

INFRAESTRUTURAS URBANAS COGNITIVAS E SISTEMAS CIBERFÍSICOS: MODELAGEM PREDITIVA APLICADA À RESILIÊNCIA DE CIDADES TROPICAIS INTELIGENTES

**COGNITIVE URBAN INFRASTRUCTURES AND CYBER-PHYSICAL SYSTEMS:
PREDICTIVE MODELING APPLIED TO THE RESILIENCE OF INTELLIGENT
TROPICAL CITIES**

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 14/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/783443842](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/783443842)

Alan Santos de Oliveira¹

Jacicleide Maria de Oliveira²

Gabriela Gomes Arcanjo³

Fabíola de Pádua Melo Padilha⁴

Regis Alkmim Mota⁵

José Humberto Gomes de Oliveira⁶

Tatiana Elenice Cordeiro Soares⁷

Murillo Nazareno Cavalcante Aguiar⁸

RESUMO

As cidades tropicais enfrentam desafios crescentes relacionados à variabilidade climática, intensificação de eventos extremos, expansão urbana acelerada, impermeabilização do solo, ilhas de calor, desigualdades socioespaciais e pressão contínua sobre sistemas de infraestrutura. Em contextos urbanos marcados por chuvas intensas, drenagem insuficiente, ocupação de áreas vulneráveis e redes de mobilidade sobrecarregadas, torna-se necessário avançar para modelos de gestão capazes de antecipar riscos, responder em tempo real e adaptar dinamicamente estruturas e serviços urbanos. Este artigo propõe uma abordagem interdisciplinar baseada na convergência entre engenharia civil, sistemas ciberfísicos, inteligência analítica, gêmeos digitais urbanos, sensoriamento distribuído, Internet das Coisas, computação em borda, aprendizado de máquina e modelagem preditiva para o desenvolvimento de infraestruturas urbanas cognitivas aplicadas à resiliência de cidades tropicais inteligentes. A pesquisa adota abordagem qualitativa, exploratória, bibliográfica e propositiva, articulando literatura sobre cidades inteligentes, resiliência urbana, infraestrutura crítica, adaptação climática, drenagem urbana, mobilidade, sistemas ciberfísicos, governança de dados e planejamento urbano. O modelo proposto integra sensores inteligentes, dados hidrometeorológicos, redes de drenagem, estruturas urbanas, sistemas de mobilidade, bases geoespaciais, simulações computacionais e painéis decisórios para antecipar enchentes, falhas estruturais, congestionamentos, interrupções de serviços e impactos sobre populações vulneráveis. Os resultados indicam que a digitalização cognitiva da infraestrutura urbana pode ampliar eficiência operacional, reduzir vulnerabilidades, melhorar manutenção preditiva, apoiar resposta a eventos extremos e fortalecer a tomada de decisão baseada em evidências. Conclui-se

que cidades tropicais inteligentes precisam superar modelos reativos de gestão, incorporando infraestruturas ciberfísicas, adaptativas, inclusivas, seguras e climaticamente resilientes.

Palavras-chave: infraestrutura inteligente; sistemas ciberfísicos; modelagem preditiva; resiliência urbana; cidades tropicais; gêmeos digitais urbanos; drenagem inteligente; inteligência analítica.

ABSTRACT

Tropical cities face growing challenges related to climate variability, intensification of extreme events, accelerated urban expansion, soil sealing, urban heat islands, socio-spatial inequalities, and continuous pressure on infrastructure systems. In urban contexts marked by intense rainfall, insufficient drainage, occupation of vulnerable areas, and overloaded mobility networks, it becomes necessary to move toward management models capable of anticipating risks, responding in real time, and dynamically adapting urban structures and services. This article proposes an interdisciplinary approach based on the convergence of civil engineering, cyber-physical systems, analytical intelligence, urban digital twins, distributed sensing, the Internet of Things, edge computing, machine learning, and predictive modeling for the development of cognitive urban infrastructures applied to the resilience of intelligent tropical cities. The research adopts a qualitative, exploratory, bibliographic, and propositional approach, articulating literature on smart cities, urban resilience, critical infrastructure, climate adaptation, urban drainage, mobility, cyber-physical systems, data governance, and urban planning. The proposed model integrates intelligent sensors, hydrometeorological data, drainage networks, urban structures, mobility systems, geospatial databases, computational simulations, and decision dashboards to anticipate floods, structural failures, congestion,

service interruptions, and impacts on vulnerable populations. The results indicate that the cognitive digitalization of urban infrastructure can improve operational efficiency, reduce vulnerabilities, enhance predictive maintenance, support response to extreme events, and strengthen evidence-based decision-making. The article concludes that intelligent tropical cities must overcome reactive management models by incorporating cyber-physical, adaptive, inclusive, secure, and climate-resilient infrastructures.

Keywords: smart infrastructure; cyber-physical systems; predictive modeling; urban resilience; tropical cities; urban digital twins; smart drainage; analytical intelligence.

1. INTRODUÇÃO

As cidades tropicais estão na linha de frente dos desafios urbanos do século XXI. Localizadas em regiões marcadas por temperaturas elevadas, regimes pluviométricos intensos, elevada umidade, rios urbanos, várzeas, encostas, solos frágeis, expansão periférica acelerada e desigualdades socioespaciais, essas cidades enfrentam riscos crescentes associados a enchentes, alagamentos, deslizamentos, ilhas de calor, degradação de infraestrutura, interrupção de serviços essenciais e impactos desproporcionais sobre populações vulneráveis (IPCC, 2022; UN-HABITAT, 2022; UNDRR, 2015).

A urbanização tropical ocorre frequentemente em ritmo superior à capacidade institucional de planejamento, implantação e manutenção da infraestrutura. Redes de drenagem insuficientes, pavimentação impermeável, ocupação de áreas de risco, supressão de vegetação, canalização inadequada de cursos d'água e

fragmentação da gestão pública ampliam a exposição urbana a eventos extremos (GILES-CORTI et al., 2016; SATTERTHWAITTE et al., 2020; IPCC, 2022).

A crise climática intensifica esse quadro ao modificar padrões de precipitação, aumentar frequência e severidade de ondas de calor, elevar riscos de inundações costeiras e fluviais e pressionar sistemas de água, energia, transporte, saúde e habitação. O IPCC destaca que cidades e infraestruturas críticas são sistemas vulneráveis a impactos climáticos, especialmente quando combinam crescimento urbano rápido, desigualdade, governança limitada e infraestrutura deficiente (IPCC, 2022; DODMAN et al., 2022).

Nesse contexto, a resiliência urbana tornou-se conceito central para o planejamento contemporâneo. A resiliência refere-se à capacidade de uma cidade antecipar, resistir, absorver, responder, recuperar-se e transformar-se diante de choques e estresses, mantendo funções essenciais e protegendo populações (UNDRR, 2015; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016). Em cidades tropicais, essa resiliência depende da integração entre infraestrutura física, sistemas naturais, tecnologia, governança, justiça social e inteligência operacional (AERNES; RIBEIRO; GONÇALVES, 2021; IPCC, 2022).

A infraestrutura urbana tradicional foi concebida, em grande parte, como sistema físico relativamente estático. Pontes, vias, galerias pluviais, canais, estações de bombeamento, redes de energia, reservatórios e sistemas viários foram projetados com base em parâmetros históricos, margens de segurança e manutenção periódica. Contudo, a variabilidade climática, a expansão urbana e a complexidade das interdependências urbanas exigem

infraestruturas capazes de aprender, monitorar, prever e adaptar-se dinamicamente (HOLLING, 1973; FOLKE, 2006; AYYUB, 2014).

O conceito de infraestrutura urbana cognitiva emerge justamente dessa necessidade. Trata-se de uma infraestrutura física-digital capaz de perceber condições ambientais e operacionais, processar dados, reconhecer padrões, antecipar riscos, apoiar decisões, acionar respostas automáticas ou semiautomáticas e aprender com eventos anteriores. Essa concepção dialoga com sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas, inteligência artificial, gêmeos digitais, computação em borda, ciência de dados e engenharia de resiliência (LEE; SESHIA, 2017; RAJKUMAR et al., 2010; TAO et al., 2019).

Os sistemas ciberfísicos constituem arranjos nos quais componentes computacionais, sensores, atuadores, redes de comunicação, modelos analíticos e processos físicos interagem de forma integrada. Em cidades inteligentes, tais sistemas permitem monitorar níveis de rios, vazão de drenagem, deformações estruturais, fluxo de veículos, temperatura urbana, qualidade do ar, consumo energético e funcionamento de equipamentos públicos (NIST, 2017; GUBBI et al., 2013; AL-FUQAHA et al., 2015).

A modelagem preditiva amplia esse potencial ao transformar dados em capacidade antecipatória. Modelos estatísticos, aprendizado de máquina, redes neurais recorrentes, modelos hidrológicos, simulações baseadas em agentes, modelos de tráfego, análise geoespacial e gêmeos digitais urbanos podem prever alagamentos, congestionamentos, falhas estruturais, ilhas de calor, demanda por serviços emergenciais e interrupções sistêmicas (KITCHIN, 2014; BATTY, 2018; ZHU et al., 2025).

Diante disso, este artigo parte do seguinte problema de pesquisa: **como modelar infraestruturas urbanas cognitivas baseadas em sistemas ciberfísicos e análise preditiva para ampliar a resiliência de cidades tropicais inteligentes diante de riscos climáticos, estruturais e operacionais?**

O objetivo geral é propor uma abordagem integrada para o desenvolvimento de infraestruturas urbanas cognitivas aplicadas à resiliência de cidades tropicais inteligentes. Como objetivos específicos, busca-se: discutir os fundamentos de sistemas ciberfísicos urbanos; analisar a contribuição da modelagem preditiva para infraestrutura crítica; propor arquitetura integrada de sensores, dados, modelos e decisão; examinar aplicações em drenagem, estruturas urbanas e mobilidade; e refletir sobre governança, ética, segurança e inclusão social em cidades digitalizadas (BATTY, 2013; KITCHIN, 2014; UNDRR, 2015).

Defende-se como tese central que cidades tropicais inteligentes não devem ser compreendidas apenas como cidades tecnologicamente conectadas, mas como sistemas urbanos adaptativos, capazes de integrar infraestrutura física, inteligência computacional, governança pública, participação social e justiça climática para antecipar riscos e proteger vidas, serviços e territórios (MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016; IPCC, 2022; ISO, 2019).

2. METODOLOGIA

Este estudo adota abordagem qualitativa, exploratória, bibliográfica e propositiva. A escolha por esse delineamento justifica-se pela natureza interdisciplinar do tema, que envolve engenharia civil, planejamento urbano, ciência de dados, sistemas ciberfísicos,

inteligência artificial, climatologia urbana, resiliência, governança pública e infraestrutura crítica (CRESWELL, 2014; YIN, 2016).

A pesquisa foi estruturada como revisão narrativa integrativa com proposição de modelo conceitual. A revisão narrativa integrativa é adequada para temas emergentes e transversais, nos quais a literatura encontra-se distribuída em diferentes campos disciplinares, como cidades inteligentes, infraestrutura resiliente, modelagem hidrológica, gêmeos digitais urbanos e sistemas ciberfísicos (TORRACO, 2005; WHITTEMORE; KNAFL, 2005).

A pergunta norteadora foi: **quais componentes técnicos, organizacionais e analíticos devem compor uma arquitetura de infraestrutura urbana cognitiva para apoiar a resiliência de cidades tropicais inteligentes por meio de sistemas ciberfísicos e modelagem preditiva?**

Foram considerados como eixos de análise: cidades tropicais; resiliência urbana; infraestrutura crítica; sistemas ciberfísicos; Internet das Coisas; sensores inteligentes; gêmeos digitais urbanos; modelagem preditiva; drenagem urbana; mobilidade; manutenção estrutural; governança de dados; segurança cibernética; justiça climática; e adaptação baseada em evidências (UNDRR, 2015; IPCC, 2022; NIST, 2017).

A literatura examinada inclui autores clássicos e contemporâneos como Holling (1973), Folke (2006), Batty (2013, 2018), Kitchin (2014), Townsend (2013), Caragliu, Del Bo e Nijkamp (2011), Hollands (2008), Lee e Seshia (2017), Rajkumar et al. (2010), Gubbi et al. (2013), Tao et al. (2019), Grieves (2014), Boje et al. (2020), Meerow, Newell e Stults

(2016), Ayyub (2014), Sallis et al. (2016), Giles-Corti et al. (2016), além de documentos do IPCC, UNDRR, ISO, NIST, ITU e ONU-Habitat.

A análise foi organizada em quatro etapas metodológicas. A primeira etapa consistiu na delimitação conceitual de infraestrutura urbana cognitiva, diferenciando-a de infraestrutura inteligente, cidade inteligente, infraestrutura crítica e gêmeo digital urbano (BATTY, 2018; TAO et al., 2019).

A segunda etapa envolveu a identificação dos principais riscos urbanos em cidades tropicais, com ênfase em enchentes, alagamentos, falhas de drenagem, degradação estrutural, congestionamentos, ilhas de calor e interrupções de serviços essenciais (IPCC, 2022; UN-HABITAT, 2022).

A terceira etapa consistiu na formulação de uma arquitetura integrada de sistemas ciberfísicos urbanos, composta por camada física, camada sensorial, camada de comunicação, camada de dados, camada analítica, camada de decisão, camada de atuação e camada de governança (LEE; SESHIA, 2017; NIST, 2017; AL-FUQAHA et al., 2015).

A quarta etapa propôs um modelo aplicado de resiliência preditiva para cidades tropicais inteligentes, denominado **MICRUT-CPS — Modelo Integrado de Cognição e Resiliência Urbana Tropical baseado em Sistemas Ciberfísicos**. O modelo articula sensoriamento, análise em tempo real, simulação de cenários, gêmeos digitais, indicadores de resiliência e protocolos de resposta (MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016; ISO, 2019).

Por se tratar de estudo propositivo, não houve coleta empírica direta em campo. A proposta destina-se a orientar pesquisas aplicadas

futuras, projetos-piloto municipais, planejamento de infraestrutura, políticas urbanas e sistemas de apoio à decisão para cidades tropicais. A validade do modelo deverá ser testada posteriormente por estudos de caso, simulações computacionais, validação técnica, avaliação de usuários e análise de impacto operacional (YIN, 2016; BATTY, 2018).

3. CIDADES TROPICAIS, INFRAESTRUTURA CRÍTICA E VULNERABILIDADE CLIMÁTICA

As cidades tropicais possuem características ambientais e urbanísticas que tornam a gestão de infraestrutura particularmente complexa. Chuvas intensas, altas temperaturas, elevada umidade, solos sujeitos a saturação, cursos d'água urbanos, áreas de várzea, encostas ocupadas, crescimento informal e desigualdade socioespacial ampliam riscos de alagamentos, deslizamentos, degradação viária, contaminação hídrica e colapso de serviços urbanos (IPCC, 2022; SATTERTHWAITTE et al., 2020).

A infraestrutura crítica urbana compreende sistemas essenciais ao funcionamento da cidade, como drenagem, abastecimento de água, esgotamento sanitário, energia, transporte, telecomunicações, saúde, defesa civil, resíduos sólidos e edificações públicas. A falha de um desses sistemas pode produzir efeitos em cascata sobre outros, especialmente em contextos de eventos extremos (RINALDI; PEERENBOOM; KELLY, 2001; O'ROURKE, 2007).

Em cidades tropicais, a drenagem urbana representa uma das infraestruturas mais sensíveis. A combinação entre precipitação intensa, impermeabilização do solo, assoreamento de canais, lixo em galerias, ocupação de áreas inundáveis e manutenção insuficiente

cria condições recorrentes para alagamentos. A gestão tradicional, baseada apenas em obras físicas e ações emergenciais, tende a ser insuficiente diante de mudanças climáticas e crescimento urbano acelerado (TUCCI, 2008; IPCC, 2022).

A mobilidade urbana também é afetada por eventos climáticos. Chuvas intensas podem interromper vias, reduzir velocidade média, afetar transporte coletivo, dificultar acesso a hospitais, escolas e áreas de trabalho, além de comprometer rotas de evacuação. A resiliência da mobilidade depende de redundância de rede, informação em tempo real, planejamento de contingência e integração com sistemas meteorológicos e de defesa civil (GONZÁLEZ; HIDALGO; BARABÁSI, 2008; CATS; JENELIUS, 2014).

As estruturas urbanas, como pontes, viadutos, contenções, canais, galerias e edifícios públicos, também sofrem com ambientes tropicais. Umidade, corrosão, variações térmicas, sobrecarga, vibração, infiltração, falhas de manutenção e eventos extremos aceleram processos de degradação. A manutenção baseada apenas em inspeções periódicas pode não detectar rapidamente mudanças críticas em estruturas sensíveis (FARRAR; WORDEN, 2012; SOHN et al., 2004).

As ilhas de calor urbano agravam riscos à saúde, ao conforto térmico e à demanda energética. Em cidades tropicais, a substituição de vegetação por concreto e asfalto aumenta temperatura de superfície, reduz evapotranspiração, intensifica desconforto térmico e afeta populações vulneráveis, como idosos, crianças, trabalhadores ao ar livre e moradores de habitações precárias (OKE, 1982; SANTAMOURIS, 2015).

A vulnerabilidade urbana não é apenas física; é social. Populações de baixa renda frequentemente vivem em áreas mais expostas, com menor infraestrutura, menor acesso a serviços e menor capacidade de recuperação após desastres. Portanto, sistemas inteligentes de resiliência urbana precisam incorporar indicadores socioespaciais, e não apenas sensores físicos (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

A resiliência de cidades tropicais inteligentes deve, assim, combinar engenharia, tecnologia, governança e justiça climática. Uma cidade não é resiliente apenas porque possui sensores; ela é resiliente quando usa informação para proteger vidas, reduzir desigualdades, orientar investimentos e transformar estruturas de risco (UNDRR, 2015; IPCC, 2022).

4. INFRAESTRUTURAS URBANAS COGNITIVAS: CONCEITO E FUNDAMENTOS

O conceito de infraestrutura urbana cognitiva refere-se a sistemas urbanos físicos integrados a componentes digitais capazes de observar, interpretar, aprender, prever e responder a condições dinâmicas do ambiente. Diferentemente da infraestrutura convencional, que opera de forma passiva ou reativa, a infraestrutura cognitiva possui capacidade de retroalimentação informacional, análise em tempo real e adaptação operacional (LEE; SESHIA, 2017; TAO et al., 2019).

A noção de cognição, nesse contexto, não significa consciência humana, mas capacidade sistêmica de processar dados, reconhecer padrões, inferir tendências e apoiar decisões. Uma rede de drenagem cognitiva, por exemplo, pode monitorar níveis de água,

prever pontos de extravasamento, acionar comportas, enviar alertas, redirecionar tráfego e orientar equipes de manutenção antes que o alagamento se torne crítico (KITCHIN, 2014; RAHMAN, 2026).

A infraestrutura cognitiva possui cinco atributos principais. O primeiro é a sensibilidade, isto é, a capacidade de captar dados do ambiente por sensores, imagens, estações meteorológicas, dispositivos móveis e bases geoespaciais. O segundo é a conectividade, que permite transmitir dados por redes sem fio, fibra óptica, protocolos IoT e plataformas urbanas. O terceiro é a inteligência analítica, baseada em modelos preditivos, aprendizado de máquina e simulações. O quarto é a capacidade decisória, expressa em painéis, alertas, regras operacionais e sistemas de apoio à decisão. O quinto é a adaptabilidade, isto é, a possibilidade de acionar respostas físicas, institucionais ou comportamentais (NIST, 2017; GUBBI et al., 2013).

As infraestruturas cognitivas são fortemente relacionadas aos gêmeos digitais urbanos. Um gêmeo digital é uma representação virtual dinâmica de um sistema físico, alimentada por dados em tempo real e capaz de simular comportamentos, cenários e respostas. Em cidades, gêmeos digitais podem representar redes de drenagem, edifícios, mobilidade, energia, qualidade do ar, temperatura, uso do solo e riscos climáticos (GRIEVES, 2014; BATTY, 2018; ZHU et al., 2025).

A diferença entre uma cidade simplesmente monitorada e uma cidade cognitivamente modelada está no uso preditivo e adaptativo dos dados. Monitorar significa observar o presente; prever significa antecipar estados futuros; adaptar significa modificar decisões ou

operações com base nessas previsões. A infraestrutura cognitiva integra essas três funções (KITCHIN, 2014; TAO et al., 2019).

Nas cidades tropicais, a cognição urbana deve ser orientada por riscos específicos. Não basta importar modelos de cidades temperadas ou altamente formalizadas. É necessário considerar chuvas convectivas intensas, redes informais de ocupação, drenagem precária, canais assoreados, vulnerabilidade social, dados incompletos, baixa interoperabilidade institucional e limitações orçamentárias (SATTERTHWAITE et al., 2020; IPCC, 2022).

A infraestrutura cognitiva também deve ser compreendida como sistema sociotécnico. Sensores e algoritmos não operam no vazio. Eles dependem de instituições, equipes, manutenção, orçamento, confiança pública, governança de dados e protocolos de resposta. Uma previsão de enchente só produz resiliência se houver capacidade de ação, comunicação à população e coordenação entre órgãos (BIJKER; HUGHES; PINCH, 1987; KITCHIN, 2014).

Assim, o conceito de infraestrutura urbana cognitiva proposto neste artigo envolve a integração entre materialidade urbana, inteligência computacional, governança pública e participação social. Sua finalidade não é apenas eficiência técnica, mas proteção da vida urbana diante de riscos crescentes (UNDRR, 2015; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

5. SISTEMAS CIBERFÍSICOS E INTERNET DAS COISAS EM CIDADES INTELIGENTES

Sistemas ciberfísicos são sistemas nos quais processos computacionais e processos físicos interagem de forma contínua, por meio de sensores, atuadores, redes de comunicação e

algoritmos de controle. Em cidades inteligentes, esses sistemas conectam infraestrutura urbana a plataformas digitais, permitindo monitoramento, previsão e atuação em tempo real (RAJKUMAR et al., 2010; LEE; SESHIA, 2017).

A Internet das Coisas fornece a base operacional para muitos sistemas ciberfísicos urbanos. Sensores de nível, pluviômetros automáticos, câmeras, medidores de vazão, acelerômetros estruturais, sensores de deformação, dispositivos GPS, semáforos inteligentes, estações ambientais e medidores de energia podem coletar dados continuamente. Esses dados alimentam plataformas analíticas que transformam sinais dispersos em informação operacional (GUBBI et al., 2013; AL-FUQAHA et al., 2015).

Em drenagem urbana, sensores podem monitorar precipitação, nível de canais, velocidade de escoamento, obstrução de galerias, saturação de bacias de retenção e risco de extravasamento. Com modelos preditivos, o sistema pode antecipar pontos críticos e orientar ações de limpeza, bombeamento, alerta comunitário e bloqueio viário preventivo (TUCCI, 2008; RAHMAN, 2026).

Em estruturas urbanas, sensores podem monitorar vibração, deslocamento, fissuras, corrosão, umidade, temperatura e fadiga. A partir desses dados, modelos de manutenção preditiva podem identificar degradação antes de falhas críticas. Esse campo é conhecido como monitoramento de saúde estrutural, sendo amplamente discutido na engenharia civil contemporânea (SOHN et al., 2004; FARRAR; WORDEN, 2012).

Na mobilidade, sistemas ciberfísicos podem integrar dados de semáforos, ônibus, aplicativos, câmeras, sensores viários, incidentes

e condições meteorológicas. Modelos preditivos podem antecipar congestionamentos, estimar tempo de viagem, redirecionar fluxo e priorizar rotas de emergência durante eventos extremos (GONZÁLEZ; HIDALGO; BARABÁSI, 2008; CATS; JENELIUS, 2014).

A arquitetura ciberfísica exige interoperabilidade. Sistemas municipais frequentemente operam de forma fragmentada: drenagem em uma secretaria, trânsito em outra, defesa civil em outra, saneamento em concessionária, energia em empresa privada e dados sociais em cadastros separados. A cidade cognitiva exige integração semântica e técnica, com padrões de dados, APIs, protocolos e governança compartilhada (NIST, 2017; ISO, 2019).

Outro elemento essencial é a computação em borda. Em eventos críticos, como enchentes rápidas, não é suficiente enviar todos os dados para nuvem distante e aguardar processamento central. Dispositivos locais podem processar dados próximos à fonte, reduzir latência e manter operação mesmo com falhas de comunicação. Essa lógica é relevante para cidades tropicais com conectividade instável em áreas periféricas (SHI et al., 2016; SATYANARAYANAN, 2017).

A segurança cibernética é condição de funcionamento. Quanto mais a cidade depende de sensores, redes e sistemas automáticos, maior o risco de ataques, falhas, manipulação de dados e interrupção de serviços. Infraestruturas ciberfísicas urbanas devem incorporar segurança desde o projeto, com autenticação, redundância, criptografia, auditoria e planos de contingência (NIST, 2018; DEMERTZI; DEMERTZIS; DEMERTZIS, 2022).

Portanto, sistemas ciberfísicos são a base técnica da infraestrutura urbana cognitiva, mas seu valor depende da integração com planejamento urbano, engenharia, governança, ética, segurança e participação social (LEE; SESHIA, 2017; KITCHIN, 2014).

6. MODELAGEM PREDITIVA APLICADA À RESILIÊNCIA URBANA

A modelagem preditiva consiste no uso de dados históricos, dados em tempo real, modelos matemáticos, algoritmos estatísticos e inteligência artificial para estimar estados futuros de um sistema. Em cidades tropicais inteligentes, essa modelagem pode antecipar alagamentos, falhas estruturais, congestionamentos, demanda por abrigos, interrupções de energia, ilhas de calor e vulnerabilidades socioespaciais (BATTY, 2018; ZHU et al., 2025).

Modelos preditivos podem ser classificados em três grandes grupos. O primeiro grupo inclui modelos físicos, baseados em equações hidrológicas, hidráulicas, estruturais ou térmicas. O segundo grupo inclui modelos orientados por dados, como regressões, árvores de decisão, redes neurais, random forests, gradient boosting e modelos de séries temporais. O terceiro grupo inclui modelos híbridos, que combinam conhecimento físico e aprendizado de máquina (BOX et al., 2015; GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

Em drenagem urbana, modelos hidrológicos e hidráulicos simulam transformação chuva-vazão, escoamento superficial, capacidade de galerias, tempo de concentração e extravasamento. Quando integrados a sensores e previsões meteorológicas, podem gerar alertas antecipados para bacias urbanas críticas. Em cidades tropicais, modelos precisam lidar com chuvas intensas de curta

duração, microbacias impermeabilizadas e obstruções frequentes (TUCCI, 2008; CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

Em mobilidade, modelos preditivos podem estimar padrões de fluxo, velocidade, congestionamento, demanda por transporte coletivo e impacto de bloqueios. A integração com dados climáticos permite prever como chuvas intensas afetam deslocamentos e acessibilidade. Essa informação é crítica para rotas de ambulâncias, evacuação e transporte público (CATS; JENELIUS, 2014; ZHENG; CAPRA; WOLFSON, 2014).

Em manutenção estrutural, modelos de séries temporais e aprendizado de máquina podem detectar anomalias em pontes, viadutos, contenções e edifícios monitorados. A lógica preditiva substitui parte da manutenção reativa por manutenção baseada em condição, reduzindo risco de falha e otimizando recursos públicos (FARRAR; WORDEN, 2012; SOHN et al., 2004).

Em ilhas de calor, modelos geoespaciais e climáticos urbanos podem prever áreas críticas com base em cobertura vegetal, materiais de superfície, densidade construída, ventilação, sombra, tráfego e dados meteorológicos. Essa modelagem apoia decisões sobre arborização, telhados verdes, pavimentos frios, corredores de ventilação e proteção de populações vulneráveis (OKE, 1982; SANTAMOURIS, 2015).

A qualidade da modelagem preditiva depende da qualidade dos dados. Dados ausentes, sensores mal calibrados, séries históricas curtas, informalidade urbana, mudanças rápidas no uso do solo e falta de padronização podem comprometer previsões. Por isso, cidades tropicais precisam combinar dados instrumentais, dados

comunitários, imagens de satélite, vistorias técnicas e conhecimento local (KITCHIN, 2014; GOODCHILD, 2007).

A incerteza deve ser explicitada. Modelos preditivos não fornecem certeza absoluta; produzem estimativas probabilísticas. Um sistema responsável deve comunicar margens de erro, cenários alternativos, níveis de confiança e condições de validade. A opacidade algorítmica pode gerar decisões injustas ou equivocadas (O'NEIL, 2016; RUDIN, 2019).

A modelagem preditiva aplicada à resiliência urbana deve ser orientada por decisão. Não basta prever um alagamento se a cidade não possui plano de resposta. A previsão deve acionar protocolos: limpeza preventiva, alertas, fechamento de vias, abertura de abrigos, envio de equipes, comunicação comunitária, redirecionamento de transporte e proteção de equipamentos críticos (UNDRR, 2015; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

Assim, a modelagem preditiva transforma a infraestrutura urbana de reativa para antecipatória. Essa transformação é indispensável para cidades tropicais submetidas a riscos climáticos crescentes (IPCC, 2022; RAHMAN, 2026).

7. GÊMEOS DIGITAIS URBANOS COMO PLATAFORMA DE INTEGRAÇÃO

Os gêmeos digitais urbanos constituem plataformas virtuais dinâmicas que representam sistemas urbanos físicos, integrando dados em tempo real, simulações, modelos preditivos e visualização espacial. Em vez de analisar infraestrutura de forma isolada, o gêmeo digital permite visualizar interdependências entre drenagem, mobilidade, energia, edificações, uso do solo, clima

urbano e vulnerabilidade social (GRIEVES, 2014; BATTY, 2018; ZHU et al., 2025).

A principal contribuição dos gêmeos digitais é a capacidade de simular cenários. Gestores podem testar, virtualmente, o que aconteceria se uma chuva extrema atingisse determinada bacia, se uma avenida fosse bloqueada, se uma estação de bombeamento falhasse, se uma ponte fosse interditada ou se áreas verdes fossem ampliadas. Essa lógica de “e se?” fortalece planejamento e resposta (BATTY, 2018; TAO et al., 2019).

Em cidades tropicais, o gêmeo digital pode integrar modelos hidrológicos, mapas de risco, dados de pluviometria, sensores de nível, rede viária, cadastro de drenagem, edificações críticas, hospitais, escolas, abrigos, áreas vulneráveis e rotas de emergência. Isso permite identificar não apenas onde haverá água, mas quem será afetado, que vias ficarão inacessíveis e quais serviços serão interrompidos (IPCC, 2022; ZHU et al., 2025).

O gêmeo digital também pode apoiar manutenção. Pontes, galerias, contenções, pavimentos e sistemas de bombeamento podem ser representados com dados de idade, material, inspeções, sensores, histórico de falhas e risco. Com isso, a cidade pode priorizar investimentos com base em criticidade e probabilidade de falha (BOJE et al., 2020; FARRAR; WORDEN, 2012).

A integração entre BIM, GIS e IoT é especialmente relevante. O BIM representa informações detalhadas de ativos construídos; o GIS organiza dados geoespaciais; o IoT fornece dados em tempo real. A convergência desses sistemas permite passar de modelos estáticos

para modelos vivos da cidade (BOJE et al., 2020; SHAHARUDDIN et al., 2022).

No entanto, gêmeos digitais urbanos podem reproduzir desigualdades se forem construídos apenas com dados de áreas formais e centrais. Periferias, assentamentos informais, palafitas, ocupações ribeirinhas e áreas de risco frequentemente possuem dados incompletos. Uma cidade digital que não representa suas áreas vulneráveis produz invisibilidade técnica (KITCHIN, 2014; SHELTON; ZOOK; WIIG, 2015).

A governança do gêmeo digital deve ser pública, transparente e interoperável. Plataformas fechadas, dependentes de fornecedores únicos, podem gerar aprisionamento tecnológico e limitar autonomia municipal. A literatura recente defende modelos abertos, participativos e interoperáveis para evitar concentração de poder informacional (KITCHIN, 2014; HERZOG; DEGWITZ; VERMA, 2025).

A privacidade também é crítica. Gêmeos digitais podem integrar dados de mobilidade, câmeras, celulares, consumo e localização. Sem governança adequada, podem transformar resiliência em vigilância. O planejamento urbano inteligente deve respeitar proteção de dados, finalidade pública, minimização de coleta e controle democrático (ZUBOFF, 2019; KITCHIN, 2014).

Portanto, gêmeos digitais urbanos são ferramentas poderosas, mas não neutras. Sua contribuição para cidades tropicais inteligentes depende de inclusão territorial, transparência, interoperabilidade, segurança e compromisso com resiliência socialmente justa (BATTY, 2018; UNDRR, 2015).

8. DRENAGEM URBANA INTELIGENTE EM CIDADES TROPICAIS

A drenagem urbana é uma das aplicações mais urgentes das infraestruturas cognitivas em cidades tropicais. Chuvas intensas, impermeabilização acelerada, redes antigas, canais assoreados, ausência de manutenção, ocupação de várzeas e descarte irregular de resíduos tornam os alagamentos recorrentes e socialmente desiguais (TUCCI, 2008; IPCC, 2022).

A drenagem inteligente combina sensores, previsão meteorológica, modelos hidrológicos, modelagem hidráulica, dados geoespaciais, monitoramento comunitário e sistemas de alerta. Seu objetivo é antecipar pontos de extravasamento, orientar manutenção preventiva, informar a população e acionar respostas operacionais antes da crise (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; RAHMAN, 2026).

Sensores de nível instalados em canais, bueiros, reservatórios e pontos críticos podem indicar elevação rápida da água. Pluviômetros automáticos podem registrar chuvas em microescala. Câmeras e visão computacional podem identificar obstruções, lixo acumulado e extravasamento. Dados de radar meteorológico e satélite podem alimentar previsões de curto prazo (GUBBI et al., 2013; AL-FUQAHA et al., 2015).

A modelagem preditiva deve considerar que enchentes urbanas não dependem apenas da chuva. Dependem de uso do solo, capacidade da rede, lixo acumulado, maré em cidades costeiras, nível de rios, saturação do solo, manutenção, topografia e ocupação urbana. Um sistema eficiente precisa integrar múltiplas variáveis (TUCCI, 2008; RAHMAN, 2026).

Em cidades tropicais amazônicas, por exemplo, a relação entre chuva, rios, maré, canais urbanos e ocupação de baixadas exige

modelos adaptados ao contexto hidrológico local. A importação de modelos genéricos pode falhar se não incorporar sazonalidade, dinâmica fluvial, informalidade urbana e dados de campo (BECKER, 2005; IPCC, 2022).

A drenagem inteligente também deve integrar soluções baseadas na natureza. Jardins de chuva, parques alagáveis, bacias de retenção, recuperação de várzeas, pavimentos permeáveis, telhados verdes, reflorestamento urbano e renaturalização de cursos d'água podem reduzir pico de escoamento e ampliar resiliência. A tecnologia deve apoiar, e não substituir, soluções ecológicas (KABISCH et al., 2016; COHEN-SHACHAM et al., 2016).

Um sistema cognitivo de drenagem pode simular cenários: efeito da implantação de parque linear, impacto da limpeza de galerias, consequência de nova ocupação impermeável, benefício de reservatórios distribuídos e risco associado a chuvas extremas. Essa capacidade transforma drenagem de obra isolada em sistema adaptativo de gestão urbana (BATTY, 2018; RAHMAN, 2026).

A comunicação com a população é indispensável. Alertas por aplicativo, sirenes comunitárias, painéis urbanos, mensagens SMS, rádios locais e agentes comunitários podem reduzir danos. A previsão técnica só se converte em resiliência quando chega às pessoas em linguagem compreensível e tempo oportuno (UNDRR, 2015; CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Portanto, a drenagem urbana inteligente é uma das áreas mais promissoras para aplicação de sistemas ciberfísicos em cidades tropicais, desde que combine engenharia, dados, natureza, manutenção e justiça socioespacial (TUCCI, 2008; IPCC, 2022).

9. MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ESTRUTURAS URBANAS

A manutenção preditiva de estruturas urbanas constitui aplicação central das infraestruturas cognitivas. Pontes, viadutos, passarelas, contenções, galerias, túneis, edifícios públicos, reservatórios e pavimentos estão sujeitos a deterioração contínua. Em ambientes tropicais, umidade, corrosão, calor, chuvas intensas, infiltrações e sobrecargas aceleram processos de degradação (FARRAR; WORDEN, 2012; AYYUB, 2014).

O monitoramento de saúde estrutural utiliza sensores para identificar mudanças no comportamento de estruturas. Acelerômetros, extensômetros, sensores de deslocamento, sensores de corrosão, fibra óptica, inclinômetros, sensores de umidade e câmeras podem gerar dados contínuos sobre desempenho estrutural. Esses dados permitem detectar anomalias antes que se transformem em falhas críticas (SOHN et al., 2004; FARRAR; WORDEN, 2012).

A manutenção tradicional baseia-se em inspeções periódicas e correções após identificação visual de problemas. Esse modelo é limitado quando estruturas estão envelhecidas, recursos são escassos e eventos climáticos intensos podem acelerar danos entre inspeções. A manutenção preditiva permite priorizar intervenções com base em risco e condição real do ativo (FRANGOPOL; SAYDAM; KIM, 2012; AYYUB, 2014).

Modelos de aprendizado de máquina podem detectar padrões anômalos em séries temporais de vibração, deformação ou deslocamento. Quando integrados a dados de tráfego, chuva, temperatura e histórico de manutenção, esses modelos podem

estimar probabilidade de falha, vida útil remanescente e prioridade de intervenção (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016; FARRAR; WORDEN, 2012).

O gêmeo digital estrutural amplia essa capacidade. Uma ponte pode ter representação digital com geometria, materiais, idade, sensores, inspeções, cargas, fissuras, corrosão e simulações. Essa representação permite testar cenários de sobrecarga, enchente, erosão de fundação ou interdição parcial (BOJE et al., 2020; TAO et al., 2019).

Em cidades tropicais, estruturas próximas a rios e canais exigem atenção especial. Erosão de margens, solapamento, elevação de nível d'água, impacto de resíduos flutuantes e corrosão podem comprometer pontes e passagens. A integração entre monitoramento estrutural e monitoramento hidrológico é, portanto, necessária (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; FARRAR; WORDEN, 2012).

A manutenção preditiva também possui implicações orçamentárias. Municípios com recursos limitados precisam priorizar intervenções. Um sistema cognitivo pode classificar ativos por criticidade, vulnerabilidade, exposição e consequência de falha. Assim, recursos públicos são alocados com base em evidências, e não apenas em pressão política ou resposta emergencial (Ayyub, 2014; ISO, 2019).

A transparência é importante. Mapas públicos de condição da infraestrutura podem fortalecer controle social, desde que não exponham vulnerabilidades críticas a riscos de segurança. A governança da informação deve equilibrar transparência, segurança e responsabilidade institucional (KITCHIN, 2014; NIST, 2018).

Desse modo, a manutenção preditiva transforma a gestão de estruturas urbanas de reativa para preventiva e antecipatória, reduzindo riscos, custos e interrupções de serviços essenciais (SOHN et al., 2004; FARRAR; WORDEN, 2012).

10. MOBILIDADE INTELIGENTE E RESILIÊNCIA OPERACIONAL

A mobilidade urbana é um sistema crítico para a resiliência de cidades tropicais. Durante chuvas extremas, alagamentos, quedas de árvores, acidentes, falhas semafóricas ou interrupções de transporte, a cidade pode perder capacidade de deslocar pessoas, suprimentos e equipes de emergência. A resiliência urbana depende de redes de mobilidade capazes de operar sob estresse (CATS; JENELIUS, 2014; UNDRR, 2015).

Sistemas ciberfísicos de mobilidade integram sensores viários, GPS de ônibus, dados de aplicativos, câmeras, semáforos inteligentes, painéis de mensagem variável, centrais de controle e modelos de tráfego. Essa integração permite monitorar fluxo em tempo real, detectar incidentes, estimar congestionamentos e orientar rotas alternativas (GONZÁLEZ; HIDALGO; BARABÁSI, 2008; ZHENG; CAPRA; WOLFSON, 2014).

A mobilidade inteligente aplicada à resiliência não se limita a reduzir congestionamentos cotidianos. Ela precisa garantir acessibilidade a hospitais, escolas, abrigos, rotas de evacuação, áreas de risco e equipamentos essenciais durante eventos extremos. Portanto, modelos de mobilidade devem dialogar com modelos de drenagem, defesa civil e vulnerabilidade social (CATS; JENELIUS, 2014; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

Em uma cidade tropical inteligente, a previsão de alagamento em determinada via deve acionar automaticamente análise de rotas alternativas para ônibus, ambulâncias e transporte escolar. O sistema deve estimar impacto sobre tempo de viagem, sugerir bloqueios preventivos e informar usuários por canais acessíveis. Essa integração reduz imprevisto e melhora resposta pública (KITCHIN, 2014; BATTY, 2018).

A mobilidade ativa também deve ser considerada. Pedestres e ciclistas são fortemente afetados por calor, chuva, calçadas precárias e alagamentos. Cidades inteligentes não devem priorizar apenas veículos motorizados. A resiliência exige calçadas drenantes, sombreamento, travessias seguras, ciclovias conectadas e acessibilidade universal (GEHL, 2010; GILES-CORTI et al., 2016).

A análise preditiva pode identificar pontos de risco para pedestres durante chuvas, áreas com maior exposição térmica, rotas escolares inseguras e locais onde pessoas com deficiência enfrentam maior vulnerabilidade. Essa aplicação amplia a dimensão social da cidade inteligente (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; SALLIS et al., 2016).

A mobilidade inteligente também exige ética de dados. Dados de localização podem revelar rotinas pessoais, trabalho, saúde, religião e padrões de vida. A governança deve proteger privacidade, evitar vigilância indevida e garantir finalidade pública (ZUBOFF, 2019; KITCHIN, 2014).

Portanto, a resiliência operacional da mobilidade depende de integração ciberfísica, modelagem preditiva, equidade de acesso e governança democrática dos dados (CATS; JENELIUS, 2014; UNDRR, 2015).

11. MODELO MICRUT-CPS: ARQUITETURA PROPOSTA PARA CIDADES TROPICAIS INTELIGENTES

Este artigo propõe o **MICRUT-CPS — Modelo Integrado de Cognição e Resiliência Urbana Tropical baseado em Sistemas Ciberfísicos**. O modelo foi concebido para apoiar cidades tropicais na transição de uma gestão reativa para uma gestão preditiva, adaptativa e integrada da infraestrutura urbana (LEE; SESHIA, 2017; BATTY, 2018).

O MICRUT-CPS possui oito camadas interdependentes: camada físico-territorial, camada sensorial, camada de conectividade, camada de dados, camada analítica, camada de gêmeo digital, camada decisória-operacional e camada de governança socioambiental. Cada camada cumpre função específica, mas o valor do modelo está na integração sistêmica (NIST, 2017; TAO et al., 2019).

A camada físico-territorial compreende os ativos urbanos reais: drenagem, vias, pontes, edificações, canais, redes de energia, equipamentos públicos, áreas verdes, bacias hidrográficas, ocupações urbanas e populações expostas. Essa camada reconhece que a cidade inteligente começa pela materialidade do território, não pela tecnologia (HARVEY, 2012; GRAHAM; MARVIN, 2001).

A camada sensorial envolve sensores de chuva, nível d'água, vazão, qualidade da água, deformação estrutural, vibração, temperatura, umidade, tráfego, qualidade do ar e ocupação de equipamentos. Também pode incluir dados participativos enviados por cidadãos, agentes comunitários e equipes de campo (GOODCHILD, 2007; GUBBI et al., 2013).

A camada de conectividade integra redes móveis, LoRaWAN, fibra óptica, rádio, satélite, Wi-Fi público, redes de emergência e computação em borda. Em cidades tropicais com desigualdade digital, a conectividade deve ser redundante e adaptada à realidade territorial (SHI et al., 2016; SATYANARAYANAN, 2017).

A camada de dados organiza bases estruturadas e não estruturadas, incluindo séries temporais, mapas, imagens, cadastros urbanos, dados climáticos, dados sociais, registros de manutenção, ocorrências da defesa civil e históricos de eventos extremos. Essa camada exige padronização, qualidade, metadados e interoperabilidade (KITCHIN, 2014; ISO, 2019).

A camada analítica processa dados por modelos físicos, estatísticos, aprendizado de máquina, análise multicritério, simulações hidrológicas, modelos estruturais, modelos de tráfego e análise de vulnerabilidade. Seu objetivo é transformar dados em previsão, diagnóstico e recomendação (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016; BATTY, 2018).

A camada de gêmeo digital integra representação geoespacial, modelos de infraestrutura, dados em tempo real e simulações. Essa camada permite visualização, teste de cenários e avaliação de impactos cruzados entre sistemas urbanos (GRIEVES, 2014; BOJE et al., 2020; ZHU et al., 2025).

A camada decisória-operacional traduz análises em ações. Inclui painéis de comando, alertas, protocolos de resposta, priorização de manutenção, acionamento de equipes, comunicação à população, operação de comportas, bloqueios viários e abertura de abrigos (UNDRR, 2015; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

A camada de governança socioambiental garante que o sistema seja transparente, ético, seguro, inclusivo e alinhado ao interesse público. Inclui proteção de dados, auditoria algorítmica, participação social, integração intersetorial, indicadores de equidade, transparência e mecanismos de responsabilização (KITCHIN, 2014; O'NEIL, 2016; ISO, 2019).

O MICRUT-CPS opera em ciclos: observar, integrar, modelar, prever, decidir, agir, avaliar e aprender. Esse ciclo transforma infraestrutura em sistema adaptativo, permitindo que a cidade aprenda com eventos e melhore sua capacidade de resposta ao longo do tempo (HOLLING, 1973; FOLKE, 2006).

12. INDICADORES DE RESILIÊNCIA URBANA COGNITIVA

A implementação de infraestruturas cognitivas exige indicadores capazes de avaliar desempenho técnico, social e institucional. A ISO 37123 estabelece indicadores para cidades resilientes, enquanto o Marco de Sendai orienta metas de redução de risco e aumento de capacidade de resposta. Esses referenciais podem ser adaptados ao contexto das cidades tropicais inteligentes (ISO, 2019; UNDRR, 2015).

O primeiro grupo de indicadores é hidrometeorológico. Inclui intensidade de chuva, tempo de retorno, nível de rios, tempo de concentração, pontos de alagamento, capacidade de drenagem, tempo de resposta do sistema, número de alertas emitidos e precisão das previsões de enchente (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; TUCCI, 2008).

O segundo grupo é estrutural. Inclui condição de pontes, idade dos ativos, índice de deterioração, número de sensores operacionais,

anomalias detectadas, tempo médio para manutenção, criticidade do ativo e risco de falha (SOHN et al., 2004; FARRAR; WORDEN, 2012).

O terceiro grupo é operacional. Inclui tempo de resposta de equipes, rotas alternativas disponíveis, acessibilidade a hospitais, interrupções de transporte, tempo de recuperação, redundância de sistemas e continuidade de serviços essenciais (CATS; JENELIUS, 2014; AYYUB, 2014).

O quarto grupo é socioespacial. Inclui população exposta, domicílios em áreas de risco, vulnerabilidade social, acesso a alertas, capacidade de evacuação, localização de escolas, unidades de saúde, abrigos e equipamentos críticos em áreas vulneráveis (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

O quinto grupo é ambiental. Inclui cobertura vegetal, áreas permeáveis, temperatura de superfície, qualidade da água, áreas de retenção, parques alagáveis, soluções baseadas na natureza e conectividade ecológica urbana (OKE, 1982; KABISCH et al., 2016).

O sexto grupo é digital. Inclui cobertura sensorial, disponibilidade de dados, latência, interoperabilidade, falhas de comunicação, segurança cibernética, auditabilidade dos algoritmos e continuidade operacional dos sistemas (NIST, 2017; KITCHIN, 2014).

O sétimo grupo é institucional. Inclui integração entre secretarias, existência de protocolos, orçamento para manutenção, capacitação técnica, participação social, transparência e uso efetivo de previsões na tomada de decisão (UNDRR, 2015; ISO, 2019).

Esses indicadores devem ser organizados em painéis de resiliência cognitiva. O objetivo não é apenas monitorar, mas orientar prioridades. Uma cidade pode ter boa cobertura sensorial e baixa capacidade institucional; outra pode ter modelos avançados e pouca comunicação comunitária. O painel deve mostrar lacunas e orientar investimentos (BATTY, 2018; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

A avaliação deve ser periódica e pública, respeitando segurança e privacidade. A resiliência cognitiva não é estado final, mas processo de aprendizagem contínua (HOLLING, 1973; FOLKE, 2006).

13. GOVERNANÇA DE DADOS, SEGURANÇA CIBERNÉTICA E ÉTICA URBANA

A digitalização da infraestrutura urbana produz benefícios, mas também riscos. Sensores, câmeras, dados de mobilidade, modelos preditivos e gêmeos digitais ampliam capacidade de gestão, mas podem gerar vigilância, exclusão, discriminação algorítmica, dependência tecnológica, ataques cibernéticos e captura privada de dados públicos (KITCHIN, 2014; ZUBOFF, 2019).

A governança de dados deve estabelecer regras claras sobre coleta, finalidade, armazenamento, compartilhamento, segurança, anonimização, acesso, auditoria e descarte. Em cidades inteligentes, dados não devem ser tratados apenas como recurso técnico, mas como ativo público sensível (KITCHIN, 2014; NIST, 2018).

A segurança cibernética é particularmente crítica em sistemas ciberfísicos. Um ataque a semáforos, comportas, sensores de drenagem, rede elétrica ou sistemas de alerta pode produzir danos físicos reais. Portanto, a segurança deve ser incorporada desde o

projeto, e não adicionada posteriormente (NIST, 2018; DEMERTZI; DEMERTZIS; DEMERTZIS, 2022).

A redundância é princípio essencial. Sistemas urbanos não podem depender de único canal de comunicação, único fornecedor, único servidor ou única fonte de dados. Em eventos extremos, energia e internet podem falhar. O sistema deve ter alternativas locais, protocolos manuais e capacidade de operação degradada (AYYUB, 2014; UNDRR, 2015).

A auditabilidade algorítmica também é necessária. Modelos preditivos podem errar, enviesar prioridades ou invisibilizar populações. Se o algoritmo prioriza áreas com mais sensores, regiões periféricas podem receber menos atenção. Se os dados históricos refletem negligência, o modelo pode reproduzir desigualdade. Por isso, modelos devem ser avaliados quanto a justiça, explicabilidade e impacto social (O'NEIL, 2016; RUDIN, 2019).

A participação social fortalece legitimidade. Comunidades vulneráveis devem participar da definição de riscos, indicadores, formas de alerta e protocolos de resposta. Conhecimento local sobre pontos de alagamento, rotas informais, áreas de risco e populações com mobilidade reduzida pode melhorar o sistema (GOODCHILD, 2007; CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

A cidade inteligente deve evitar o solucionismo tecnológico. Morozov (2013) critica a crença de que problemas sociais complexos podem ser resolvidos apenas por tecnologia. No caso da resiliência urbana, sensores não substituem saneamento, moradia digna, drenagem adequada, planejamento territorial e justiça social (MOROZOV, 2013; HOLLANDS, 2008).

Portanto, a governança ética das infraestruturas cognitivas deve equilibrar inovação, segurança, privacidade, transparência, justiça e controle democrático. Sem isso, a cidade inteligente pode tornar-se cidade vigiada e desigual (KITCHIN, 2014; ZUBOFF, 2019).

14. RESULTADOS DA ANÁLISE

A análise realizada permite identificar oito resultados principais. O primeiro resultado é que cidades tropicais exigem modelos próprios de infraestrutura inteligente, pois seus riscos climáticos, hidrológicos, sociais e territoriais diferem de cidades temperadas e altamente formalizadas (IPCC, 2022; SATTERTHWAITTE et al., 2020).

O segundo resultado é que a infraestrutura urbana cognitiva deve ser entendida como sistema sociotécnico, e não apenas como conjunto de sensores. Sua efetividade depende de integração entre tecnologia, engenharia, governança, manutenção, financiamento e participação social (KITCHIN, 2014; BIJKER; HUGHES; PINCH, 1987).

O terceiro resultado é que sistemas ciberfísicos permitem monitorar e integrar infraestrutura física em tempo real, mas exigem interoperabilidade, segurança cibernética, redundância e capacidade institucional de resposta (LEE; SESHIA, 2017; NIST, 2017).

O quarto resultado é que a modelagem preditiva pode ampliar a resiliência urbana ao antecipar enchentes, falhas estruturais, congestionamentos, ilhas de calor e interrupções de serviços, desde que seus limites e incertezas sejam explicitados (BATTY, 2018; RUDIN, 2019).

O quinto resultado é que gêmeos digitais urbanos representam plataforma promissora para integração de dados, simulações e

decisão, mas devem evitar invisibilizar áreas periféricas e populações vulneráveis (GRIEVES, 2014; ZHU et al., 2025; SHELTON; ZOOK; WIIG, 2015).

O sexto resultado é que a drenagem urbana inteligente é uma das aplicações prioritárias para cidades tropicais, especialmente quando combinada com soluções baseadas na natureza, manutenção preventiva e comunicação comunitária (TUCCI, 2008; KABISCH et al., 2016).

O sétimo resultado é que a manutenção preditiva de estruturas urbanas pode reduzir riscos de colapso, otimizar recursos públicos e ampliar vida útil de ativos críticos, especialmente em ambientes tropicais agressivos (SOHN et al., 2004; FARRAR; WORDEN, 2012).

O oitavo resultado é que a resiliência urbana cognitiva exige indicadores integrados de desempenho físico, social, digital, ambiental e institucional, alinhados a referenciais como ISO 37123 e Marco de Sendai (ISO, 2019; UNDRR, 2015).

15. DISCUSSÃO

A discussão central deste artigo é que a construção de cidades tropicais inteligentes exige superar a visão estreita de cidade inteligente como simples digitalização de serviços urbanos. A inteligência urbana relevante para o século XXI deve ser medida pela capacidade de proteger vidas, reduzir vulnerabilidades, antecipar riscos, adaptar infraestruturas e promover justiça climática (HOLLANDS, 2008; KITCHIN, 2014; IPCC, 2022).

O primeiro ponto de discussão refere-se à transição da infraestrutura estática para a infraestrutura adaptativa. Sistemas urbanos

projetados apenas com base em séries históricas tornam-se insuficientes em um contexto de mudanças climáticas, crescimento acelerado e eventos extremos. A infraestrutura cognitiva introduz a lógica da aprendizagem contínua, na qual sensores, dados e modelos atualizam a compreensão do risco (HOLLING, 1973; FOLKE, 2006; TAO et al., 2019).

O segundo ponto é que a resiliência urbana não pode ser reduzida à eficiência operacional. Uma cidade pode otimizar semáforos e ainda manter populações pobres em áreas alagáveis. Pode instalar sensores em áreas centrais e ignorar periferias. Pode criar painéis sofisticados sem capacidade de resposta. Portanto, resiliência cognitiva deve incorporar equidade, vulnerabilidade social e governança territorial (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

O terceiro ponto é a centralidade da drenagem em cidades tropicais. Em muitas cidades brasileiras, amazônicas, caribenhas, africanas e asiáticas tropicais, alagamentos são eventos recorrentes que afetam mobilidade, saúde, trabalho, escola, comércio e segurança. A drenagem inteligente pode reduzir danos, mas não substitui saneamento, planejamento de uso do solo e recuperação de sistemas naturais (TUCCI, 2008; KABISCH et al., 2016; IPCC, 2022).

O quarto ponto é a importância dos gêmeos digitais. Eles podem transformar dados dispersos em representação integrada da cidade, permitindo simulações de cenários e decisões antecipatórias. Contudo, gêmeos digitais não são neutros. A representação da cidade depende dos dados disponíveis, dos interesses incorporados e das áreas mapeadas. Se a periferia não entra no modelo, ela

também não entra na decisão (BATTY, 2018; KITCHIN, 2014; ZHU et al., 2025).

O quinto ponto refere-se à confiabilidade dos modelos preditivos. Em sistemas críticos, erros podem custar vidas. Modelos devem ser validados, calibrados, auditados e combinados com conhecimento técnico e local. A inteligência artificial pode ampliar capacidade preditiva, mas decisões urbanas não devem ser delegadas cegamente a algoritmos (O'NEIL, 2016; RUDIN, 2019).

O sexto ponto é a necessidade de integração institucional. Dados de drenagem, trânsito, defesa civil, obras, assistência social, saúde e meio ambiente precisam dialogar. A cidade cognitiva exige governança intersetorial. Sem integração institucional, a tecnologia produz ilhas digitais desconectadas (UNDRR, 2015; ISO, 2019).

O sétimo ponto é a segurança cibernética. Infraestruturas urbanas ciberfísicas ampliam superfície de ataque. A proteção contra invasões, manipulação de dados e falhas sistêmicas deve ser considerada requisito de projeto. Cidades tropicais não podem importar soluções tecnológicas sem capacidade local de manutenção e segurança (NIST, 2018; DEMERTZI; DEMERTZIS; DEMERTZIS, 2022).

O oitavo ponto é a sustentabilidade financeira. Sensores precisam de manutenção, calibração, energia, conectividade e substituição. Plataformas exigem atualização e equipes capacitadas. Muitos projetos de cidade inteligente falham porque financiam implantação, mas não operação contínua. A resiliência cognitiva exige orçamento permanente (TOWNSEND, 2013; KITCHIN, 2014).

O nono ponto é a participação social. Moradores conhecem pontos de alagamento, rotas informais, áreas perigosas e falhas cotidianas da infraestrutura. Integrar dados comunitários à modelagem pode melhorar qualidade das previsões e fortalecer confiança pública. A inteligência urbana deve ser distribuída, e não apenas centralizada em salas de controle (GOODCHILD, 2007; SANDERS; STAPPERS, 2008).

O décimo ponto é que a cidade tropical inteligente deve ser também cidade ecológica. Infraestruturas cinzas, como canais e galerias, precisam dialogar com infraestruturas verdes e azuis, como parques, rios, manguezais, várzeas, jardins de chuva e arborização. A cognição urbana deve apoiar regeneração ecológica, e não apenas acelerar respostas mecânicas (COHEN-SHACHAM et al., 2016; KABISCH et al., 2016).

Assim, a digitalização da infraestrutura urbana representa estratégia promissora, mas apenas quando articulada a planejamento inclusivo, engenharia resiliente, governança democrática e adaptação climática. A cidade tropical inteligente não é aquela que apenas coleta dados; é aquela que transforma dados em cuidado territorial, prevenção e justiça urbana (UNDRR, 2015; IPCC, 2022).

16. DIRETRIZES PARA IMPLEMENTAÇÃO EM CIDADES TROPICAIS INTELIGENTES

A partir da análise realizada, propõem-se diretrizes para implementação de infraestruturas urbanas cognitivas em cidades tropicais inteligentes.

Primeiro, realizar diagnóstico integrado de riscos urbanos, incluindo drenagem, mobilidade, estruturas, energia, saúde, vulnerabilidade

social, ilhas de calor e áreas de expansão urbana (IPCC, 2022; ISO, 2019).

Segundo, iniciar por problemas críticos e mensuráveis, como alagamentos recorrentes, pontos de falha estrutural, rotas de emergência e áreas de calor extremo, evitando projetos genéricos de cidade inteligente sem objetivo público claro (KITCHIN, 2014; TOWNSEND, 2013).

Terceiro, implantar sensores de forma estratégica, priorizando bacias críticas, estruturas essenciais, vias vulneráveis, áreas periféricas e equipamentos públicos sensíveis (GUBBI et al., 2013; SOHN et al., 2004).

Quarto, integrar bases de dados municipais, concessionárias, defesa civil, meteorologia, saúde, assistência social, mobilidade e meio ambiente em plataforma interoperável (NIST, 2017; ISO, 2019).

Quinto, desenvolver modelos preditivos híbridos, combinando modelos físicos, aprendizado de máquina, conhecimento local e validação empírica (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016; RUDIN, 2019).

Sexto, construir gêmeos digitais urbanos de forma progressiva, começando por sistemas prioritários, como drenagem, mobilidade e ativos estruturais críticos (BATTY, 2018; BOJE et al., 2020).

Sétimo, incorporar indicadores de vulnerabilidade social e justiça climática, garantindo que a tecnologia priorize populações mais expostas e menos protegidas (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; MEEROW; NEWELL; STULTS, 2016).

Oitavo, combinar infraestrutura cinza com soluções baseadas na natureza, especialmente em drenagem, controle térmico e recuperação de áreas urbanas degradadas (KABISCH et al., 2016; COHEN-SHACHAM et al., 2016).

Nono, criar protocolos de resposta vinculados às previsões, definindo quem age, quando age, como comunica e quais recursos são mobilizados (UNDRR, 2015; AYYUB, 2014).

Décimo, garantir governança de dados, privacidade, segurança cibernética, transparência e auditabilidade dos modelos (NIST, 2018; O'NEIL, 2016).

Décimo primeiro, formar equipes técnicas municipais em ciência de dados, engenharia de resiliência, modelagem, manutenção de sensores e gestão de plataformas (KITCHIN, 2014; BATTY, 2018).

Décimo segundo, envolver comunidades locais no mapeamento de riscos, validação de alertas e avaliação do sistema, incorporando conhecimento territorial (GOODCHILD, 2007; SANDERS; STAPPERS, 2008).

Décimo terceiro, garantir sustentabilidade financeira, prevendo custos de manutenção, calibração, atualização, conectividade e suporte técnico (TOWNSEND, 2013; ISO, 2019).

Décimo quarto, avaliar resultados por indicadores de redução de danos, tempo de resposta, continuidade de serviços, redução de vulnerabilidades e satisfação social (UNDRR, 2015; ISO, 2019).

Décimo quinto, compreender tecnologia como meio para resiliência urbana, e não como fim em si mesma (HOLLANDS, 2008;

MOROZOV, 2013).

17. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cidades tropicais enfrentam desafios complexos decorrentes da convergência entre variabilidade climática, urbanização acelerada, desigualdade socioespacial, infraestrutura insuficiente e eventos extremos. Diante desse cenário, modelos tradicionais de gestão urbana, baseados em respostas reativas e planejamento fragmentado, mostram-se cada vez menos adequados. A resiliência urbana exige capacidade de antecipar, monitorar, adaptar e aprender (IPCC, 2022; UNDRR, 2015).

O artigo demonstrou que infraestruturas urbanas cognitivas, baseadas em sistemas ciberfísicos, sensoriamento inteligente, modelagem preditiva e gêmeos digitais urbanos, representam caminho promissor para ampliar a capacidade de resposta das cidades tropicais. Essas tecnologias permitem integrar dados de drenagem, mobilidade, estruturas, clima, território e vulnerabilidade social, transformando informação em decisão operacional (LEE; SESHIA, 2017; BATTY, 2018; ZHU et al., 2025).

A proposta do MICRUT-CPS oferece uma arquitetura conceitual organizada em camadas: físico-territorial, sensorial, conectividade, dados, análise, gêmeo digital, decisão operacional e governança socioambiental. Essa arquitetura permite compreender a cidade como sistema ciberfísico complexo, no qual infraestrutura, dados, algoritmos, instituições e populações interagem dinamicamente (NIST, 2017; TAO et al., 2019).

A aplicação prioritária em drenagem urbana inteligente mostra-se especialmente relevante para cidades tropicais, onde chuvas

intensas e alagamentos recorrentes produzem danos sociais, econômicos e sanitários. A integração entre sensores, modelos hidrológicos, previsão meteorológica, manutenção preventiva e comunicação comunitária pode reduzir riscos e melhorar resposta pública (TUCCI, 2008; RAHMAN, 2026).

A manutenção preditiva de estruturas urbanas também constitui campo estratégico, pois permite identificar anomalias, priorizar recursos e evitar falhas críticas em pontes, viadutos, contenções e edifícios públicos. Em ambientes tropicais, onde umidade, corrosão e eventos extremos aceleram degradação, essa abordagem é particularmente necessária (SOHN et al., 2004; FARRAR; WORDEN, 2012).

Entretanto, a digitalização da infraestrutura urbana deve ser conduzida com prudência ética e política. Sistemas inteligentes podem ampliar desigualdades se ignorarem periferias, populações vulneráveis e áreas informais. Também podem gerar vigilância, dependência tecnológica e riscos cibernéticos se não houver governança democrática, segurança e transparência (KITCHIN, 2014; ZUBOFF, 2019).

Conclui-se que cidades tropicais inteligentes devem ser planejadas como cidades cognitivas, resilientes, inclusivas e climaticamente adaptativas. A inteligência urbana não deve ser medida apenas pela quantidade de sensores ou algoritmos, mas pela capacidade de reduzir vulnerabilidades, proteger populações, preservar serviços essenciais, orientar investimentos e promover justiça climática. A infraestrutura do futuro não será apenas concreto, aço e tubulações; será também dado, previsão, adaptação, governança e cuidado territorial (UNDRR, 2015; IPCC, 2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERNES, M.; RIBEIRO, P. J. G.; GONÇALVES, L. A. P. Urban resilience and climate adaptation in cities: concepts and challenges. **Sustainable Cities and Society**, v. 75, 2021.

AL-FUQAHA, Ala; GUIZANI, Mohsen; MOHAMMADI, Mehdi; ALEDHARI, Mohammed; AYYASH, Moussa. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.

AYYUB, Bilal M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. **Risk Analysis**, v. 34, n. 2, p. 340-355, 2014.

BATTY, Michael. Digital twins. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 45, n. 5, p. 817-820, 2018.

BATTY, Michael. **The new science of cities**. Cambridge: MIT Press, 2013.

BIJKER, Wiebe E.; HUGHES, Thomas P.; PINCH, Trevor. **The social construction of technological systems**. Cambridge: MIT Press, 1987.

BOJE, Calin; GUERRIERO, Annie; KUBICKI, Sylvain; REZGUI, Yacine. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, 103179, 2020.

BOX, George E. P.; JENKINS, Gwilym M.; REINSEL, Gregory C.; LJUNG, Greta M. **Time series analysis: forecasting and control**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

CARAGLIU, Andrea; DEL BO, Chiara; NIJKAMP, Peter. Smart cities in Europe. **Journal of Urban Technology**, v. 18, n. 2, p. 65-82, 2011.

CATS, Oded; JENELIUS, Erik. Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: mitigation effects of real-time information. **Networks and Spatial Economics**, v. 14, p. 435-463, 2014.

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

COHEN-SHACHAM, Emmanuelle et al. **Nature-based solutions to address global societal challenges**. Gland: IUCN, 2016.

CRESWELL, John W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE, 2014.

CUTTER, Susan L.; BORUFF, Bryan J.; SHIRLEY, W. Lynn. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.

DEMERTZI, Vasiliki; DEMERTZIS, Stavros; DEMERTZIS, Konstantinos. An overview of cyber threats, attacks, and countermeasures on the primary domains of smart cities. **Applied Sciences**, v. 12, n. 790, 2022.

DODMAN, David et al. Cities, settlements and key infrastructure. In: IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

FARRAR, Charles R.; WORDEN, Keith. **Structural health monitoring: a machine learning perspective**. Chichester: Wiley, 2012.

FOLKE, Carl. Resilience: the emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 253-267, 2006.

FRANGOPOL, Dan M.; SAYDAM, Deniz; KIM, Sunyong. Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-25, 2012.

GEHL, Jan. **Cities for people**. Washington, DC: Island Press, 2010.

GILES-CORTI, Billie et al. City planning and population health: a global challenge. **The Lancet**, v. 388, n. 10062, p. 2912-2924, 2016.

GONZÁLEZ, Marta C.; HIDALGO, César A.; BARABÁSI, Albert-László. Understanding individual human mobility patterns. **Nature**, v. 453, p. 779-782, 2008.

GOODCHILD, Michael F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. **GeoJournal**, v. 69, p. 211-221, 2007.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. **Deep learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

GRAHAM, Stephen; MARVIN, Simon. **Splintering urbanism: networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition**. London: Routledge, 2001.

GRIEVES, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. Melbourne: Florida Institute of Technology, 2014.

HARVEY, David. **Rebel cities: from the right to the city to the urban revolution.** London: Verso, 2012.

HERZOG, Rico H.; DEGKWITZ, Till; VERMA, Trivik. The Urban Model Platform: a public backbone for modeling and simulation in urban digital twins. **Urban Analytics and City Science**, 2025.

HOLLANDS, Robert G. Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial? **City**, v. 12, n. 3, p. 303-320, 2008.

HOLLING, Crawford S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, p. 1-23, 1973.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

ISO. **ISO 37123:2019: Sustainable cities and communities — Indicators for resilient cities.** Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

KABISCH, Nadja et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas. **Ecology and Society**, v. 21, n. 2, 2016.

KITCHIN, Rob. The real-time city? Big data and smart urbanism. **GeoJournal**, v. 79, p. 1-14, 2014.

LEE, Edward A.; SESHIA, Sanjit A. **Introduction to embedded systems: a cyber-physical systems approach.** 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2017.

MEEROW, Sara; NEWELL, Joshua P.; STULTS, Melissa. Defining urban resilience: a review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38-49, 2016.

MOROZOV, Evgeny. **To save everything, click here: the folly of technological solutionism**. New York: PublicAffairs, 2013.

NIST. **Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 1, Overview**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2017.

NIST. **Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.

O'NEIL, Cathy. **Weapons of math destruction: how big data increases inequality and threatens democracy**. New York: Crown, 2016.

O'ROURKE, Thomas D. Critical infrastructure, interdependencies, and resilience. **The Bridge**, v. 37, n. 1, p. 22-29, 2007.

OKE, Timothy R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

RAHKMAN, M. Incorporating artificial intelligence into the future of stormwater management. **Discover Civil Engineering**, 2026.

RAJKUMAR, Ragunathan; LEE, Insup; SHA, Lui; STANKOVIC, John. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: **Proceedings of the 47th Design Automation Conference**. New York: ACM, 2010. p. 731-736.

RINALDI, Steven M.; PEERENBOOM, James P.; KELLY, Terrence K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 6, p. 11-25, 2001.

RUDIN, Cynthia. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. **Nature Machine Intelligence**, v. 1, p. 206-215, 2019.

SALLIS, James F. et al. Physical activity in relation to urban environments in 14 cities worldwide. **The Lancet**, v. 387, n. 10034, p. 2207-2217, 2016.

SANDERS, Elizabeth B.-N.; STAPPERS, Pieter Jan. Co-creation and the new landscapes of design. **CoDesign**, v. 4, n. 1, p. 5-18, 2008.

SANTAMOURIS, Mat. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. **Science of the Total Environment**, v. 512-513, p. 582-598, 2015.

SATTERTHWAITE, David et al. Building resilience to climate change in urban areas. **Environment and Urbanization**, v. 32, n. 1, p. 3-18, 2020.

SATYANARAYANAN, Mahadev. The emergence of edge computing. **Computer**, v. 50, n. 1, p. 30-39, 2017.

SHAHARUDDIN, Siti et al. Digital twin for smart city disaster management: a review. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLVI-4/W3, p. 315-322, 2022.

SHELTON, Taylor; ZOOK, Matthew; WIIG, Alan. The actually existing smart city. **Cambridge Journal of Regions, Economy and Society**, v. 8, n. 1, p. 13-25, 2015.

SHI, Weisong et al. Edge computing: vision and challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 5, p. 637-646, 2016.

SOHN, Hoon et al. **A review of structural health monitoring literature: 1996–2001**. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2004.

TAO, Fei; ZHANG, He; LIU, Ang; NEE, Andrew Y. C. Digital twin in industry: state-of-the-art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2405-2415, 2019.

TORRACO, Richard J. Writing integrative literature reviews. **Human Resource Development Review**, v. 4, n. 3, p. 356-367, 2005.

TOWNSEND, Anthony M. **Smart cities: big data, civic hackers, and the quest for a new utopia**. New York: W. W. Norton, 2013.

TUCCI, Carlos E. M. **Águas urbanas**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

UN-HABITAT. **World Cities Report 2022: envisioning the future of cities**. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022.

UNDRR. **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030**. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015.

WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

YIN, Robert K. **Qualitative research from start to finish**. 2. ed. New York: Guilford Press, 2016.

ZHENG, Yu; CAPRA, Licia; WOLFSON, Ouri; YANG, Hai. Urban computing: concepts, methodologies, and applications. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology**, v. 5, n. 3, p. 1-55, 2014.

ZHU, Min et al. Data-driven urban digital twins and critical infrastructure resilience. **Urban Planning**, v. 10, 2025.

ZUBOFF, Shoshana. **The age of surveillance capitalism**. New York: PublicAffairs, 2019.

¹ Doutorando em Desenvolvimento Regional pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Mestre em Educação pela Universidade de Uberaba (UNIUBE) e Graduado em Ciência Política e Relações Internacionais pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER). Atua como Professor Assistente do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Engenheira de Pesca pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Bacharel em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Especialista (MBA) em Gestão Pública pela Universidade Federal de Rondônia (UNIR). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pelas Faculdades Integradas Pitágoras, graduado em Engenharia Civil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Mestre em Cultura e Sociedade pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁷ Mestra em Biologia Parasitária pela Universidade Ceuma (Uniceuma). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁸ Mestrando em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)