

IMPACTO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NA REDUÇÃO DE VAZÕES DE PICO EM BACIAS URBANAS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO CÓRREGO BONSUCCESSO (BELO HORIZONTE – MG)

Ademir Machado Ribeiro Filho¹; Guilherme Augusto Silva Santos²; Julia Alves de Souza³; Karolayne Cristiny Oliveira Silva⁴; Lucas Gustavo Oliveira Generoso Cotta⁵; Raianny Gonçalves Almeida⁶; Rayane Raissa Geralda Virgílio Das Dores⁷

RESUMO

O processo de urbanização das cidades tem sido marcado por desafios significativos, especialmente no que se refere à ocupação do território, que nem sempre ocorreu de forma planejada e segura. Esse crescimento, frequentemente desordenado, resultou em alterações no comportamento hidrológico das bacias urbanas, como o aumento das áreas impermeabilizadas, a intensificação do escoamento superficial e a redução das áreas de infiltração, fatores que contribuem para a ocorrência de inundações, alagamentos e enchentes. Nesse contexto, o presente trabalho analisou a aplicação de duas técnicas compensatórias, pavimento permeável e telhado verde, na sub-bacia do Ribeirão Bonsucesso, em Belo Horizonte, considerando dois cenários: a condição atual e uma condição futura com a implementação dessas soluções. Os resultados indicaram que a adoção das técnicas promove a redução das vazões de pico, evidenciando seu potencial na melhoria do desempenho da drenagem urbana e na mitigação dos impactos associados a eventos de precipitação intensa.

Palavras-Chave – Vazão de pico, bacia hidrográfica, técnicas compensatórias

ABSTRACT

The urbanization process of cities has been marked by significant challenges, particularly regarding land occupation, which has not always occurred in a planned and safe manner. This often disordered growth has led to changes in the hydrological behavior of urban catchments, such as increased impervious areas, intensified surface runoff, and reduced infiltration capacity, factors that contribute to the occurrence of flooding, waterlogging, and urban inundation. In this context, the present study analyzed the application of two compensatory techniques, permeable pavement and green roofs, in the Ribeirão Bonsucesso sub-basin, located in Belo Horizonte, considering two scenarios: the current condition and a future condition with the implementation of these solutions. The results indicated that the adoption of these techniques reduces peak flows, highlighting their potential to improve urban drainage performance and mitigate the impacts associated with intense rainfall events.

Key-words – Peak flow, watershed, compensatory techniques

ABSTRACT

- 1) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ademir.filho@aluno.ufop.edu.br
- 2) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), guilherme.ass@aluno.ufop.edu.br
- 3) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), julia.souza1@aluno.ufop.edu.br
- 4) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), lucas.gustavo@aluno.ufop.edu.br
- 5) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), karolayne.silva@aluno.ufop.edu.br
- 6) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), raianny.almeida@aluno.ufop.edu.br
- 7) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), rayane.dores@aluno.ufop.edu.br

INTRODUÇÃO

A intensificação da urbanização tem provocado alterações significativas no ciclo hidrológico, especialmente em áreas densamente ocupadas. A substituição de superfícies naturais por áreas impermeáveis reduz a capacidade de infiltração do solo e aumenta o escoamento superficial, contribuindo para a elevação da frequência e da intensidade de eventos de inundação em ambientes urbanos (Pinto, 2011).

Nesse contexto, a gestão tradicional da drenagem urbana, baseada predominantemente na condução rápida das águas pluviais, tem se mostrado insuficiente para mitigar os impactos decorrentes dessas transformações (Pinheiro, 2011). Como alternativa, destacam-se as chamadas técnicas compensatórias ou soluções baseadas na infiltração e retenção local, como pavimentos permeáveis e telhados verdes, que buscam restabelecer, ao menos parcialmente, as condições hidrológicas pré-urbanização (Castro, 2002).

Essas técnicas atuam diretamente na redução do escoamento superficial, promovendo maior infiltração, retenção temporária e atraso no pico de vazão. Sua aplicação tem sido amplamente discutida no contexto do planejamento urbano sustentável, especialmente em bacias urbanas de pequeno e médio porte, onde intervenções descentralizadas podem apresentar maior efetividade Pinto (2011).

Para a avaliação dos impactos dessas intervenções, métodos hidrológicos simplificados, como o proposto pelo Soil Conservation Service (SCS), por meio do parâmetro Curve Number (CN), são amplamente utilizados (USDA, 1957). Esse método permite estimar o escoamento superficial a partir das características de uso e ocupação do solo, possibilitando a simulação de cenários distintos e a análise comparativa entre condições atuais e alternativas de intervenção (Ponce; Hawkins, 1996; Nascimento, 2011).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise hidrológica da bacia do Ribeirão Bonsucesso, no município de Belo Horizonte (MG), avaliando os efeitos da implantação de técnicas compensatórias, especificamente pavimentos permeáveis e telhados verdes, sobre o escoamento superficial. Para isso, serão comparados cenários com base na variação do Curve Number (CN), considerando diferentes configurações de uso e ocupação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Etapa 1: Estabelecimento das características da bacia

A área de estudo corresponde à bacia do Córrego Bonsucesso, localizada na região do Barreiro, em Belo Horizonte (MG), integrante da bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas. Trata-se de uma bacia inserida em área urbana, sujeita a pressões decorrentes do crescimento desordenado e da ocupação intensiva do solo, fatores que contribuem para o aumento da impermeabilização, elevação do escoamento superficial e intensificação de eventos de inundação, além de sobrecarregar os sistemas de drenagem existentes. A Figura 1 apresenta a localização da bacia de estudo.

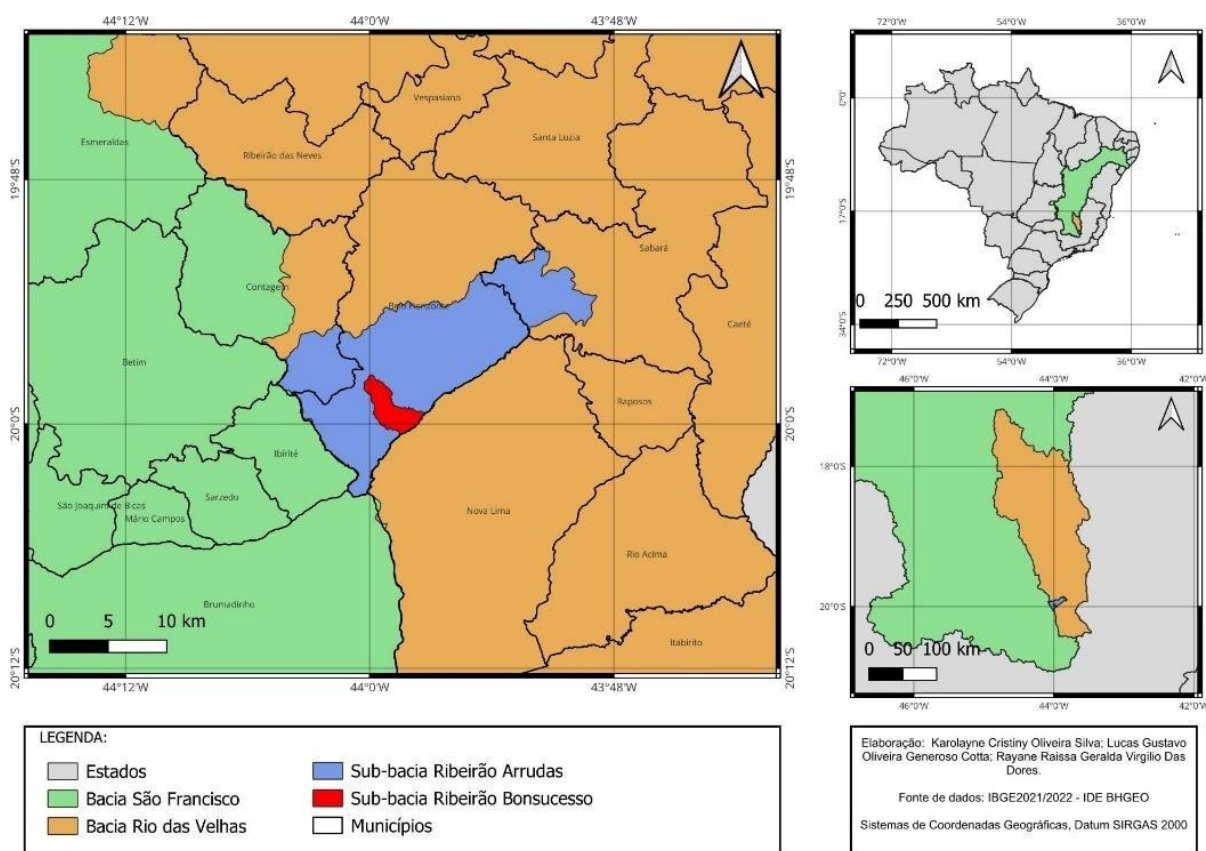


Figura 1- Mapa da localização da sub-bacia Ribeirão Bonsucesso.

Do ponto de vista morfométrico, a bacia apresenta forma alongada, com coeficiente de compacidade igual a 1,49 e fator de forma de 0,15. Esses parâmetros indicam menor suscetibilidade a inundações, uma vez que valores mais distantes da unidade estão associados a respostas hidrológicas menos concentradas. A Tabela 1 apresenta as principais características físicas da bacia.

Tabela 1: Informações da bacia do córrego Bonsucesso

Bacia	Área (km²)	Comprimento (km)	Declividade do rio principal (%)	Caracterização hidrológica
Ribeirão Bom Sucesso	11,78	8,801	2,02	90

Fonte: Os autores (2025).

O perímetro da bacia foi determinado a partir do comprimento total do divisor de águas, obtido com auxílio dos softwares BHMap e QGIS, resultando em 18,24 km. A área de drenagem foi calculada utilizando as mesmas ferramentas, totalizando 11,78 km².

Etapas 2: Definição dos modelos e parâmetros de simulação

Para a realização das simulações, foram utilizados dois softwares: o ABC6, para modelagem hidrológica da bacia, e o QGIS, para obtenção e processamento dos dados espaciais. A partir do QGIS, foram extraídos parâmetros como área da bacia, comprimento do curso principal e declividade, posteriormente inseridos no modelo hidrológico.

Considerando que a bacia de estudo se encontra em área predominantemente urbanizada, adotou-se, no software ABC6, a equação de Kirpich I para estimativa do tempo de concentração. O valor obtido foi de 1,6 horas, equivalente a 96 minutos. Para a discretização temporal do modelo, foi adotado o critério de 1/10 do tempo de concentração, resultando em um intervalo de 9,6 minutos. Em função das limitações do software, que admite apenas valores inteiros, foi utilizado o valor de 10 minutos para as simulações.

Etapas 3: Simulação da condição original

Para a simulação da condição original da sub-bacia do Ribeirão Bonsucesso, foram definidos os parâmetros hidrológicos necessários à representação do escoamento superficial, com destaque para o tempo de retorno e o Curve Number (CN). Foram adotados tempos de retorno de 10 e 50 anos, por representarem, respectivamente, condições usualmente associadas ao dimensionamento de estruturas de microdrenagem e macrodrenagem, além de permitirem avaliar a resposta hidrológica da bacia frente a eventos de precipitação de diferentes magnitudes.

O Curve Number foi estimado a partir da ponderação dos valores de CN associados a cada zona de uso e ocupação do solo presente na sub-bacia. Dessa forma, foi obtido um valor médio representativo para a área de estudo, considerando a contribuição proporcional de cada classe de zoneamento em relação à área total da bacia, conforme apresentado na Equação 1.

$$CN = \frac{CNz_1 \times Az_1 + \dots + CNzn \times Azn}{A_{total}} \quad (1)$$

Sendo: CN_{z1}: Curve number do zoneamento 1; Az₁: área do zoneamento 1; CN_{zn}: Curve number do zoneamento n; An: área do zoneamento n.

Assim, a Tabela 2 apresenta a descrição de cada zoneamento e seus respectivos CN e áreas.

Tabela 2 - CN de cada tipo de zoneamento da sub-bacia Ribeirão Bonsucesso.

Zona	Zona	CN
Zona de Proteção 1	1,98	87
Zona de Preservação Ambiental	1,60	86
Zonas de grandes equipamentos	0,88	94
Zonas de grandes equipamentos pilar	0,98	94
Zona de Especial Interesse Social 1	0,52	90
Zona de Especial Interesse Social 3	0,14	90
Zona de Adensamento Restrito 2	3,69	89
Zona de Adensamento Preferencial	0,25	90
Zona de arruamento	1,74	98
	Total	Média ponderada
	11,78	90

Fonte: Os autores (2025).

Etapas 4: Simulação da condição futura

Na sequência, foi realizada a simulação da condição futura da sub-bacia, considerando a implementação de técnicas compensatórias de drenagem urbana, com destaque para a adoção de telhados verdes e pavimentos permeáveis. A inserção dessas medidas teve como objetivo avaliar a influência de soluções baseadas na infiltração e retenção no comportamento hidrológico da bacia.

Para a definição das áreas de aplicação das técnicas compensatórias, foram adotados critérios espaciais e construtivos. O pavimento permeável foi considerado em vias locais e coletoras com largura superior a 10 m, respeitando-se ainda uma faixa de afastamento mínima de 30 m em relação aos cursos d'água, de modo a preservar as condições naturais das áreas ripárias. Já o telhado verde foi aplicado em edificações com área superior a 100 m², visando maior efetividade da técnica em termos de retenção volumétrica.

A adoção do telhado verde justifica-se pelos seus benefícios hidrológicos e ambientais, uma vez que essa técnica atua como uma superfície adicional de retenção, promovendo a interceptação e o retardamento do escoamento superficial. Como consequência, há redução do volume e do pico de vazão direcionados ao sistema de drenagem urbana. Adicionalmente, os telhados verdes contribuem para o isolamento térmico e acústico das edificações, além de auxiliarem na mitigação do efeito de ilhas de calor urbanas.

Para a representação hidrológica dessa técnica, foi adotado um valor de Curve Number (CN) igual a 70, compatível com telhados verdes extensivos com aproximadamente 8 cm de substrato, cobertura vegetal do tipo grama, baixa declividade e manutenção regular, conforme indicado por Pedrosa (2021).

O pavimento permeável, por sua vez, foi considerado como uma solução eficaz para promover a infiltração parcial da água pluvial, reduzindo o escoamento superficial direto. Além da

diminuição do volume escoado, essa técnica contribui para a melhoria da qualidade da água, uma vez que o processo de percolação atua na retenção de poluentes como metais pesados, óleos e material particulado (Thomle, 2010).

Para essa condição, foi adotado um valor de CN igual a 80, representativo de pavimentos asfálticos porosos com alguns anos de uso e submetidos a eventos de chuva de maior intensidade, conforme Castro et al. (2013), buscando aproximar a simulação de condições reais de operação.

A partir da incorporação dessas técnicas, foi recalculado o Curve Number médio da bacia por meio de uma ponderação das áreas correspondentes às diferentes classes de uso e às áreas ocupadas pelas técnicas compensatórias, conforme apresentado na Equação 2.

$$CN = \frac{CN_{Z1} \times AZ_1 + \dots + CN_{Zn} \times AZ_n + CN_{tv} \times Atv + CN_{pp} \times App}{A_{total}} \quad (2)$$

sendo: CN_{Z1}: Curve number do zoneamento 1; AZ₁: área do zoneamento 1; CN_{Zn}: Curve number do zoneamento n; An: área do zoneamento n; CN_{tv}: Curve number do telhado verde; Atv: área da bacia aplicado o telhado verde; CN_{pp}: Curve number do piso permeável; App: área da bacia aplicado o piso permeável; A_{total}: Área total da bacia.

Os valores de CN adotados para cada classe de uso do solo e para as técnicas compensatórias, bem como suas respectivas áreas, são apresentados na Tabela 3. A partir dessa ponderação, foi obtido um novo valor médio de CN igual a 88, refletindo a condição futura da bacia com a implementação das medidas propostas.

A partir da definição do novo conjunto de parâmetros hidrológicos, foi realizada a simulação da condição futura da sub-bacia, incorporando as técnicas compensatórias propostas. Essa simulação permitiu estimar as vazões geradas sob os mesmos cenários de precipitação adotados na condição atual, assegurando a comparabilidade entre os resultados. Dessa forma, essa etapa permite avaliar quantitativamente os efeitos das técnicas compensatórias no comportamento hidrológico da bacia, especialmente no que se refere à redução dos picos de vazão e do volume escoado, servindo de base para a comparação com a condição atual e para a análise da eficiência das soluções propostas na mitigação de problemas relacionados ao escoamento superficial.

Tabela 3 - CN de cada técnica

Zona	Zona	CN
Zona de Proteção 1	1,85	87
Zona de Preservação Ambiental	1,57	86
Zonas de grandes equipamentos	0,77	94
Zonas de grandes equipamentos pilar	0,85	94
Zona de Especial Interesse Social 1	0,45	90

Zona de Especial Interesse Social 3	0,12	90
Zona de Adensamento Restrito 2	2,99	89
Zona de Adensamento Preferencial	0,15	90
Zona de arruamento	1,43	98
Telhado verde	1,27	70
Asfalto permeável	0,33	80
Total	11,78	Média ponderada
		88

Fonte: Os autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da caracterização fisiográfica e dos parâmetros hidrológicos definidos para a sub-bacia do Ribeirão Bonsucesso, foram obtidas as variáveis necessárias à construção dos hidrogramas de cheia, com destaque para o Curve Number (CN), a área de drenagem, a declividade média e o comprimento do curso d'água principal, parâmetros fundamentais na determinação da resposta hidrológica da bacia.

Utilizando esses dados no software ABC 6 e considerando os tempos de retorno de 10 e 50 anos, foi inicialmente simulada a condição atual da bacia, adotando-se um CN igual a 90, conforme definido na Etapa 3. Os resultados indicaram vazões de pico de 74,97 m³/s para TR = 10 anos e 108,85 m³/s para TR = 50 anos, conforme ilustrado na Figura 2. Esses valores refletem uma resposta hidrológica rápida e com elevada geração de escoamento superficial, típica de bacias urbanizadas com altos níveis de impermeabilização.

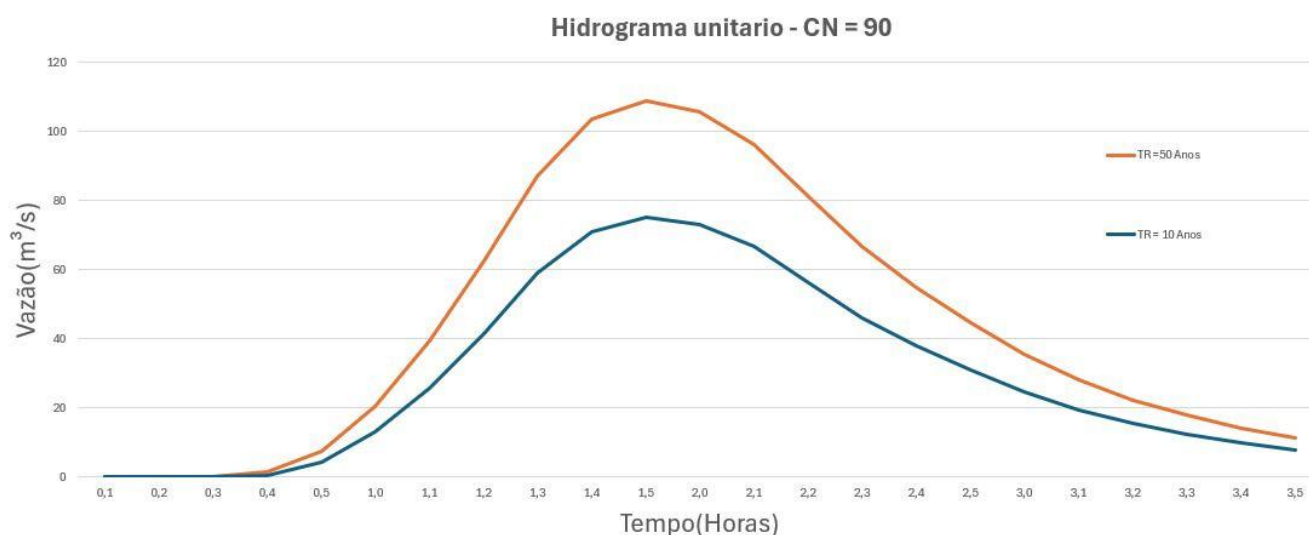


Figura 2 - Hidrograma da bacia de estudo com CN = 90 para os TR = 10 e 50 anos.

Na sequência, foi simulada a condição futura, incorporando as técnicas compensatórias propostas, com redução do CN para 88, conforme estabelecido na Etapa 4. Os hidrogramas resultantes (Figura 3) apresentaram vazões de pico de 67,28 m³/s para TR = 10 anos e 100,06 m³/s para TR = 50

anos. Observa-se, portanto, uma redução consistente nas vazões máximas em ambos os cenários analisados.

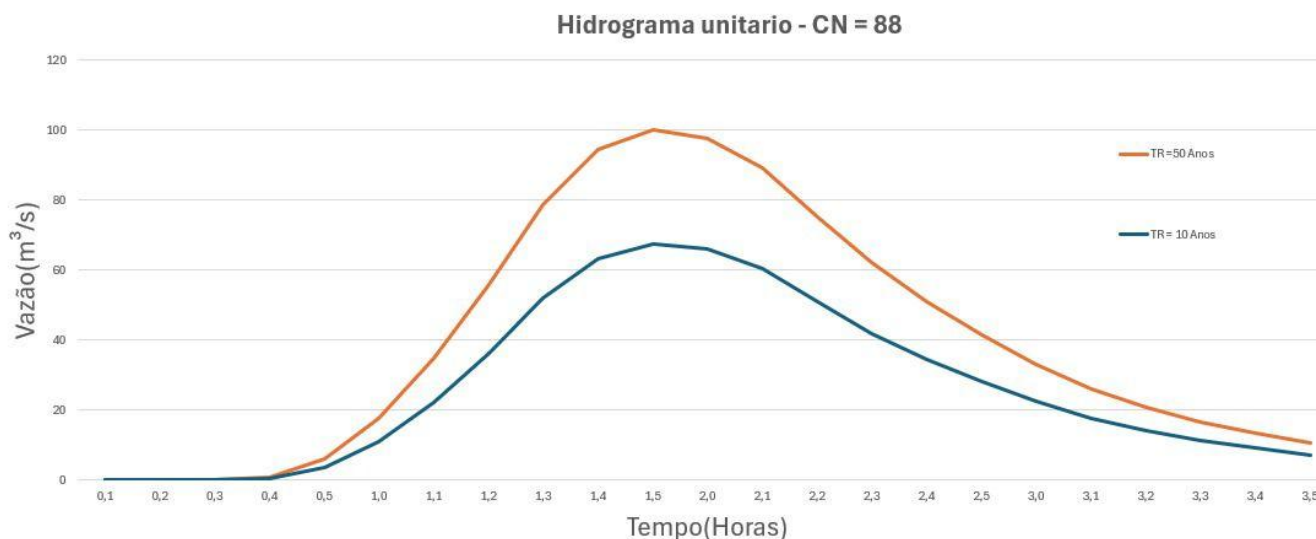


Figura 3- Hidrograma da bacia de estudo com CN = 88 para os TR = 10 e 50 anos.

A comparação entre os cenários evidencia reduções de aproximadamente 10,3% para o evento de 10 anos e 8,1% para o evento de 50 anos, indicando que a adoção das técnicas compensatórias promoveu uma atenuação efetiva do escoamento superficial. Embora a redução do CN de 90 para 88 possa parecer discreta, seus efeitos são expressivos do ponto de vista hidrológico, uma vez que esse parâmetro possui elevada sensibilidade na estimativa do escoamento direto. Esse comportamento reforça a importância de intervenções distribuídas na bacia, capazes de atuar na retenção e infiltração da água pluvial.

Além da redução das vazões de pico, a simulação da aplicação de técnicas compensatórias também contribuiu para o aumento do tempo de pico e o amortecimento do hidrograma. Tais efeitos são fundamentais para a redução da sobrecarga nos sistemas de drenagem e para a mitigação de inundações em áreas urbanas.

Do ponto de vista do planejamento urbano, os resultados obtidos demonstram que soluções como telhados verdes e pavimentos permeáveis, mesmo quando aplicadas de forma criteriosa e em áreas específicas, podem gerar benefícios hidrológicos relevantes. No entanto, observa-se que, apesar das melhorias, os valores de vazão ainda permanecem elevados, especialmente para eventos mais extremos, como o de 50 anos, evidenciando que tais medidas, isoladamente, podem não ser suficientes para o controle pleno das cheias.

Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de adoção de estratégias integradas de manejo de águas pluviais, combinando diferentes técnicas compensatórias e estruturais, bem como

ações de planejamento territorial. A utilização da modelagem hidrológica, nesse contexto, mostra-se essencial para subsidiar a tomada de decisão, permitindo avaliar cenários e otimizar a escolha de soluções para a mitigação dos impactos associados a eventos extremos em bacias urbanas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam a relevância da incorporação de técnicas de drenagem urbana sustentável para a mitigação dos impactos do escoamento superficial em bacias urbanas. A aplicação de telhados verdes e pavimentos permeáveis, considerando critérios específicos de inserção, resultou em reduções nas vazões de pico da ordem de 10,3% para o tempo de retorno de 10 anos e 8,1% para o de 50 anos, demonstrando sua eficácia na atenuação da resposta hidrológica. Esses resultados reforçam o potencial dessas soluções tanto em áreas urbanas consolidadas quanto em novos empreendimentos, especialmente quando integradas ao planejamento urbano e às políticas públicas de gestão de águas pluviais.

Entretanto, apesar das melhorias observadas, as vazões ainda se mantêm elevadas, indicando que a adoção isolada dessas técnicas pode não ser suficiente para o controle de eventos mais extremos. Assim, destaca-se a necessidade de estratégias integradas, combinando diferentes soluções e instrumentos de planejamento territorial. Ademais, ressalta-se a importância de estudos futuros voltados à aplicação dessas técnicas em diferentes escalas e contextos urbanos, com foco no aprimoramento de critérios de dimensionamento, avaliação de desempenho e viabilidade, de modo a consolidar sua adoção na gestão sustentável das águas urbanas.

REFERÊNCIAS

- CASTRO, A.S.; GOLDENFUM, J.A.; SILVEIRA, A.L.; MARQUES, D.M. (2013). “Avaliação da evolução do comportamento quantitativo de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial”. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos 18(1), pp. 263–273.
- CASTRO, L. A. de. Efeitos da urbanização sobre o escoamento superficial. Porto Alegre: ABRH, 2002.
- PEDROSA, I.S. (2021). Comparativo entre os coeficientes de escoamento de um telhado convencional e um telhado verde. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde – GO.
- THOMLE, J.N. (2010). The declining pH of waters exposed to pervious concrete. Dissertação (Mestrado), Washington State University, Pullman – WA, EUA.
- PINHEIRO, A. C. F. B. Hidrologia aplicada. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

PINTO, L. C. Controle de enchentes. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

PONCE, V. M. Engineering hydrology: principles and practices. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.

United States Department of Agriculture. *Soil Conservation Service*. Hydrology. Washington, D.C.: USDA, 1957. (National Engineering Handbook, Section 4).