

DRENAGEM URBANA: TELHADOS INTELIGENTES COM CONTROLE EM TEMPO REAL (RTC)

URBAN DRAINAGE: SMART ROOFS WITH REAL-TIME CONTROL (RTC)

  **Wanny Lacerda Silvério**
Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil
wanny@discente.ufg.br

  **Juan Carlos Guillen Salas**
Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil
juanguillen@ufg.br

  **Ricardo Prado Abreu Reis**
Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil
ricardo_reis@ufg.br

Resumo

A crescente urbanização e a impermeabilização do solo têm intensificado o risco de inundações em áreas urbanas, desafiando a capacidade dos sistemas tradicionais de drenagem. Este artigo investiga como os telhados inteligentes, que integram tecnologias avançadas como sensores IoT e controle preditivo, podem mitigar esses impactos, promovendo soluções sustentáveis para a gestão de águas pluviais. A revisão sistemática segue diretrizes do modelo PICOC, abrangendo uma análise de 11 estudos selecionados em bases científicas renomadas, focando nas tipologias, tecnologias aplicadas e benefícios desses sistemas. Os resultados destacam que telhados verdes, azuis e inteligentes reduzem significativamente o escoamento superficial, aumentam a eficiência no armazenamento hídrico e proporcionam benefícios térmicos e energéticos. Conclui-se que os telhados inteligentes com controle preditivo são ferramentas eficazes para enfrentar os desafios climáticos e urbanos, embora enfrentem barreiras relacionadas a custos e regulamentações, ressaltando a necessidade de pesquisas futuras para ampliar sua adoção e eficácia.

Palavras-chave: Telhados Inteligentes. Controle em Tempo Real. Drenagem Urbana. Gestão de Águas Pluviais. Infraestrutura Verde.

Abstract

Growing urbanization and soil impermeabilization have intensified the risk of flooding in urban areas, challenging the capacity of traditional drainage systems. This article investigates how smart roofs, integrating advanced technologies such as IoT sensors and predictive control, can mitigate these impacts by promoting sustainable stormwater management solutions. The systematic review follows the PICOC model guidelines, encompassing an analysis of 11 studies selected from renowned scientific databases, focusing on the typologies, applied technologies, and benefits of these systems. The results highlight that green, blue, and smart roof significantly reduce surface runoff, enhance water storage efficiency, and provide thermal and energy benefits. It concludes that smart roofs with predictive control are effective tools for addressing climatic and urban challenges, though they face barriers related to costs and regulations, emphasizing the need for further research to expand their adoption and effectiveness.

Keywords: Smart Roofs. Real-Time Control. Urban Drainage. Stormwater Management. Green Infrastructure.

Introdução

O crescimento populacional aliado ao processo de urbanização tem transformado significativamente o uso e a cobertura do solo nas cidades. Essa transformação resulta na conversão de áreas não construídas em superfícies impermeáveis, alterando o ciclo hidrológico natural e potencializando os riscos de enchentes urbanas e poluição difusa (Liu *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2024). Como resposta, estratégias como Infraestrutura Verde, Desenvolvimento de Baixo Impacto, Sistemas de Drenagem Sustentável e o conceito de Cidades Esponjas têm sido desenvolvidas globalmente para mitigar enchentes urbanas e reduzir a poluição difusa. Entre essas estratégias, os telhados inteligentes emergem como uma solução eficaz para reter escoamento e criar espaços sustentáveis onde áreas de solo natural são limitadas (Liu *et al.*, 2022).

Os telhados inteligentes, equipados com tecnologias de controle preditivo e em tempo real, destacam-se como soluções eficazes para mitigar os impactos das mudanças climáticas e os riscos de inundações urbanas (Zhou *et al.*, 2024; Jean *et al.*, 2020). Sistemas como o Telhado com drenagem interna inteligente (*Smart Internal Drainage Roof - SIDR*) combinam sensores IoT (Internet das coisas) e modelagem hidrodinâmica para prever e gerenciar picos de escoamento durante eventos extremos, reduzindo em até 50% as áreas alagadas e eliminando zonas de alto risco (Xu *et al.*, 2021). Esses telhados, que integram estratégias como o Regras Baseadas em Controle (*Rule-Based Control - RBC*) e o Modelos de Controle Preditivo (*Model Predictive Control - MPC*), otimizam o armazenamento e a liberação de águas pluviais, garantindo eficiência mesmo em condições climáticas severas (Zhou *et al.*, 2024).

Apesar de sua eficácia, a adoção em larga escala de telhados inteligentes ainda enfrenta desafios relacionados a custos elevados e à necessidade de maior precisão nos algoritmos preditivos (Shishegar *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2023). Esses sistemas requerem ajustes para torná-los economicamente viáveis e adaptáveis a diferentes contextos urbanos, ampliando sua contribuição para a resiliência hídrica e climática das cidades (Jean *et al.*, 2020). Além disso, a necessidade de padronização técnica e regulamentação específica para sua implementação pode limitar a expansão dessa tecnologia em diferentes regiões (Xu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2024). Estudos futuros devem explorar formas de reduzir os custos

de implementação e aperfeiçoar a integração com infraestruturas existentes, promovendo uma abordagem mais sustentável e acessível para o gerenciamento de águas pluviais (Zhou *et al.*, 2024; Shishegar *et al.*, 2021).

Diante das lacunas na literatura sobre o papel dos telhados inteligentes com controle em tempo real (RTC) no manejo sustentável de águas pluviais, esta revisão sistemática visa compilar e avaliar criticamente as evidências disponíveis sobre suas tipologias, benefícios e limitações. A análise dos estudos mais recentes busca identificar, categorizar e sintetizar as principais tecnologias e impactos associados ao uso desses materiais no gerenciamento hídrico urbano. O objetivo é fornecer uma base de conhecimento abrangente para orientar futuras pesquisas, aprimorar práticas de engenharia e fomentar o desenvolvimento sustentável e a resiliência das cidades frente aos desafios climáticos globais.

Terminologia

O termo 'tecnologia inteligente' é amplamente utilizado em diversos contextos, como energia e telecomunicações, mas é menos explorado em áreas como águas pluviais e hidráulica. Apesar de atrair o interesse de tomadores de decisão e do público, o uso genérico desse termo pode causar confusão, dificultando a disseminação clara do conhecimento científico (Fletcher *et al.*, 2015). Para mitigar isso, é essencial aplicar a terminologia de forma consistente e definir os conceitos de maneira clara, especialmente em áreas emergentes. Esta abordagem facilita a comunicação dentro da disciplina de águas pluviais e promove o diálogo interdisciplinar com campos como controle de sistemas, infraestrutura verde e planejamento urbano, contribuindo para avanços científicos e práticos mais robustos (Webber *et al.*, 2022).

Tecnologia inteligente: Refere-se a sistemas capazes de realizar funções como sensoriamento, monitoramento, comunicação, gestão, análise, integração, controle e otimização de dispositivos de forma coordenada (Webber *et al.*, 2022). Isso inclui tanto dispositivos autônomos com recursos inteligentes quanto tecnologias que podem ser adaptadas para melhorar o desempenho de outros sistemas, ativos ou redes.

Telhados inteligentes: São sistemas avançados que integram tecnologias para melhorar o desempenho funcional e ambiental das coberturas, combinando monitoramento, automação e otimização de processos (Zhou *et al.*, 2024). Esses telhados podem incluir sensores para coletar dados sobre temperatura, umidade e fluxo de água, além de mecanismos para regular o isolamento térmico, gerenciar águas pluviais e até gerar energia renovável, como os telhados solares.

Controle em Tempo Real (RTC): É uma abordagem tecnológica que utiliza sensores, algoritmos e sistemas de comunicação para monitorar, analisar e ajustar processos ou operações em tempo real, permitindo respostas rápidas e otimizadas a mudanças nas condições ambientais ou operacionais (Campisano *et al.*, 2013). O RTC melhora a eficiência, reduz desperdícios e potencializa o desempenho, promovendo decisões informadas e ajustes contínuos, fundamentais para sistemas críticos e ambientes sujeitos a variações constantes.

Internet das Coisas (IoT): Refere-se a um conceito que descreve a rede de dispositivos físicos e virtuais interconectados que coletam, compartilham e processam dados através da internet. Esses dispositivos, equipados com sensores, softwares e outras tecnologias, permitem monitorar, controlar e automatizar processos em tempo real (Kikuchi *et al.*, 2021).

5

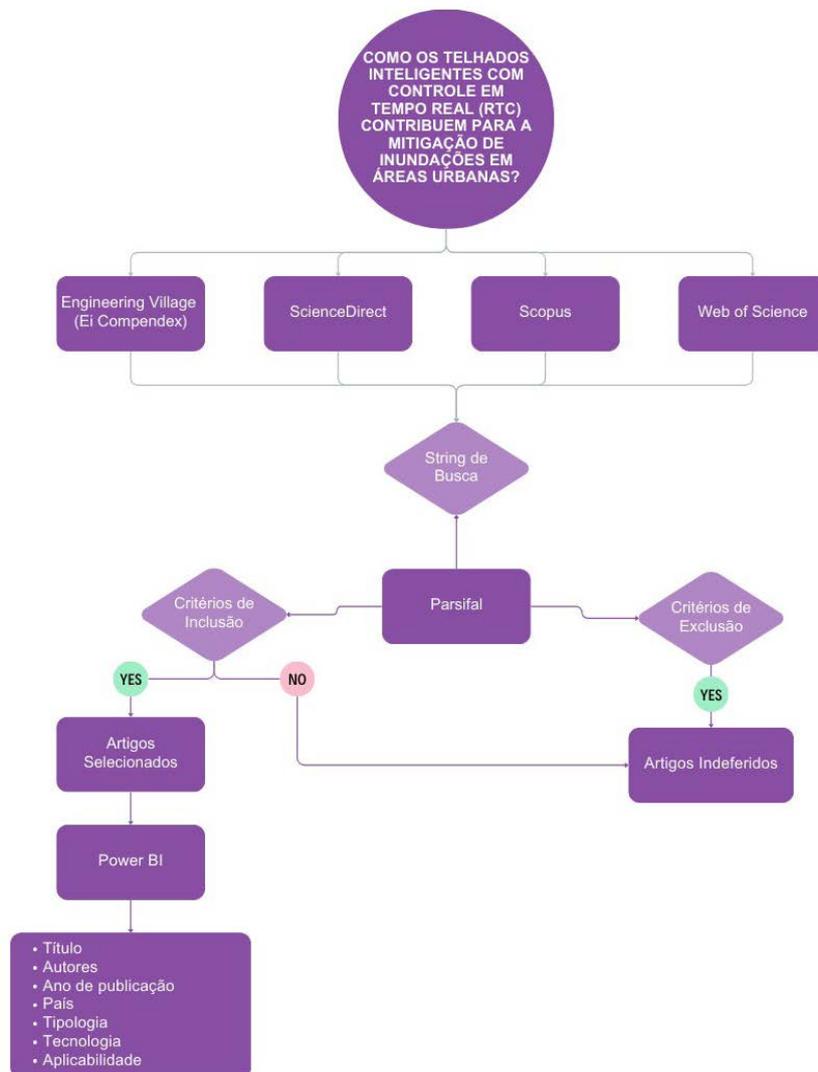
Método

Uma revisão sistemática é um estudo secundário que busca identificar, avaliar e sintetizar evidências relevantes de maneira rigorosa e imparcial para responder a uma questão específica de pesquisa, reduzindo possíveis vieses (Antman *et al.*, 1992; Oxman; Guyatt, 1993). De acordo com as orientações do Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions (2023), os passos fundamentais para a condução de uma revisão sistemática envolvem: (1) formulação de uma pergunta de pesquisa clara; (2) elaboração de um protocolo detalhado; (3) realização de uma busca sistemática e exaustiva na literatura; (4) seleção de estudos com base em critérios de inclusão e exclusão previamente definidos; (5) avaliação da qualidade e dos riscos de viés dos estudos selecionados; (6) extração e análise

dos dados; e (7) síntese dos resultados, incluindo, se aplicável, a realização de uma meta-análise.

Neste estudo, foram seguidas as diretrizes Cochrane, conforme apresentado na Figura 1. Inicialmente, foi definida a pergunta central: “Como os telhados inteligentes com controle em tempo real (RTC) contribuem para a mitigação de inundações em áreas urbanas?”. Essa questão fundamentou a seleção e análise dos estudos, com foco em identificar as tipologias de telhados inteligentes descritas na literatura, as tecnologias aplicadas a esses sistemas e suas principais condições de aplicabilidade, buscando avaliar sua eficiência na mitigação de inundações.

Figura 1 – Estrutura de Pesquisa.



Fonte: Os autores (2024).

Fluxograma utilizado para estruturar a pesquisa

As bases de dados selecionadas para a revisão bibliográfica foram *Engineering Village (Ei Compendex)*, *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*, pela sua ampla cobertura de publicações científicas nas áreas de engenharia, ciências ambientais e tecnologia da informação. A pesquisa foi conduzida utilizando termos-chave como “*smart roofs*”, “*artificial intelligence*”, “*stormwater*”, “*green roofs*” e “*blue roofs*”, além de sinônimos relacionados, combinados por operadores booleanos para ampliar a abrangência da pesquisa, formando uma string de busca adaptada às especificidades de cada plataforma:

(“*smart roofs*” OR “*intelligent roofs*” OR “*green roofs*” OR “*blue roofs*”) AND (“*stormwater*” OR “*flood mitigation*” OR “*urban drainage*”) AND (“*artificial intelligence*” OR “*sensors*” OR “*technology*”).

A busca na literatura seguiu os princípios do modelo PICOC (População, Intervenção, Comparação, Resultado, Contexto), sendo definidos como:

- *Population* (População): Áreas urbanas sujeitas a inundações.
- *Intervention* (Intervenção): Implementação de Telhados Inteligentes.
- *Comparison* (Comparação): Sistemas convencionais de telhados ou abordagens tradicionais de drenagem urbana.
- *Outcome* (Resultado): Mitigação de inundações e melhorias na gestão de águas pluviais.
- *Context* (Contexto): Cenários urbanos com desafios relacionados a drenagem e gestão de águas pluviais.

Os resultados de cada base foram filtrados com base nos critérios de inclusão e exclusão definidos (Quadro 1). A triagem inicial foi realizada na plataforma Parsifal, com análise de títulos e resumos para identificar estudos aderentes aos critérios definidos e remover duplicatas. Os artigos selecionados foram exportados para o Power BI para organização e análise detalhada. Um formulário padronizado foi utilizado para extração de informações, incluindo título, autores, ano de publicação, país, tipologia, tecnologia, aplicabilidade.

Quadro 1 - Critérios de Seleção

	Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Tema	Estudos que abordem telhados inteligentes, telhados verdes e azuis no contexto de drenagem urbana.	Trabalhos que não tratem de telhados ou drenagem urbana.
Tecnologia	Estudos que incluam o uso de tecnologias como sensores, Inteligência Artificial ou sistemas de monitoramento.	Trabalhos sem descrição técnica ou foco em tecnologias específicas para drenagem.
Tipo de Estudo	Artigos originais, revisões sistemáticas, estudos de caso.	Estudos opinativos, ensaios ou publicações sem revisão por pares.
Período	Publicações dos últimos 10 anos (salvo referências clássicas).	Publicações anteriores a 10 anos sem relevância histórica.
Idioma	Publicações em inglês e português.	Publicações em idiomas diferentes daqueles estabelecidos.
Relevância Temática	Estudos que analisem o impacto dos telhados inteligentes na mitigação de inundações urbanas.	Trabalhos focados exclusivamente em áreas rurais ou sem vínculo com gestão de águas pluviais.

Fonte: Os autores (2024).

Quadro informativo referente aos critérios da pesquisa.

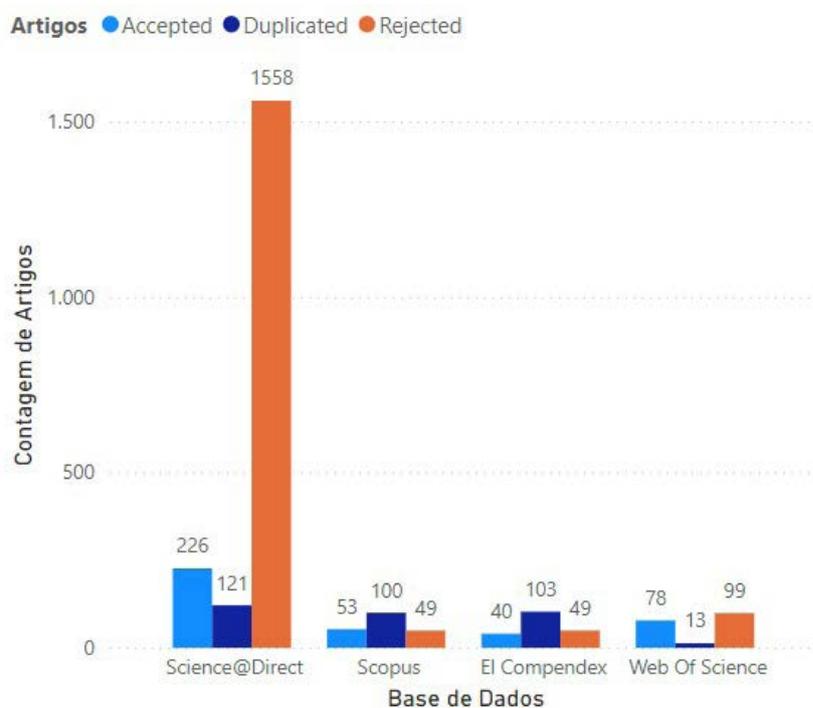
Os critérios adotados para a avaliação da qualidade dos estudos incluíram a clareza na formulação dos objetivos e hipóteses, o detalhamento da metodologia empregada, a relevância dos resultados apresentados em relação à questão de pesquisa e a adequação das análises, sejam elas estatísticas ou qualitativas. A síntese dos resultados foi estruturada por meio de tabelas descritivas e discussões qualitativas, com ênfase nas tipologias de telhados inteligentes, nas tecnologias aplicadas a esses sistemas e nas condições de aplicabilidade observadas. Essas informações foram integradas de forma a responder à questão principal da pesquisa, proporcionando uma análise abrangente e atualizada sobre a contribuição dos Telhados Inteligentes na gestão sustentável de águas pluviais.

Resultado Mapeamento

Na etapa inicial da busca, foram identificadas 2.493 publicações relacionadas ao tema desta revisão. A seleção dos artigos seguiu um processo sistemático, que incluiu a exclusão de duplicatas e de artigos com informações incompletas, como

ausência de dados sobre o jornal, autor ou título. Posteriormente, aplicaram-se os critérios de inclusão e exclusão na análise dos títulos, resultando em um conjunto final de documentos considerados relevantes, conforme ilustrado na Figura 2. Essa figura apresenta a distribuição dos artigos por base de dados, destacando o número de estudos aceitos, recusados e duplicados. Este processo de triagem possibilitou uma análise concentrada em publicações alinhadas ao escopo da revisão, contribuindo para um levantamento mais robusto e direcionado sobre sustentabilidade e tecnologias aplicadas a telhados inteligentes.

Figura 2 - Contagem de artigos por base de dados



Fonte: Os autores (2024).

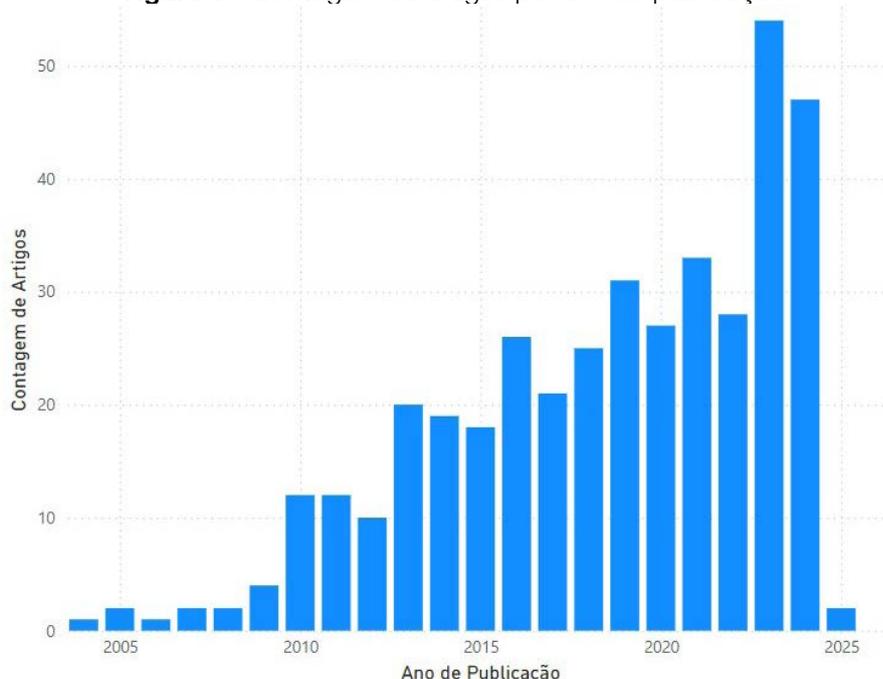
Gráfico utilizado para exemplificar a quantidade de artigos pesquisados.

Os resultados da triagem revelaram que os artigos sobre telhados inteligentes começaram a ser publicados em 2004, alcançando um pico em 2023 (Figura 3). Contudo, devido às limitações temporais para a elaboração deste artigo, foi adotado um recorte temporal, restringindo a análise às publicações do período de 2020 a 2025.

Conforme apresentado na Tabela 1, foram inicialmente selecionados 161 estudos relevantes. Entretanto, apenas 122 artigos estavam disponíveis para leitura integral. Após uma análise detalhada dos conteúdos, verificou-se que somente

11 publicações abordavam diretamente tecnologias e soluções relacionadas a telhados inteligentes com controle em tempo real, formando o núcleo de estudos analisados nesta revisão.

Figura 3 - Contagem de artigos por ano de publicação



Fonte: Os autores (2024).

Gráfico utilizado para exemplificar a quantidade de artigos selecionados por ano.

Tabela 1 - Resumo da triagem dos artigos encontrados nas bases de pesquisa

Triagem	Quantidade de Artigos
Artigos publicados	2493
Artigos duplicados	337
Artigos rejeitados por informações incompletas	225
Artigos rejeitados por critério de exclusão	1530
Artigos aceitos por critério de inclusão	397
Artigos aceitos por recorte temporal	191
Artigos aceitos por leitura de resumo	161
Artigos disponíveis	122
Artigos selecionados	11

Fonte: Os autores (2024).

Tabela utilizada para exemplificar a quantidade de artigos selecionados.

Resultado Revisão

Durante a análise dos artigos, foram extraídas informações relevantes ao tema desta revisão, com foco nas abordagens relacionadas aos telhados inteligentes. Com base nesses dados, foi elaborado o Quadro 2, que organiza e categoriza os artigos, destacando o país de origem das publicações, os tipos de telhados abordados, as tecnologias empregadas e suas respectivas aplicações na gestão hídrica.

Quadro 1 - Critérios de Seleção

Referência	País	Tipologia de Telhado	Tecnologia Utilizada	Aplicabilidade
Jean <i>et al.</i> , 2022	Canadá	Telhado azul-verde	Controle em Tempo Real (RTC), Modelagem Automatizada, Simulação Computacional.	Avaliação do desempenho de drenagem urbana.
Shishegar <i>et al.</i> , 2021	Canadá	Telhado azul-verde	Controle em Tempo Real (RTC), Machine Learning, Simulação de Dados.	Otimização do gerenciamento de águas pluviais.
Zhou <i>et al.</i> , 2024	China	Telhados azul-verde	Controle em Tempo Real (RTC), Simulação Computacional, Modelagem Automatizada.	Otimização do controle de vazão com alta precisão e baixo custo.
Pumo <i>et al.</i> , 2023	Itália	Telhado azul-verde	Sensores, Controle em Tempo real (RTC), Simulação de Dados.	Mitigação do efeito de ilhas de calor urbanas.
Zhou <i>et al.</i> , 2023	China	Telhado azul-verde	Controle em tempo Real (RTC), Simulação Computacional, Machine Learning, Modelagem Automatizada.	Redução de picos de escoamento pluvial.
Brasil <i>et al.</i> , 2021	Brasil	Telhado verde extensivo	Controle em tempo Real (RTC), Simulação Computacional e Sensores.	Avaliação do desempenho hidrológico em controle de águas pluviais.

Campisano <i>et al.</i> , 2021	Itália	Telhado azul modular	Sensores, Simulação Computacional, Controle em Tempo Real (RTC).	Otimização do gerenciamento de águas pluviais.
Vargova <i>et al.</i> , 2024	Eslováquia	Telhado verde extensivo e semi-intensivo	Sensores, Simulação Computacional, Modelagem Hidrológica, Controle em Tempo Real (RTC)	Mitigação de escoamento de águas pluviais.
Xie <i>et al.</i> , 2021	China	Telhado verde extensivo	Machine Learning, Simulação de Dados, Controle em Tempo Real (RTC).	Avaliação do desempenho hidrológico em controle de águas pluviais.
Chen <i>et al.</i> , 2023	China	Telhados azul-verde	Controle em Tempo Real (RTC), Modelagem Automatizada e sensores.	Avaliação do desempenho de retenção de escoamento.
Shetty <i>et al.</i> , 2022	Estados Unidos	Telhado verde extensivo	Sensores, Controle em Tempo Real (RTC), Simulação de Dados.	Mitigação de escoamento de águas pluviais.

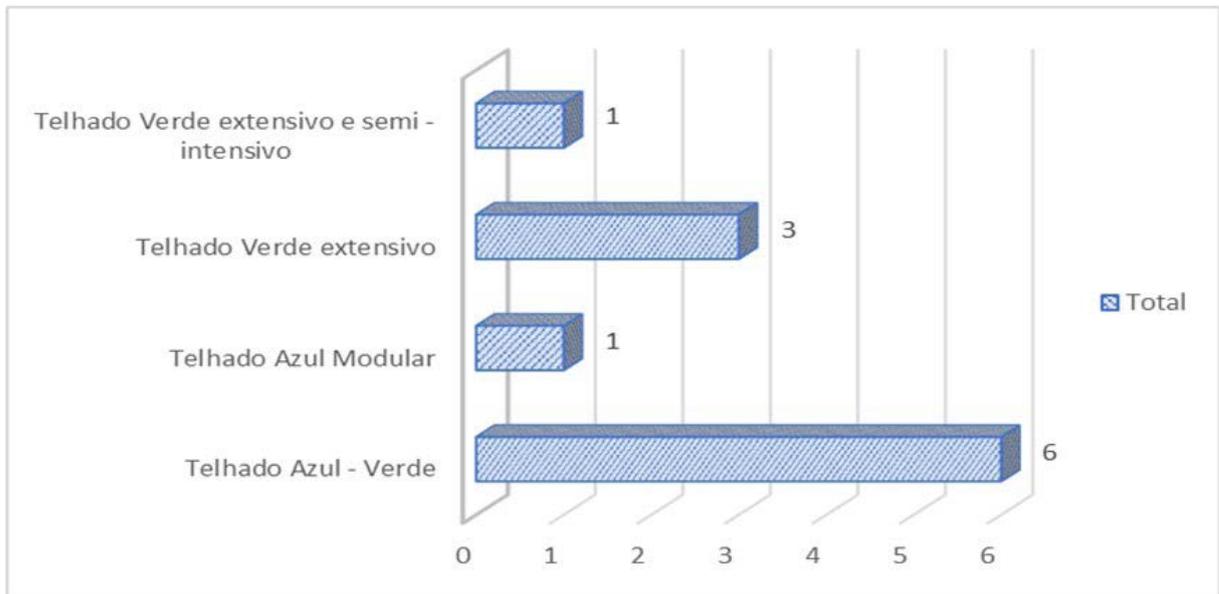
Fonte: Os autores (2024).

Quadro utilizado para descrever os artigos selecionados.

O telhado azul-verde destaca-se como a tipologia mais amplamente investigada na literatura científica (Figura 4), figurando em um número expressivo de estudos que analisam suas funções na retenção de águas pluviais, controle do escoamento superficial e benefícios térmicos e ecológicos. Essas pesquisas exploram o telhado azul-verde como uma solução inovadora e promissora, que integra os benefícios da infraestrutura verde com a capacidade de armazenamento hídrico dos telhados azuis.

Conforme Zhou *et al.* (2023), a camada verde promove a evapotranspiração e contribui para o conforto térmico em áreas urbanas, enquanto a camada azul é essencial para a gestão hídrica, permitindo o armazenamento e a liberação controlada da água. Pumo *et al.* (2023) destacam que essa abordagem integrada não apenas melhora a eficiência na gestão hídrica, mas também oferece benefícios ecológicos e estéticos, configurando-se como uma solução estratégica para cidades que buscam aumentar a resiliência climática e a biodiversidade em suas infraestruturas urbanas.

Figura 4 - Contagem de artigos por tipo de telhado.



Fonte: Os autores (2024).

Gráfico utilizado para exemplificar a quantidade de artigos selecionados por ano.

13

De maneira similar, o telhado verde também é amplamente discutido na literatura, de forma a contribuir para a sustentabilidade urbana, por meio de camadas funcionais que promovem a absorção e a drenagem da água (Shetty *et al.*, 2022). Conforme Xie *et al.* (2021), os telhados verdes são infraestruturas naturais compostas por múltiplas camadas – vegetação, substrato, camada de filtro geotêxtil, camada de drenagem e membrana impermeável – que atuam em sinergia para gerar benefícios ambientais e regulatórios.

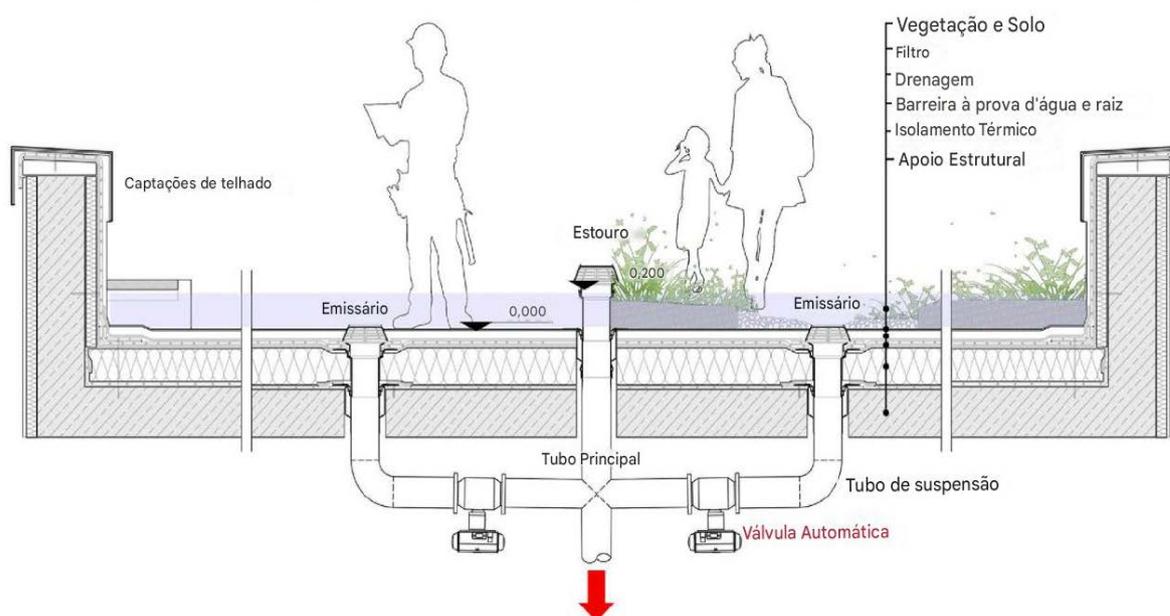
Adicionalmente, alguns estudos abordam sobre os telhados azuis. Segundo Campisano, Modica e Gullotta (2021), eles são projetados para armazenar temporariamente águas pluviais e liberá-las de forma controlada, reduzindo o escoamento superficial e aliviando a pressão sobre os sistemas de drenagem durante eventos de precipitação intensa. Estudos recentes ressaltam a eficácia dos telhados azuis em contextos em que a instabilidade climática ou as chuvas sazonais frequentemente sobrecarregam os sistemas urbanos de drenagem, apresentando-se como uma solução prática e eficiente para áreas densamente urbanizadas (Rey-Mahía *et al.*, 2023).

Os telhados com controle em tempo real (*Real-Time Control* – RTC), são desenvolvidos para ajustar o escoamento hídrico com base em dados

meteorológicos e previsões climáticas. Essa tecnologia é especialmente relevante para cidades sujeitas a precipitações imprevisíveis ou eventos climáticos extremos, possibilitando uma resposta dinâmica e adaptativa (Chen *et al.*, 2023). O sistema Smart Internal Drainage Roof (SIDR), descrito por Zhou *et al.* (2024), combina controle por regras fixas com controle preditivo (Model Predictive Control – MPC), visando mitigar inundações urbanas. Este sistema adapta a liberação de água de telhados verdes e cinzas em função das condições climáticas previstas, otimizando a eficiência operacional e promovendo maior segurança durante períodos de chuvas intensas.

Sistemas de águas pluviais inteligentes representam uma evolução tecnológica na gestão sustentável do escoamento hídrico, integrando a Internet das Coisas (IoT) e tecnologias associadas para otimizar a eficiência e a responsividade (Chen *et al.*, 2023). Esses sistemas incorporam sensores, controladores, atuadores e módulos de comunicação sem fio, permitindo que componentes de gestão hídrica, como equipamentos de coleta e monitoramento da qualidade da água, transformem cidades em estações de tratamento distribuídas em tempo real (Brasil *et al.*, 2021). Atuadores confiáveis e econômicos, como válvulas e bombas, conectam essa infraestrutura inteligente aos sistemas convencionais, possibilitando um controle preciso do fluxo de água (Figura 5).

Figura 5 - Telhado de Drenagem Interna Inteligente



Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2024)

Corte esquemático de um sistema de telhado inteligente.

Além disso, a coleta e análise de dados em tempo real, armazenados em nuvens, permitem ajustes dinâmicos durante eventos de tempestade, diferenciando esses sistemas das infraestruturas tradicionais estáticas (Shetty *et al.*, 2022). No contexto das coberturas, telhados inteligentes ampliam essas capacidades ao integrar tecnologias avançadas para monitorar temperatura, umidade e fluxo de água, além de mecanismos para isolamento térmico, gestão hídrica e geração de energia renovável, como os telhados solares, oferecendo uma abordagem funcional e ambientalmente eficiente para os desafios urbanos contemporâneos (Zhou *et al.*, 2024).

Um telhado inteligente que integra o sistema Smart Internal Drainage Roof (SIDR) e o conceito de telhado azul-verde configura uma solução tecnológica avançada para a gestão sustentável de águas pluviais em áreas urbanas. O SIDR é um sistema de drenagem interna inteligente, equipado com válvulas automáticas e reservatórios, que controla o fluxo de água da chuva em tempo real com base em dados meteorológicos e operacionais, prevenindo sobrecargas nos sistemas urbanos (Zhou *et al.*, 2024). Esse mecanismo atua em conjunto com o telhado azul-verde, que combina camadas vegetadas – capazes de reter naturalmente a água e proporcionar benefícios ecológicos – com reservatórios para armazenamento de volumes significativos de água, contribuindo para a sustentabilidade hídrica e a redução da pressão sobre as redes de drenagem (Busker *et al.*, 2022).

A funcionalidade do telhado inteligente é organizada em três elementos principais: (1) a camada azul-verde, que integra vegetação para captura e tratamento natural da água da chuva e um sistema de reservatórios para armazenamento e reutilização em irrigação ou controle térmico (Yan *et al.*, 2024); (2) o sistema SIDR, que gerencia o escoamento hídrico por meio de retenção temporária e ajustes em tempo real, mitigando impactos em chuvas intensas (Zhou *et al.*, 2024); e (3) sensores IoT, que monitoram continuamente a saturação da vegetação, os níveis de água armazenada e os fluxos, fornecendo dados para otimizar a interação entre o telhado e a infraestrutura urbana (Chen *et al.*, 2023).

Futuramente, a integração de Inteligência Artificial (IA) promete aprimorar ainda mais a eficiência desses sistemas. A IA monitorará variáveis climáticas, volumes armazenados e condições ambientais, utilizando algoritmos de aprendizado de máquina para prever chuvas e ajustar automaticamente as operações (Yang *et al.*, 2024). Essa tecnologia permitirá a otimização dinâmica da retenção e do

escoamento com base em dados históricos e em tempo real, maximizando a eficiência do sistema. Com essa evolução, o telhado inteligente não apenas mitigará enchentes urbanas, promoverá biodiversidade e reduzirá o efeito de ilhas de calor, mas também se consolidará como uma infraestrutura altamente adaptativa e resiliente, ideal para cidades que enfrentam os desafios das mudanças climáticas e da gestão hídrica sustentável.

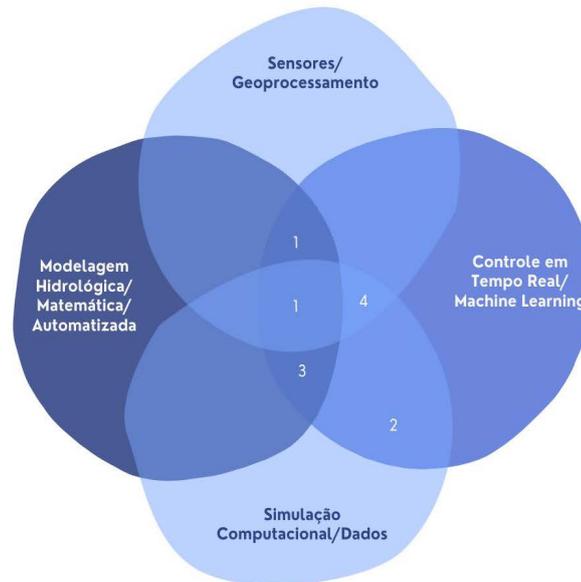
De acordo com Vargova *et al.* (2024), os telhados verdes extensivos podem reduzir em até 52% o escoamento de águas pluviais, contribuindo também para a proteção térmica com redução de 15% a 40% nos valores de transmissão de calor. Já os telhados azuis, com sistemas modulares e orifícios de drenagem restritos, atingem uma eficiência média de 54% na retenção e 72% na detenção de águas pluviais, reduzindo o pico de vazão em 60% (Campisano *et al.*, 2021). Além disso, sistemas inteligentes, como o Controle Preditivo de Modelo (MPC), e controle baseado em regras (RBC), destacam-se pela sua eficiência no manejo de águas pluviais em áreas urbanas densas. Estudos mostram que esses sistemas podem reduzir áreas inundadas em 30% a 50% e eliminar 60% a 100% das zonas de alto risco durante eventos extremos de chuva. Além disso, esses telhados oferecem redução de 5% a 15% nos picos de vazão, otimizando os processos de drenagem sem prolongar o tempo de escoamento (Zhou *et al.*, 2024).

A integração de sistemas de telhados verdes com tecnologias inteligentes, como sensores de controle contínuo adaptativo (CMAC), aumentou a retenção de chuva de 65,2% para 75,6% em testes, evidenciando sua eficácia em períodos de tempestades moderadas (Shetty *et al.*, 2022). Essas soluções também oferecem benefícios adicionais, como melhoria da eficiência energética em edifícios e maior biodiversidade urbana (Chen *et al.*, 2023). Os telhados verdes reduzem a transmissão térmica em até 40%, enquanto sistemas de telhados inteligentes contribuem para a resiliência climática, promovendo a reutilização de água (Vargova *et al.*, 2024; BRASIL *et al.*, 2021). Apesar das variações de desempenho dependendo do clima e do design, a integração dessas tecnologias em áreas urbanas representa um avanço promissor para a sustentabilidade e adaptação às mudanças climáticas.

As tecnologias aplicadas aos sistemas de telhados verdes, azuis e inteligentes desempenham um papel crucial na sua eficácia e viabilidade em contextos urbanos (Figura 6). Modelos hidrológicos avançados, como o SWMM, permitem prever com precisão a retenção e o escoamento, otimizando o design de telhados

verdes para diferentes intensidades de chuva e condições climáticas (Jean *et al.*, 2022). Além disso, tecnologias de controle em tempo real (RTC), como o Controle Preditivo de Modelo (MPC), ajustam dinamicamente a vazão em telhados azuis e sistemas inteligentes, mitigando picos de escoamento e reduzindo áreas inundadas ao aliviar as redes municipais (ZHOU *et al.*, 2023).

Figura 6 - Contagem de artigos por tipo de tecnologia



Fonte: Os autores (2024)

Diagrama de Venn sobre a quantidade de artigos e suas tecnologias aplicadas.

Segundo Chen *et al.* (2023), a integração de sensores IoT para monitoramento contínuo aprimora a gestão operacional dos sistemas, fornecendo dados em tempo real sobre condições de umidade, fluxo e capacidade de armazenamento. Essa abordagem permite ajustes precisos, aumentando a eficiência na retenção e reutilização de água. Já para Xie *et al.* (2021), as simulações e calibrações baseadas em dados de longo prazo, como o uso de algoritmos de aprendizado de máquina e modelos físicos aprimorados, possibilitam um planejamento mais robusto, adaptável a mudanças climáticas e às condições urbanas específicas. Essas tecnologias promovem uma integração eficiente dos sistemas na infraestrutura existente, maximizando seus benefícios ambientais e operacionais (Brasil *et al.*, 2021).

Os artigos destacam a importância de aprimorar a utilização de telhados verdes, azuis e inteligentes em áreas urbanas, com foco em estratégias tecnológicas e práticas sustentáveis que potencializem os benefícios ambientais, econômicos e

sociais. Para os telhados azuis, recomenda-se ampliar a cobertura das bandejas modulares e ajustar o tamanho dos orifícios de drenagem, visando otimizar a retenção e a detenção de águas pluviais (Campisano; Modica; Gullota, 2021). Essas melhorias são particularmente importantes para enfrentar eventos de precipitação intensa, assegurando maior consistência e eficiência do desempenho mesmo em condições climáticas extremas.

Os sistemas inteligentes devem explorar algoritmos preditivos baseados em modelos (MPC) e controles baseados em regras (RBC), que demonstram excelente desempenho na redução de áreas alagadas e zonas de alto risco durante eventos extremos de chuva (Shishegar *et al.*, 2021). Para ampliar a adoção em larga escala, é essencial implementar abordagens econômicas robustas, como incentivos fiscais, subsídios governamentais e concessões urbanísticas, além de desenvolver análises de custo-benefício abrangendo todo o ciclo de vida dos sistemas.

A integração de soluções baseadas na natureza (NBS) com tecnologias inteligentes, como sensores IoT, também é recomendada para aumentar a resiliência urbana e melhorar a eficiência energética (Chen *et al.*, 2023; Brasil *et al.*, 2021). Adicionalmente, pesquisas de longo prazo são necessárias para validar os benefícios dessas tecnologias, considerando cenários de mudanças climáticas e especificidades urbanas, enquanto políticas públicas devem incentivar a integração dessas soluções para promover sustentabilidade e eficiência no gerenciamento hídrico urbano.

Conclusão

Esta revisão sistemática da literatura permitiu identificar e avaliar a aplicação de diversas tipologias e tecnologias associadas a telhados inteligentes voltados para a sustentabilidade e a drenagem urbana. Embora o método apresente algumas limitações, foi possível destacar estudos com objetivos convergentes, centrados em soluções que mitigam inundações urbanas por meio de abordagens sustentáveis e tecnológicas. Telhados inteligentes utilizam tecnologias avançadas de controle em tempo real e sistemas preditivos, ajustando o fluxo de água de forma dinâmica para gerenciar eficientemente o escoamento durante chuvas intensas, reduzindo a extensão e a gravidade de inundações. A integração de sensores e algoritmos aprimora a capacidade de resposta às condições climáticas, prevenindo

sobrecargas nos sistemas de drenagem e fortalecendo a resiliência urbana a eventos extremos.

Os resultados evidenciam que a integração de tecnologias em telhados inteligentes apresenta elevado potencial para enfrentar desafios urbanos e ambientais relacionados à drenagem sustentável. Esses telhados promovem avanços significativos em três áreas principais: redução de inundações e alívio dos sistemas de drenagem, eficiência energética e conforto térmico, e planejamento urbano resiliente. Por meio de retenção e liberação adaptativas de água, diminuem a pressão sobre os sistemas de esgoto pluvial durante eventos de precipitação intensa, minimizando os riscos de enchentes em áreas densamente povoadas. Do ponto de vista ambiental, destacam-se benefícios como a melhoria da qualidade da água, a mitigação do efeito de ilha de calor e a conservação da biodiversidade urbana. As tecnologias empregadas permitem monitoramento contínuo e preciso, enquanto as camadas verde-azul otimizam a retenção de poluentes e a evapotranspiração, favorecendo tanto o controle térmico quanto a manutenção de ecossistemas urbanos.

19

Nesse contexto, os telhados inteligentes emergem como soluções inovadoras para a gestão sustentável de águas pluviais e uma abordagem integrada para enfrentar as mudanças climáticas, promovendo uma infraestrutura urbana adaptável e resiliente. Esta pesquisa sugere que telhados inteligentes são ferramentas estratégicas na construção de cidades mais sustentáveis e adaptativas, contribuindo para a preservação ambiental. No entanto, ainda há lacunas que demandam investigações mais robustas e longitudinais, voltadas à avaliação prática da eficácia e à implementação dessas tecnologias em cenários reais, considerando também suas limitações e desafios técnicos.

Referências

ANTMAN, Elliott M.; LAU, Joseph; KUPELNICK, Bruce; MOSTELLER, Frederick; CHALMERS, Thomas C. A Comparison of Results of Meta-analyses of Randomized Control Trials and Recommendations of Clinical Experts: Treatments for Myocardial Infarction. **JAMA**, v. 268, n. 2, p. 240-248, 1992. Disponível em: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/398415>. Acesso em: 04 dez. 2024.

BRASIL, José; MACEDO, Marina; LAGO, César; OLIVEIRA, Thalita; JÚNIOR, Marcus; OLIVEIRA, Tassiana; MENDIONDO, Eduardo. Nature-based solutions and real-time control: challenges and opportunities. **Water**, v. 13, n. 651, p. 1-18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13050651>. Acesso em: 01 dez. 2024.

BUSKER, Tim; DE MOEL, Hans; HAER, Toon; SCHMEITS, Maurice; VAN DEN HURK, Bart; MYERS, Kira; CIRKEL, Dirk Gijbert; AERTS, Jeroen. Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113750, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113750>. Acesso em: 22 nov. 2024.

Campisano, A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M., Vanrolleghem, P.A., 2013. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. **Urban Water J.** 10 (5), 300–311. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.763996>. Acesso em: 29 nov. 2024.

CAMPISANO, Alberto; MODICA, Carlo; GULLOTTA, Aurora. Long-term experiments for the evaluation of the potential for storm water control of modular blue roofs in Mediterranean climate. **Urban Water Journal**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 33–42, 2021. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1850807. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1850807>. Acesso em: 01 dez. 2024

CHEN, Tong; WANG, Mo; SU, Jin; IKRAM, Rana Muhammad Adnan; LI, Jianjun. Application of Internet of Things (IoT) Technologies in Green Stormwater Infrastructure (GSI): A Bibliometric Review. **Sustainability**, v. 15, n. 13317, p. 1-22, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151813317>. Acesso em: 01 dez. 2024.

FLETCHER, Tim D.; SHUSTER, William; HUNT, William F.; ASHLEY, Richard; BUTLER, David; ARTHUR, Scott; TROWSDALE, Sam; BARRAUD, Sylvie; SEMADENI-DAVIES, Annette; BERTRAND-KRAJEWSKI, Jean-Luc; MIKKELSEN, Peter Steen; RIVARD, Gilles; UHL, Mathias; DAGENAIS, Danielle; VIKLANDER, Maria. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>. Acesso em: 22 nov. 2024.

JEAN, Marie-Ève; MORIN, Camille; DUCHESNE, Sophie; PELLETIER, Geneviève; PLEAU, Martin. Real-time model predictive and rule-based control with green infrastructures to reduce combined sewer overflows. **Water Research**, v. 221, p. 118753, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118753>. Acesso em: 01 dez. 2024.

KIKUCHI, Alissa Yukari; BETTERI, Lucas Antonio; ARAÚJO, Liriane Soares de. **IoT – Internet das Coisas**: um levantamento sobre as tendências

tecnológicas atuais. *Interface Tecnológica*, v. 18, n. 2, 2021. DOI: 10.31510/inf.v18i2.1211. Disponível em: <https://doi.org/10.31510/inf.v18i2.1211>. Acesso em: 29 nov. 2024.

LASSERSON, T. J.; THOMAS, J.; HIGGINS, J. P. T. Capítulo 1: Iniciando uma revisão. In: HIGGINS, J. P. T.; THOMAS, J.; CHANDLER, J.; CUMPSTON, M.; LI, T.; PAGE, M. J.; WELCH, V. A. (editores). **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions versão 6.4** (atualizado em agosto de 2023). Cochrane, 2023. Disponível em: www.training.cochrane.org/handbook. Acesso em: 04 dez. 2024.

LIU, Wen; FENG, Qi; WANG, Rui; CHEN, Weiping. Effects of initial abstraction ratios in SCS-CN method on runoff prediction of green roofs in a semi-arid region. **Urban Forestry & Urban Greening**, [s.l.], v. 65, p. 127331, 2021. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127331. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127331>. Acesso em: 10 dez. 2024.

LIU, Wen; ENGEL, Bernard A.; FENG, Qi; LI, Ruolin. Simulating annual runoff retention performance of extensive green roofs: A comparison of four climatic regions in China. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 127871, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127871>. Acesso em: 01 dez. 2024.

OXMAN, Andrew D.; GUYATT, Gordon H. The science of reviewing research a. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 703, n. 1, p. 125-134, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb26342.x>. Acesso em: 04 dez. 2024.

PUMO, Dario; FRANCIPIANE, Antonio; ALONGI, Francesco; NOTO, Leonardo V. The potential of multilayer green roofs for stormwater management in urban area under semi-arid Mediterranean climate conditions. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 326, p. 116643, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116643. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116643>. Acesso em: 01 dez. 2024.

REY-MAHÍA, Carlos; ÁLVAREZ-RABANAL, Felipe Pedro; SAÑUDO-FONTANEDA, Luis Ángel; HIDALGO-TOSTADO, Mario; SUÁREZ-INCLÁN, Antonio Menéndez. An Experimental and Numerical Approach to Multifunctional Urban Surfaces through Blue Roofs. **Sustainability**, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 1815, 2022. DOI: 10.3390/su14031815. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14031815>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SHETTY, Nandan; WANG, Mark; ELLIOTT, Robert; CULLIGAN, Patricia. Examining How a Smart Rainwater Harvesting System Connected to a Green Roof Can Improve Urban Stormwater Management. **Water**, [s.l.], v. 14, n. 15, p.

2216, 2022. DOI: 10.3390/w14142216. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14142216>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SHISHEGAR, Shadab; DUCHESNE, Sophie; PELLETIER, Geneviève; GHORBANI, Reza. A smart predictive framework for system-level stormwater management optimization. **Journal of Environmental Management**, v. 278, p. 111505, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111505>. Acesso em: 01 dez. 2024.

VARGOVA, Alena; KÖHLER, Sally; HÖTZEL, Sarina; SCHRÖTER, Bastian; VRANAYOVA, Zuzana; KAPOSZTASOVA, Daniela. Transformation of Urban Spaces: The Impact of Green Roofs in Košice, Slovakia. **Sustainability**, [s.l.], v. 16, n. 1, p. 22, 2024. DOI: 10.3390/su16010022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16010022>. Acesso em: 07 dez. 2024.

WEBBER, James L.; FLETCHER, Tim; FARMANI, Raziye; BUTLER, David; MELVILLE-SHREEVE, Peter. Moving to a future of smart stormwater management: A review and framework for terminology, research, and future perspectives. **Water Research**, v. 218, p. 118409, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118409>. Acesso em: 22 nov. 2024.

XIE, Haowen; MARK, Randall; CHAU, Kwok-Wing. Green Roof Hydrological Modelling with GRU and LSTM Networks. **Research Square**, 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-922451/v1. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-922451/v1>. Acesso em: 10 dez. 2024.

XU, Wei D.; BURNS, Matthew J.; CHERQUI, Frédéric; FLETCHER, Tim D. Enhancing stormwater control measures using real-time control technology: a review. **Urban Water Journal**, v. 18, n. 2, p. 101-114, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1857797>. Acesso em: 01 dez. 2024.

YAN, Jing; ZHANG, Fan; ZHANG, Shouhong; LIU, Wen; ZHANG, Sunxun; LI, Ruixian; HE, Yingying; WANG, Kai. Stormwater retention capacity of blue-green roofs with various configurations: Observational data and modelling. **Journal of Hydrology**, v. 645, p. 132092, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132092>. Acesso em: 01 dez. 2024.

YANG, Ruyi; HU, Jingyu; LI, Zihao; MU, Jianli; YU, Tingzhao; XIA, Jiangjiang; LI, Xuhong; DASGUPTA, Aritra; XIONG, Haoyi. Interpretable machine learning for weather and climate prediction: A review. **Atmospheric Environment**, v. 338, p. 120797, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120797>. Acesso em: 22 nov. 2024.

ZHOU, Huaiyu; LI, Ruidong; LIU, Hailong; NI, Guangheng. Real-time control enhanced blue-green infrastructure towards torrential events: A smart

predictive solution. **Urban Climate**, v. 49, p. 101439, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101439>. Acesso em: 01 dez. 2024.

ZHOU, Huaiyu; QU, Yao; LIU, Hailong; NI, Guangheng. Smart roofs featuring predictive control: An upgrade for mitigating precipitation extreme-induced pluvial floods. **Journal of Environmental Management**, v. 365, p. 121504, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121504>. Acesso em: 01 dez. 2024.

NOTA

Publisher

Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-graduação em Projeto e Cidade. Publicação no Portal de Periódicos UFG.

As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

23

RECEBIDO EM: 09/04/2024

APROVADO EM: 01/12/2024

PUBLICADO EM: 26/12/2024