

**INFRAESTRUTURA VERDE
COMO MATRIZ DE
RESILIÊNCIA URBANA:
PERSPECTIVAS NA
FRONTEIRA DO
CONHECIMENTO
CIENTÍFICO**

**GREEN INFRASTRUCTURE AS A URBAN RESILIENCE MATRIX:
PERSPECTIVES ON THE FRONTIER OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE**

Engenharias • 03/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/782871861](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/782871861)

Ailton Caetano Nascimento Pessoa¹

Ricardo Bentes Kato²

Kadja Lemos Silva Pessoa³

Selena Farias Bezerra⁴

Naian José Ribeiro Azevedo⁵

Kelly Iolanda Melo Martins Paz⁶

Zenaide Amaral Freitas⁷

Juliercles Monteiro⁸

RESUMO

A aceleração das alterações climáticas globais impõe uma reestruturação severa nos modelos de planejamento urbano. Em cidades do trópico úmido amazônico, como Belém (PA), a elevada pluviosidade e a ineficácia da infraestrutura cinza tradicional exacerbam riscos hidrológicos e ilhas de calor. Este artigo objetiva mapear e discutir o papel da Infraestrutura Verde (IV) e das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) como matrizes fundamentais para a promoção da Resiliência Urbana (RU). Por meio de uma síntese analítica baseada nas fronteiras do conhecimento (2020–2026), articulam-se três eixos: práticas biofísicas, barreiras político-institucionais e monitoramento via serviços ecossistêmicos. A metodologia consistiu na triagem sistemática e análise crítica de 35 estudos de alto impacto internacional, confrontados com dados geoclimáticos regionais. Os resultados indicam que elementos vegetados isolados são insuficientes, demandando conectividade ecológica estruturada para eficiência hídrica e térmica. Identificaram-se, ainda, entraves severos na governança multiescalar e na regulação intersetorial. O estudo conclui que a transição para sistemas híbridos (cinza-verde-azul) é indispensável para subsidiar agendas governamentais e mitigar vulnerabilidades na Amazônia pós-COP30, consolidando a IV como vetor estratégico de sobrevivência urbana, sustentabilidade e equidade socioespacial.

Palavras-chave: Infraestrutura Verde; Resiliência Urbana; Soluções Baseadas na Natureza; Trópico Úmido; Planejamento Urbano.

ABSTRACT

The acceleration of global climate change imposes a severe restructuring of traditional urban planning models. In cities of the humid Amazonian tropics, such as Belém (PA), high rainfall and the inefficiency of traditional gray infrastructure exacerbate hydrological

risks and surface heat islands. This article aims to map and discuss the role of Green Infrastructure (GI) and Nature-Based Solutions (NbS) as fundamental matrices for the promotion of Urban Resilience (UR). Through an analytical synthesis based on the frontiers of knowledge (2020–2026), three structuring axes are articulated: biophysical practices, political-institutional barriers, and monitoring via ecosystem services. The methodology consisted of a systematic screening and critical analysis of 35 high-impact international studies, crossed with regional geoclimate data. The results indicate that isolated vegetated elements are insufficient, demanding a structured ecological connectivity to ensure hydrological and thermal efficiency. Furthermore, severe obstacles were identified in multiscale governance and intersectoral regulatory coherence. The study concludes that the transition toward hybrid systems (gray-green-blue) is indispensable to support government agendas and mitigate socio-environmental vulnerabilities in the Amazon in post-COP30 scenarios, consolidating GI as a strategic vector for urban survival, sustainability, and long-term socio-spatial equity.

Keywords: Green Infrastructure; Urban Resilience; Nature-Based Solutions; Humid Tropics; Urban Planning.

1. INTRODUÇÃO

A aceleração do processo de urbanização global ao longo do século XXI remodelou profundamente a configuração territorial e a dinâmica biofísica das cidades. Esse crescimento, frequentemente caracterizado pela expansão horizontal desordenada e pelo adensamento construtivo adverso, converteu os centros urbanos em pontos críticos de vulnerabilidade socioambiental frente às mudanças climáticas antropogênicas.

O modelo tradicional de desenvolvimento urbano apoiou-se historicamente no paradigma da Engenharia Convencional ou Infraestrutura Cinza (IC) — caracterizada por redes rígidas de drenagem pluvial, canalização de cursos d'água e impermeabilização sistemática do solo. Todavia, a crescente recorrência e magnitude de eventos climáticos extremos têm exposto a obsolescência e a ineficácia desse modelo, que se mostra incapaz de absorver estresses hídricos e térmicos crescentes, resultando em inundações catastróficas e na exacerbação de Ilhas de Calor Urbanas (ICU).

Diante dessa crise paradigmática, a busca por resiliência urbana e sustentabilidade direcionou a fronteira do conhecimento científico para abordagens inovadoras e adaptativas. Nesse cenário, a Infraestrutura Verde (IV) e as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) despontam não apenas como alternativas paisagísticas, mas como uma matriz estrutural e tecnológica indispensável para o planejamento urbano contemporâneo.

A IV constitui uma rede estrategicamente planejada de espaços naturais, seminaturais e elementos antrópicos projetados e gerenciados para fornecer uma ampla gama de Serviços Ecosistêmicos (SEs) e proteger a biodiversidade em ecossistemas urbanos fragmentados.

O debate assume contornos de máxima urgência quando deslocado para o contexto de cidades localizadas no trópico úmido, com especial destaque para a região amazônica. A cidade de Belém, capital do estado do Pará, destaca-se como um laboratório urbano complexo: caracterizada por índices pluviométricos anuais excepcionalmente elevados, topografia de baixas altitudes, forte

influência das marés e um histórico de ocupação excludente que resultou no aterramento e na macrofragmentação de seus igarapés.

A abordagem tradicional de engenharia higienista aplicada em Belém historicamente transferiu os pontos de alagamento sem resolver as causas estruturais da vulnerabilidade hídrica. Diante da proximidade da realização da COP30 na cidade, consolida-se uma oportunidade histórica e científica para repensar o planejamento local à luz das redes cinza-verde-azul.

Para guiar o desenvolvimento deste estudo, estabelece-se a seguinte hipótese central: *a integração planejada e conectada da Infraestrutura Verde ao tecido urbano atua como uma matriz indutora de resiliência biológica, térmica e hidrológica, sendo a transição para sistemas híbridos (cinza-verde-azul) superior à insistência em modelos puramente cinzas de engenharia convencional, especialmente em cidades de alta pluviosidade sazonal no trópico úmido.*

Complementarmente, assume-se a sub-hipótese de que as principais barreiras para a efetivação dessa matriz não são de ordem estritamente técnica, mas sim político-institucionais, decorrentes da fragmentação das esferas de governança e da ausência de marcos regulatórios unificados.

O objetivo geral deste artigo é mapear, analisar e discutir o papel da Infraestrutura Verde como matriz fundamental para a promoção da Resiliência Urbana, fundamentando-se nas fronteiras do conhecimento científico global entre os anos de 2020 e 2026. Para alcançar essa meta, delimitam-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e catalogar as principais tipologias e práticas de engenharia biofísica voltadas ao amortecimento hídrico e térmico;
- Mapear e discutir os desafios técnicos, normativos e as barreiras político-institucionais que limitam a transição para o planejamento verde;
- Analisar o papel de métricas tecnológicas contemporâneas, como inteligência artificial, modelagem de cenários e gêmeos digitais, na otimização de serviços ecossistêmicos urbanos.

A finalidade deste trabalho é eminentemente teórico-aplicada, buscando fornecer um *framework* conceitual robusto que possa subsidiar novos rumos para as políticas públicas de planejamento urbano e gestão ambiental em regiões equatoriais. Pretende-se preencher a lacuna literária existente entre as formulações metodológicas globais de IV — frequentemente desenvolvidas para o hemisfério norte e climas temperados — e os desafios empíricos singulares associados ao manejo de águas e controle microclimático no ecossistema amazônico.

A justificativa deste tema repousa sobre a necessidade imperiosa de superação do imobilismo técnico e do esgotamento da infraestrutura cinza. A literatura internacional recente tem demonstrado que a governança integrada do território depende da superação de visões setoriais rígidas. Conforme apontam Afionis, Mkwambisi e Dallimer (2020), a falta de coerência política intersetorial e multiescalar representa um dos principais gargalos para a implementação bem-sucedida de infraestruturas verdes

urbanas, limitando a capacidade de resposta das administrações locais face às crises climáticas.

Ademais, a reconfiguração dos espaços precisa ser pautada na multifuncionalidade dos elementos naturais. Monteiro, Ferreira e Antunes (2020) destacam que os princípios de planejamento da IV exigem a articulação de múltiplos benefícios ecológicos e sociais no mesmo espaço físico, o que maximiza o retorno dos investimentos públicos e evita a fragmentação de ecossistemas promovida pela expansão desordenada (*urban sprawl*), aspecto também corroborado por Vargas-Hernández e Zdunek-Wielgołaska (2021).

Sob a ótica do manejo de recursos hídricos, a urgência se justifica pela insuficiência das redes coletoras diante do aumento de eventos extremos de precipitação pluviométrica. Rodríguez-Rojas *et al.* (2024) argumentam que a inserção de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SuDS) e a filosofia de Cidades-Esponja modificam a dinâmica do deflúvio superficial diretamente na fonte, mitigando os riscos de inundações catastróficas.

Essa necessidade de modelagem preditiva e integrada das bacias hidrográficas urbanas e zonas costeiras é imperativa em nações em desenvolvimento, onde a conversão da cobertura vegetal em asfalto ocorre sem o devido suporte de planejamento técnico (BANDEIRA RODRIGUES *et al.*, 2025; WU *et al.*, 2024).

Sob o ponto de vista térmico, a relevância do tema é evidenciada pela deterioração das condições de conforto higrotérmico nas cidades tropicais densas. Estudos desenvolvidos em Belém (PA) por Kato e Lima (2020) demonstram empiricamente as vantagens do desempenho térmico de coberturas sustentáveis e vegetadas em

comparação com materiais convencionais de construção, evidenciando uma expressiva atenuação do fluxo de calor para o ambiente interno.

Na escala macro da paisagem, a manutenção de parques metropolitanos interconectados funciona como um nó estruturante essencial para regular a temperatura radiante superficial e garantir refúgios climáticos para a população (FLORIT-FEMENIAS; CROSAS; SAURA-VALLVERDÚ, 2025).

Por fim, a fronteira do conhecimento atual impõe a necessidade de acoplar as soluções baseadas na natureza às tecnologias emergentes de suporte à decisão. A incorporação da inteligência artificial e de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) na simulação espacial e no codesenho de cenários permite antever impactos ambientais crônicos ou agudos de forma dinâmica (BIBRI *et al.*, 2024; PELDON *et al.*, 2024; RICCIARDI; CALLEGARI; LEONE, 2025).

Portanto, este artigo justifica-se ao alinhar as demandas físicas e urgentes de adaptação climática da cidade de Belém aos avanços metodológicos digitais e de governança propostos pela comunidade científica internacional, estabelecendo um panorama crítico na fronteira do conhecimento ecológico urbano.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O Nexo entre Infraestrutura Verde (IV), Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e Resiliência Urbana (RU)

A evolução do planejamento urbano contemporâneo demanda a superação definitiva dos modelos segregados de gestão territorial. Historicamente pautadas na expansão cinza de engenharia rígida, as

idades passaram a externalizar passivos ecológicos severos que comprometem sua própria viabilidade funcional.

Nesse contexto, a Infraestrutura Verde (IV) e as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) consolidam-se como constructos teóricos e práticos indissociáveis, atuando como a matriz central para a consolidação da Resiliência Urbana (RU). Babí Almenar *et al.* (2021) esclarecem que onexo estrutural entre as SbN, os serviços ecossistêmicos (SEs) e os desafios urbanos reside na transição de sistemas de função única para redes multifuncionais capazes de amortecer estresses crônicos e choques agudos simultaneamente.

A resiliência urbana, sob uma perspectiva sustentável orientada ao território, não se restringe à capacidade de um sistema retornar ao seu estado original após uma perturbação; trata-se, fundamentalmente, de uma propriedade dinâmica de adaptação, transformação e evolução adaptativa (ZENG *et al.*, 2022). Em áreas metropolitanas complexas, a avaliação dessa capacidade adaptativa exige metodologias integradas que ponderem a sustentabilidade socioecológica ao longo do ciclo de vida das intervenções (YIN; GU; LI, 2025).

A consolidação de estruturas verdes atua diretamente como pilar de gerenciamento de crises, convertendo espaços públicos ociosos em matrizes ativas de segurança biológica, climática e social (NENTWIG, 2024). Essa transição paradigmática redefine o próprio escopo do planejamento urbano tradicional, induzindo o surgimento de novas especializações acadêmicas e profissionais focadas no desenho ecológico e no ordenamento territorial integrado (OGUNKAN, 2025).

2.2. Práticas de Engenharia Biofísica e Manejo Hidrológico na Filosofia das Cidades-Esponja

Um dos campos de maior amadurecimento técnico-científico dentro da fronteira do conhecimento da IV diz respeito ao manejo de águas pluviais urbanas através do conceito de Cidades-Esponja (*Sponge Cities*). O avanço das taxas de impermeabilização do solo altera drasticamente o balanço hidrológico local, elevando os volumes e antecipando os picos do deflúvio superficial (*runoff*).

Diante do agravamento dessas dinâmicas pelas mudanças climáticas, os debates concentram-se na viabilidade e na eficácia das Cidades-Esponja como soluções estruturais para mitigar problemas crônicos de inundação (FU *et al.*, 2023). A engenharia biofísica contemporânea propõe a substituição ou o consórcio das redes de drenagem convencionais por Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SuDS), os quais priorizam a infiltração, detenção, retenção e evapotranspiração da água diretamente na fonte emissora.

A modelagem de cenários e a aplicação de matrizes de priorização para a seleção de locais aptos a receber os SuDS representam passos críticos no planejamento estruturado por drenagem sustentável (AMBACK *et al.*, 2025). Quando aplicados em bacias hidrográficas antropizadas, esses modelos exigem abordagens de otimização multiobjetivo que ponderem tanto a eficiência técnica de amortecimento hídrico quanto a viabilidade de custos econômicos (MCCLYMONT *et al.*, 2020).

Khodadad *et al.* (2025) reforçam que o uso de modelos de suporte à decisão para priorizar locais de IV eleva significativamente a

resiliência a cheias em bacias de alta complexidade urbana, mitigando os gargalos comumente encontrados na engenharia cinza isolada.

Adicionalmente, as abordagens de modelagem prevaletentes indicam que a análise integrada dos fluxos hídricos deve considerar o binômio "fonte-receptor" para otimizar os investimentos em riscos de inundação azul-verde (ILIADIS; GLENIS; KILSBY, 2024). Em redes hidrográficas de planície e áreas costeiras suscetíveis à influência de marés, a integração física entre a infraestrutura azul (corpos d'água, canais, igarapés abertos), a verde (parques lineares, bacias vegetadas) e a cinza convencional expande a resiliência do sistema de drenagem de superfície contra eventos de precipitação severa (ZHU *et al.*, 2025).

Nas Américas, especialmente em zonas transfronteiriças e regiões em desenvolvimento, a urgência de integrar o planejamento urbano ao manejo hídrico através da IV torna-se um imperativo de saúde pública e segurança infraestrutural (LARA-VALENCIA *et al.*, 2022). O sucesso dessas intervenções está atrelado à criação de frameworks de compensação ecológica e valoração dos serviços ambientais prestados pelas Cidades-Esponja (SHI *et al.*, 2024).

2.3. Regulação Microclimática e Resiliência Térmica Urbana

O fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (ICU) constitui uma das alterações antrópicas mais severas no balanço energético das cidades. A substituição da cobertura vegetal por superfícies pavimentadas de alta capacidade térmica e baixa refletividade (albedo), combinada com a emissão de calor antropogênico, eleva as temperaturas radiantes superficiais, impactando negativamente a

saúde pública e elevando o consumo energético para refrigeração artificial.

A literatura científica recente aponta que a IV atua de forma decisiva na mitigação desse efeito por meio do sombreamento direto e da refrigeração evaporativa gerada pela vegetação (CUCE; CUCE; SANTAMOURIS, 2025).

A análise das estratégias de resiliência e adaptação urbana para combater o estresse térmico indica que a distribuição equilibrada de nós verdes na malha urbana é o mecanismo mais eficiente para reduzir as temperaturas atmosféricas locais (FU et al., 2024). No nível do desenho urbano, abordagens contemporâneas como o planejamento de cidades de 15 minutos demandam a incorporação de eixos verdes e soluções baseadas na natureza para construir resiliência térmica nas escalas de vizinhança e bairro (CHEN; HE, 2024).

Da mesma forma, o desenho biofílico de ruas atua diretamente no microclima viário, transformando eixos de circulação de asfalto em corredores de resfriamento higrotérmico (LI; HE, 2025).

Na escala das edificações, os telhados e coberturas verdes extensivas consolidam-se como tecnologias essenciais. A avaliação dos aspectos técnicos e econômicos do desempenho térmico de coberturas verdes demonstra sua alta eficiência em atenuar o fluxo de calor para o interior das estruturas (LAMBARKI *et al.*, 2024).

Essa realidade é validada no contexto amazônico por Kato e Lima (2020), cujos estudos empíricos na cidade de Belém (PA) comprovaram que coberturas sustentáveis vegetadas reduzem de forma expressiva as temperaturas internas e a transferência de calor

em comparação com lajes e telhas convencionais, oferecendo uma resposta adaptativa de baixo custo energético para regiões de clima equatorial úmido.

2.4. Barreiras Político-Institucionais, Governança Territorial e Conflitos Socioespaciais

A despeito do robusto corpo de evidências empíricas atestando os benefícios biofísicos da IV, a sua transição de teoria científica para política pública estruturante enfrenta severas resistências de ordem institucional e social. A governança da IV frequentemente esbarra na fragmentação administrativa e na desarticulação entre diferentes esferas governamentais. Afionis, Mkwambisi e Dallimer (2020) advertem que a falta de coerência e de consistência política intersetorial e multiescalar atua como um limitador crítico para a implementação efetiva da infraestrutura verde urbana, resultando em projetos isolados e sem continuidade territorial.

Para que a IV logre êxito, os princípios norteadores de seu planejamento devem ser integrados e hierarquizados de forma clara pelos gestores públicos por meio de métodos de análise de decisão, como o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) (MOSISSA *et al.*, 2023). Quando essa organização falha, surgem barreiras de implementação, especialmente em cidades inseridas em contextos semiáridos ou em desenvolvimento periférico acelerado (OKOUR; SHAWEESH, 2024).

Ademais, o desenho da IV não ocorre em um vácuo social, intersectando-se frequentemente com conflitos de uso do solo e disputas pelo espaço urbano. A expansão de projetos de infraestrutura verde em franjas periurbanas ou áreas de preservação

ambiental pode desencadear tensões e problemas sociais não resolvidos entre comunidades locais, interesses do mercado imobiliário e as metas ecológicas do Estado (WARNER; MEISSNER, 2025).

O uso do solo agrícola e a integração das terras agrícolas no planejamento da IV urbana surge como uma estratégia de síntese de evidências capaz de mitigar conflitos e promover a coesão territorial entre o campo e a cidade (ROLF *et al.*, 2020). No entanto, em economias pós-industriais e grandes aglomerações urbanas, a IV é frequentemente demandada a atuar como uma ferramenta de adaptação climática emergente para reestruturar passivos ambientais em territórios historicamente degradados (JANISZEK; KRZYSZTOFIK, 2023).

2.5. Métricas Avançadas, Gêmeos Digitais (Digital Twins) e Tecnologias de Suporte à Decisão

A fronteira mais recente do conhecimento científico sobre IV e resiliência urbana concentra-se na digitalização, na modelagem estocástica e no monitoramento de alta precisão através de tecnologias emergentes. A necessidade de justificar investimentos financeiros públicos direcionou a pesquisa para a criação de frameworks de decisão baseados na quantificação rigorosa dos fluxos de oferta, demanda e escassez de serviços ecossistêmicos (LU *et al.*, 2025). Ferramentas de valoração e toolkits analíticos passam a ser pré-requisitos para inserir a IV de forma vinculativa nos planos diretores municipais (VAN OIJSTAEIJEN; VAN PASSEL; COOLS, 2020).

Nesse horizonte tecnológico, destaca-se o papel transformador dos Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) e da Inteligência Artificial (IA). O

intercâmbio sinérgico entre IA e Gêmeos Digitais permite o planejamento ambiental preditivo e automatizado de cidades inteligentes sustentáveis, antecipando falhas infraestruturais hídricas perante cenários de estresse climático (BIBRI *et al.*, 2024). Os Gêmeos Digitais auxiliam na navegação da complexidade urbana, transformando dados geoespaciais em tempo real em ferramentas de governança adaptativa (PELDON *et al.*, 2024).

Por fim, o uso de algoritmos de aprendizado profundo (*deep learning*) combinados com tomada de decisão multicritério permite avaliar a resiliência verde espaço-temporal de províncias inteiras ou aglomerações urbanas com precisão inédita (HAN; LIU, 2025). O acoplamento dessas tecnologias habilitadoras digitais aos projetos de arquitetura e desenho urbano viabiliza a fusão entre metas de mitigação e adaptação climática (RICCIARDI; CALLEGARI; LEONE, 2025).

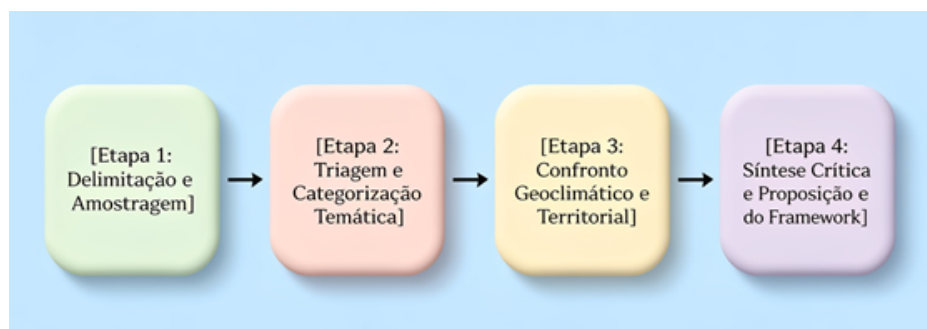
A engenharia ambiental contemporânea se consolida, assim, na capacidade de modelar as interações dinâmicas entre os espaços "cinza-verde-azul" através de dinâmica de sistemas, otimizando simultaneamente a regulação de fluxos de inundação, a eficiência de custos e a segurança ecológica (JIANG *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2025).

3. METODOLOGIA

O delineamento metodológico deste estudo pauta-se por uma abordagem qualitativa, exploratória e de caráter analítico-descritivo, consubstanciada por meio de uma revisão sistemática integrativa da literatura técnico-científica. A escolha por este método justifica-se pela necessidade de mapear, organizar e sintetizar as evidências

empíricas e teóricas localizadas na fronteira do conhecimento global a respeito da Infraestrutura Verde (IV) e das Soluções Baseadas na Natureza (SbN), convertendo-as numa matriz conceitual acionável e calibrada para responder às vulnerabilidades socioambientais e hídricas de aglomerações urbanas de alta pluviosidade no trópico úmido, tomando como referência empírica de fundo a cidade de Belém (PA).

Figura 1. O processo operacional de condução da pesquisa foi estruturado rigorosamente em quatro etapas sequenciais e interdependentes:



Fonte: Autor (2026)

Na primeira etapa (Delimitação e Amostragem), estabeleceu-se o universo amostral a partir de um recorte cronológico focado na produção científica contemporânea mais recente (período compreendido entre 2020 e 2026). A amostragem foi delimitada a um conjunto estrito de 35 estudos científicos de alto impacto internacional indexados nas principais bases de dados globais (*Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect*), selecionados em função da sua aderência direta aos descritores de pesquisa: "infraestrutura verde", "resiliência urbana", "soluções baseadas na natureza" e "manejo de águas pluviais".

A segunda etapa (Triagem e Categorização Temática) consistiu na leitura analítica e exaustiva dos textos selecionados para a extração

de dados brutos e posterior indexação conceitual. Para organizar o conhecimento de forma sistemática, os dados extraídos das 35 fontes bibliográficas foram submetidos a uma triagem de categorização por eixos estruturantes, divididos em três dimensões analíticas:

1. *Dimensão de Engenharia Biofísica e Práticas Técnicas*: focada em mapear tipologias específicas de IV voltadas à atenuação hídrica e regulação térmica em ecossistemas urbanos degradados.
2. *Dimensão Político-Institucional e Governança*: direcionada a identificar os conflitos de uso do solo, assimetrias regulatórias e barreiras administrativas intersetoriais que impedem a execução de planos ecológicos.
3. *Dimensão Tecnológica e de Métricas*: voltada ao levantamento de indicadores modernos de monitoramento, incluindo modelagens preditivas, uso de dinâmica de sistemas e tecnologias habilitadoras digitais.

Na terceira etapa (Confronto Geoclimático e Territorial), as soluções e os modelos teóricos extraídos da literatura internacional — predominantemente desenvolvidos para realidades e regimes climáticos do Hemisfério Norte — foram tensionados e confrontados criticamente com os pressupostos e características geoclimáticas do trópico úmido amazônico. Utilizaram-se como parâmetros de calibração os dados qualitativos e os diagnósticos físicos da cidade de Belém (PA), considerando o seu regime pluviométrico severamente marcado por altas taxas de precipitação sazonal, topografia de planície com cotas altimétricas baixas e

vulnerabilidade histórica a inundações desencadeadas pelo binômio chuva-maré. Essa etapa permitiu filtrar quais ferramentas de suporte à decisão possuem viabilidade real de transposição para o contexto local.

Por fim, a quarta etapa (Síntese Crítica e Proposição do Framework) consistiu no cruzamento e na integração das categorias temáticas para a redação do artigo científico. Os resultados obtidos por meio do mapeamento foram articulados de modo a validar ou refutar a hipótese central levantada na introdução. A síntese dos dados culminou na proposição de recomendações estratégicas e de um arcabouço (*framework*) conceitual adaptativo, capaz de subsidiar a elaboração de políticas públicas integradas de planejamento urbano sustentável no cenário pós-COP30 na Amazônia, assegurando que a transição para sistemas híbridos atenda aos critérios científicos de resiliência e multifuncionalidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES: OS TRÊS PILARES DA MATRIZ DE RESILIÊNCIA

4.1. Práticas de Infraestrutura Verde e Engenharia Baseada na Natureza

A literatura científica recente demonstra que a eficácia da IV depende da escolha e distribuição espacial de suas tipologias. No controle de inundações urbanas, as inovações concentram-se na modelagem de sistemas de biorretenção e na otimização de SuDS. A integração holística de parques metropolitanos, bacias de retenção vegetal e valas de infiltração tem se provado superior às abordagens exclusivas de engenharia cinza. O desenho biofílico de ruas e a conversão de pavimentos impermeáveis em sistemas

multifuncionais e permeáveis reduzem drasticamente o volume do deflúvio e geram resiliência hidrológica em escala de bairro.

No que concerne ao amortecimento térmico, o uso de telhados e fachadas verdes extensivas consolida-se como tecnologia madura. Adicionalmente, o estudo do desempenho térmico de coberturas sustentáveis no contexto equatorial amazônico reforça que a vegetação atenua significativamente o fluxo de calor para o interior das edificações, otimizando o microclima. Essa capacidade regulatória de refrigeração natural estende-se para a escala macro, onde parques urbanos de grande porte e a arborização contínua de calçadas criam refúgios climáticos fundamentais em malhas densas.

4.2. Desafios Técnicos, Normativos e Político-Institucionais

Apesar do amplo consenso científico quanto aos benefícios ecológicos da IV, a sua consolidação como política pública estruturante enfrenta graves barreiras institucionais. Um dos entraves mais recorrentes identificados pela literatura internacional é a crônica falta de coerência e consistência nas esferas intersetoriais e multiescalares do planejamento governamental, o que fragmenta as iniciativas e enfraquece o orçamento direcionado a essas metas. Ademais, a escassez de metodologias unificadas e acionáveis para valoração de SEs dificulta a inserção explícita da IV em planos diretores municipais.

A implementação em áreas semiáridas ou em regiões de expansão periférica desordenada esbarra, comumente, em limitações econômicas e na rigidez de normativas que priorizam investimentos tradicionais em engenharia cinza. Existem também conflitos socioespaciais complexos em zonas periurbanas e margens de rios,

onde a desapropriação e o reordenamento do solo geram tensões entre comunidades tradicionais, interesses imobiliários e metas de preservação ambiental.

4.3. Métricas, Serviços Ecossistêmicos e Tomada de Decisão Tecnológica

Para superar o imobilismo burocrático e garantir a viabilidade prática da IV, a fronteira da pesquisa científica foca na transição para sistemas transparentes de monitoramento, pautados no nexo indissociável entre SbN, SEs e desafios urbanos reais. O desenvolvimento de *frameworks* robustos de avaliação de resiliência ao ciclo de vida permite quantificar a capacidade das infraestruturas verdes de suportar estresses crônicos e distúrbios agudos ao longo do tempo. A tomada de decisão avança através de modelos que mapeiam espacialmente os fluxos de oferta, demanda e escassez dos benefícios ecológicos, garantindo o posicionamento otimizado das intervenções nos pontos de maior vulnerabilidade.

Nesse contexto tecnológico, destaca-se a incorporação emergente da Inteligência Artificial (IA) e dos Gêmeos Digitais (*Digital Twins*). A fusão dessas tecnologias habilitadoras digitais permite a simulação espacial precisa de cenários climáticos preditivos, facilitando o codesenho adaptativo de espaços públicos híbridos (cinza-verde-azul) de forma dinâmica e em tempo real. O uso combinado de métodos multicritério e aprendizado profundo apoia o gestor público na ponderação exata de custos, benefícios hidrológicos e ganhos ecológicos de longo prazo.

5. CONCLUSÃO

A análise sistemática da fronteira do conhecimento científico demonstra que a Infraestrutura Verde transcendeu o patamar de simples alternativa ecológica passiva para se firmar como a matriz indispensável de indução da resiliência urbana contemporânea. Diante da falência sistêmica da infraestrutura cinza tradicional frente à crise climática, a modelagem de cidades resilientes exige soluções biofísicas integradas, multifuncionais e digitalmente monitoradas.

Para cidades inseridas no ecossistema trópico úmido amazônico, como Belém (PA), essa mudança conceitual é premente e inadiável. Os modelos globais de IV exigem profundas calibrações científicas para responder satisfatoriamente aos regimes pluviométricos sazonais extremos da região e às suas particularidades socioespaciais e de exclusão urbana.

A agenda pós-COP30 na Amazônia deve focar no desenvolvimento de coeficientes específicos de infiltração vegetal para espécies nativas, na flexibilização de instrumentos normativos de ordenamento territorial urbanístico e na inserção ativa das comunidades locais no codesenho das SbN.

Somente através dessa fusão rigorosa entre ciência de ponta e especificidades locais será possível transformar o desafio da abundância hídrica tropical em um motor de segurança, equidade socioespacial e sustentabilidade de longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFIONIS, S.; MKWAMBISI, D. D.; DALLIMER, M. Lack of Cross-Sector and Cross-Level Policy Coherence and Consistency Limits Urban Green Infrastructure Implementation in Malawi. *Frontiers in Environmental Science*, v. 8, 20 nov. 2020.

ALOSCIOUS, A. A.; ARTUSO, M.; TORABI MOGHADAM, S. Nature-Based Solutions for Flood Mitigation: The Case Study of Kochi. *Sustainability*, v. 17, n. 5, 1 mar. 2025.

AMBACK, B. C. et al. A framework for urban planning structured by sustainable urban drainage: the proposal of a priority matrix for site selection. *Water Science and Technology*, v. 91, n. 10, p. 1185–1202, 15 maio 2025.

BABÍ ALMENAR, J. et al. Nexus between nature-based solutions, ecosystem services and urban challenges. *Land Use Policy*, v. 100, 1 jan. 2021.

BANDEIRA RODRIGUES, A. et al. Predictive modelling of land use land cover dynamics for a coastal urban city in Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 391, 1 set. 2025.

BEDLA, D.; HALECKI, W. The value of river valleys for restoring landscape features and the continuity of urban ecosystem functions – A review. *Ecological Indicators*, 1 out. 2021.

BIBRI, S. E. et al. The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 1 jul. 2024.

BRESSANE, A. et al. Intelligent nature-based solutions in the 1st smart sustainable Brazilian City: Insights and lessons learned. *Nature-Based Solutions*, v. 6, 1 dez. 2024.

FIROOZI, A. A. et al. Developing urban infrastructure: Strategic integration of solar-heated pavement systems for enhanced

resilience and sustainability. *Results in Engineering*, v. 25, 1 mar. 2025.

FLORIT-FEMENIAS, J.; CROSAS, C.; SAURA-VALLVERDÚ, A. “Metropolitan Parks” in Southern Barcelona: Key Nodes at the Intersection of Green Infrastructure and the Polycentric Urban Structure. *Land*, v. 14, n. 7, 1 jul. 2025.

FRANTZESKAKI, N. et al. Examining the policy needs for implementing nature-based solutions in cities: Findings from city-wide transdisciplinary experiences in Glasgow (UK), Genk (Belgium) and Poznań (Poland). *Land Use Policy*, v. 96, 1 jul. 2020.

GODOI, N. M. I.; GOMES, R. C.; LONGO, R. M. Contributions of urban green spaces to cities: A literature review. *Sustainable Environment*, 2025.

HAN, M.; LIU, Y. Evaluating urban green resilience through deep learning and multicriterion decision-making approaches: A spatiotemporal analysis of Guangdong Province. *Sustainable Cities and Society*, v. 131, 1 set. 2025.

HOMER, S. T.; BEREZINA, E. B.; GILL, C. M. H. D. Urban futures through young eyes: Concept mapping youth visions of tomorrow’s cities. *Futures*, v. 173, 1 out. 2025.

HU, Y. et al. Balancing urban expansion with a focus on ecological security: A case study of Zhaotong City, China. *Ecological Indicators*, v. 156, 1 dez. 2023.

HUANG, X. et al. Integrating green infrastructure, design scenarios, and social-ecological-technological systems for thermal resilience

and adaptation: Mechanisms and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1 abr. 2025.

JIANG, Q. et al. Simulation Study on Rain-Flood Regulation in Urban “Gray-Green-Blue” Spaces Based on System Dynamics: A Case Study of the Guitang River Basin in Changsha. *Water*, v. 16, n. 1, 1 jan. 2024.

KATO, R. B.; LIMA, G. de A. Estudo Comparativo Do Desempenho Térmico de Coberturas Convencionais e Sustentáveis Em Belém-PA. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 12, n. 1, 15 abr. 2020.

LAMBARKI, R. et al. Evaluating the technical and economic aspects of thermal performance of extensive green roofs: A GIS-based case study in the urban setting of Nador, Morocco. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, v. 22, p. 410–422, 2024.

LARA-VALENCIA, F. et al. Integrating Urban Planning and Water Management Through Green Infrastructure in the United States-Mexico Border. *Frontiers in Water*, v. 4, 1 fev. 2022.

LI, B. et al. Scenario Analysis for Resilient Urban Green Infrastructure. *Land*, v. 11, n. 9, 1 set. 2022.

LI, Y.; HE, B. J. Biophilic street design for urban heat resilience. *Progress in Planning*, v. 199, 1 set. 2025.

LOURENÇO, I. B. et al. Land as a sustainable resource in city planning: The use of open spaces and drainage systems to structure environmental and urban needs. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, 10 dez. 2020.

LU, G. et al. Decision-making framework for green infrastructure practices based on the quantification of ecosystem services supply-flow-demand: A review. *Journal of Environmental Management*, 1 ago. 2025.

MONTEIRO, R.; FERREIRA, J. C.; ANTUNES, P. Green infrastructure planning principles: An integrated literature review. *Land*, v. 9, n. 12, p. 1-19, 1 dez. 2020.

OKOUR, Y.; SHAWEESH, H. Identifying the barriers to green infrastructure implementation in semi-arid urban areas using the DPSIR framework: A case study of Amman, Jordan. *City and Environment Interactions*, v. 24, 1 dez. 2024.

PANORI, A. et al. Blending Nature with Technology: Integrating NBSs with RESs to Foster Carbon-Neutral Cities. *Designs*, v. 9, n. 3, 1 jun. 2025.

PELDON, D. et al. Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, v. 111, 15 set. 2024.

RICCIARDI, G.; CALLEGARI, G.; LEONE, M. F. Leveraging digital enabling technologies for integrating climate adaptation and mitigation in urban design. *Automation in Construction*, 1 dez. 2025.

RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I. et al. Advances in the Integration of Sustainable Drainage Systems into Urban Planning: A Case Study. *Sustainability*, v. 16, n. 7, 1 abr. 2024.

SAMUDIO, H.; FERNANDES, F. G. Arborização urbana e sustentabilidade: estratégias para o planejamento verde no espaço

universitário. *Realização*, v. 12, n. 23, 14 ago. 2025.

SHARMA, S.; KUMAR, S.; SINGH, A. Assessment of Green Infrastructure for sustainable urban water management. *Environment, Development and Sustainability*, v. 27, n. 9, 1 set. 2025.

VAN OIJSTAEIJEN, W.; VAN PASSEL, S.; COOLS, J. Urban green infrastructure: A review on valuation toolkits from an urban planning perspective. *Journal of Environmental Management*, v. 267, 1 ago. 2020.

VARGAS-HERNÁNDEZ, J. G.; ZDUNEK-WIELGOŁASKA, J. Urban green infrastructure as a tool for controlling the resilience of urban sprawl. *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, n. 2, p. 1335–1354, 1 fev. 2021.

WANG, H. et al. Spatial-temporal evolution mechanism and dynamic simulation of the urban resilience system of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 104, 1 jan. 2024b.

WANG, J.; FOLEY, K. Promoting climate-resilient cities: Developing an attitudinal analytical framework for understanding the relationship between humans and blue-green infrastructure. *Environmental Science and Policy*, v. 146, p. 133–143, 1 ago. 2023.

WANG, L. et al. Integrating Grey–Green Infrastructure in Urban Stormwater Management: A Multi–Objective Optimization Framework for Enhanced Resilience and Cost Efficiency. *Applied Sciences*, v. 15, n. 7, 1 abr. 2025.

WARNER, J.; MEISSNER, R. Conflicts over periurban green infrastructure: Unresolved social problems with nature-based urban solutions. *Geoforum*, v. 159, 1 fev. 2025.

WU, S. et al. Climate change and urban sprawl: Unveiling the escalating flood risks in river deltas with a deep dive into the GBM river delta. *Science of the Total Environment*, v. 947, 15 out. 2024.

XUE, F. et al. Assessing the Lifecycle Environmental Resilience of Urban Green Infrastructures Coping with Acute Disturbances and Chronic Stresses. *Water*, v. 16, n. 8, 1 abr. 2024.

¹ Discente de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém – PA, Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade da Amazônia – UNAMA, Licenciado em Geografia pela Faculdade Venda Nova Imigrante – FAVENI, Pós-graduação em Engenharia Ambiental pelo Centro Universitário UNIBF, Pós-graduação em MBA em Gestão de Obras na Construção Civil pelo Centro Universitário UNIBF, Pós-graduação em Gestão de projetos e Suprimentos pela Universidade Cândido Mendes UCAM e Engenheiro de Segurança no Trabalho pela Universidade Pitágoras Unopar Anhanguera. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7063-625X>.

² Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (UFPA), Prof. Titula do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém - PA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3096-4751>.

³ Discente de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Ciência e Meio Ambiente – PPGCMA, da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém - PA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9446-329X>.

⁴ Discente de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém - PA.
E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID:
<https://orcid.org/0009-0005-6678-4551>.

⁵ Pós-Graduado em Gestão e Modelagem de Projetos em BIM, Faculdade FASUL Educacional, São Lourenço - MG. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1395-5452>.

⁶ Discente de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém - PA.
E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID:
<https://orcid.org/0009-0005-8540-3654>.

⁷ Discente de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém - PA.
E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID:
<https://orcid.org/0009-0003-5629-7763>.

⁸ Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Norte do Paraná – UNOPAR, Ananindeua – PA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)