAMMED, S.A.; RALESCU, A.L. Insights into Image understanding: segmentation methods for object recognition and scene classification. **Algorithms**, v. 17, n. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/a17050189>. Acesso em: 18 fev. 2026.

NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS. Brasília, DF: **Nações Unidas no Brasil**, s.d.. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 18 fev. 2026.

NAIK, S.; SONY, M.; ANTONY, J.; MCDERMOTT, O.; TORTORELLA, G. L.; JAYARAMAN, R. Operational excellence framework for sustainability in the organisation: a design science approach. **Production Planning & Control**, v. 35, n. 11, p. 1215–1231, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2165188>. Acesso em: 18 fev. 2026.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. Urban development and cities. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/topics/policy-issues/urban-development-and-cities.html>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PANDEY, B.; BRELSFORD, C.; SETO, K. C. Rising infrastructure inequalities accompany urbanization and economic development. **Nature Communications**, v. 16, art. 1193, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56539-w>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **20 mil toneladas de lixo são geradas diariamente na cidade de São Paulo**. Prefeitura de São Paulo – Cuide da Cidade, São Paulo, 8 maio 2019. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/web/comunicacao/w/cuide_da_cidade/noticias/276060. Acesso em: 18 fev. 2026.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Coleta domiciliar comum**: saiba como funciona o processo de coleta domiciliar comum da capital. São Paulo, 10 jan. 2024. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/web/spregula/w/residuos_solidos/residuos_solidos/domiciliar/4636. Acesso em: 18 fev. 2026.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Condomínios residenciais passam a integrar sistema Smart Sampa**. São Paulo, 15 jul. 2025a. Disponível em: <https://prefeitura.sp.gov.br/w/condom%C3%AAnios-residenciais-passam-a-integrar-sistema-smart-sampa>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Coleta Domiciliar Seletiva**: Saiba como funciona o processo de Coleta Domiciliar Seletiva da capital. São Paulo, 17 out. 2025b. Disponível em: https://prefeitura.sp.gov.br/web/spregula/w/residuos_solidos/coleta_seletiva/4623. Acesso em: 18 fev. 2026.

SALIERNO, G.; LEONARDI, L.; CABRI, G. Generative AI and large language models in Industry 5.0: shaping smarter sustainable cities. **Encyclopedia**, v. 5, n. 1, p. 30, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010030>. Acesso em: 18 fev. 2026.

SANTOS, K. L.; BESEN, G. R.; JACOBI, P. R.; SANCHES, G. L. Resíduos sólidos urbanos na Macrometrópole Paulista: da sociedade de consumo aos desafios de gestão e governança. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. 1991–2007, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.5-002>. Acesso em: 18 fev. 2026.

SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de São Paulo – PMGIRS. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2014. Disponível em: <https://drive.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2026.