

ANÁLISE DA EFICÁCIA DA APLICAÇÃO DE TELHADOS VERDES COMO ALTERNATIVA PARA ATENDER AS DIRETRIZES DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Juan Estevan Souza Cavalcante¹; Leonardo Nascimento de Souza²; Leonardo Lucas Santos Rondon³; Cristiano Gabriel Persch⁴

RESUMO

A expansão urbana desordenada e o uso inadequado do solo resultam no aumento da impermeabilização das superfícies, comprometendo o ciclo hidrológico. Assim, as técnicas compensatórias de drenagem surgiram como resposta às limitações ou ineficiência dos sistemas convencionais. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar e quantificar os efeitos da implantação do telhado verde como solução para atender às exigências de legislações e diretrizes locais de uso e ocupação do solo. O estudo propõe avaliar a eficácia do telhado verde na redução da vazão máxima e do coeficiente de escoamento. Para isso, a metodologia, baseou-se na modelagem no SWMM de um lote hipotético em diferentes cenários de ocupação e eventos pluviométricos. O cenário 4 e 5 (com telhado verde em 75% e 100% da área) tiveram vazão de pico menor do que a vazão máxima do cenário 2. O coeficiente de escoamento teve uma redução de 52,6%–73,2% para TR de 2 anos em relação a ocupação tradicional prevista pelos códigos de uso do solo do município (cenário 2). O telhado verde demonstrou ser uma solução eficiente na redução das vazões de máximas e coeficiente de escoamento atendendo às exigências das legislações e diretrizes locais.

Palavras-Chave: Modelagem, hidrologia urbana e telhado verde.

ABSTRACT

Uncontrolled urban expansion and inappropriate land use lead to increased surface impermeabilization, thereby compromising the natural hydrological cycle. In this context, compensatory drainage techniques have emerged as a response to the limitations and inefficiencies of conventional systems. Thus, this study aimed to evaluate and quantify the effects of implementing green roofs as a solution to comply with local land use regulations and guidelines. Additionally, the study assesses the effectiveness of green roofs in reducing peak discharge and runoff coefficients. The methodology was based on hydrological modeling using SWMM, applied to a hypothetical lot under different land use scenarios and rainfall events. Scenarios 4 and 5 (with green roofs covering 75% and 100% of the area, respectively) exhibited lower peak discharge values compared to the maximum discharge observed in Scenario 2. The runoff coefficient showed a reduction ranging from 52.6% to 73.2% for a 2-year return period, relative to the conventional land use scenario established by municipal regulations (Scenario 2). The results demonstrate that green roofs are an effective solution for reducing peak discharge and runoff coefficients, meeting the requirements established by local legislation and land use guidelines.

Keywords: Modeling, urban hydrology and green roof.

1) Engenheiro Sanitarista e Ambiental. E-mail: juan.estevan@outlook.com.br

2) Graduando do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). E-mail: leonardo.souza16@gmail.com

3) Docente do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) e do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). E-mail: cristiano.persch@ufmt.br

INTRODUÇÃO

A expansão urbana e o uso inadequado do solo resultam no aumento da impermeabilização das superfícies, comprometendo a capacidade de infiltração e armazenamento natural da água. Como consequência, há uma elevação na taxa e na velocidade do escoamento superficial, intensificando a frequência de eventos hidrológicos extremos, como enchentes e alagamentos (Canholi, 2014; Costa, 2022; Holzmann e Dallamuta, 2022).

A crescente preocupação com a destinação das águas no meio urbano levou ao desenvolvimento do conceito de drenagem sustentável, visando repensar o manejo das águas pluviais (Souza e Lima, 2019; Baptista *et al.*, 2011). As técnicas compensatórias de drenagem, surgiram como resposta às limitações ou ineficiência dos sistemas convencionais, visando reduzir o escoamento superficial sem causar impactos a jusante (Fletcher *et al.*, 2015). O telhado verde destaca-se por atuar na fonte do escoamento ou em áreas próximas, oferecendo um manejo localizado e em pequena escala para as águas pluviais. Esta técnica apresenta benefícios significativos na redução do escoamento superficial e promove benefícios ambientais para o ambiente urbano (Tassi, 2013; Santos *et al.*, 2020).

No município de Cuiabá, a Lei n.º 231/2011 que dispõe sobre o Uso, Ocupação e Urbanização do Solo Urbano, fornece as diretrizes técnicas e legais necessárias para garantir que as abordagens e parâmetros adotados estejam em conformidade com as regulamentações locais promovendo um ordenamento controlado e a prevenção da degradação ambiental.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e quantificar os efeitos da implementação do telhado verde como solução para atender às exigências de legislações e diretrizes locais de uso e ocupação do solo, por meio de um modelo simplificado implementado no SWMM (*Storm Water Management Model*). Além disso, o estudo propõe avaliar a eficácia do telhado verde na redução da vazão máxima, do coeficiente de escoamento e tempo de pico considerando os diferentes cenários de eventos pluviométricos.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo corresponde a um lote inserido na zona urbana mista (ZUM) da cidade de Cuiabá-MT. Conforme diretrizes estabelecidas pelo Lei n.º 231/2011 sobre o Uso e Ocupação do Solo do Município de Cuiabá a ocupação máxima permitida é de 50% da área total do terreno. A ocupação é amplamente representativa de zonas urbanas com alta densidade populacional e comum no perímetro urbano de Cuiabá. Além disso, a maximização da área construída, sem

comprometimento das condições ambientais, é crucial para garantir a viabilidade econômica do empreendimento e a otimização do uso e ocupação do solo.

Caracterização do lote urbano hipotético

O presente estudo, baseou-se na modelagem de um lote hipotético (sub-bacia) de área retangular com 300 m² (12m x 25m) que são medidas mais comuns na comercialização de loteamentos em Cuiabá. O lote em estudo considerou uma declividade média de 2%, baseando-se no manual de vias públicas do município de Cuiabá. Para a largura equivalente da sub-bacia utilizou-se o método do retângulo equivalente conforme descrito pelo Costa (2022). O lote possui uma taxa de ocupação variável com base nas estratégias de simulação implementadas e alinhadas com as normas municipais pertinentes.

Para os parâmetros hidráulicos da sub-bacia, foram adotados para os coeficientes de rugosidade de Manning em áreas impermeáveis (N-imperv) o valor de 0,015 e áreas permeáveis (N-perv) de 0,15 respectivamente (Porto, 2006). As perdas iniciais em áreas impermeáveis foram definidas em 0,5 mm e para áreas permeáveis o valor de 2,5mm (Epa, 2022). Para a porcentagem da área impermeável sem armazenamento de depressão adotou-se 25% conforme o estudo de Peng *et al.*, (2023). Para a infiltração utilizou a metodologia de Curva Número (SCS) proposto por Chow *et al.*, (1988). Adotou-se CN = 80 por representar uma condição típica de áreas urbanizadas implantadas sobre solos do grupo hidrológico B, visto que a área é composta por latossolos (Sartori et al., 2005; Embrapa, 2018), conforme valores recomendados pelo método SCS-CN.

Simulação hidrológica utilizando o SWMM

A partir do cenário de ocupação, a avaliação dos parâmetros hidrológicos foi realizada por um modelo simplificado implementado no software SWMM (*Storm Water Management Model*). O SWMM é um modelo hidrodinâmico de simulação de chuva-escoamento usado para simulação de evento único ou de longo prazo, amplamente utilizado para simulações de escoamento em áreas urbanas (Epa, 2022; Silva, 2016; Jeffers, 2022). Entre as principais vantagens, é sua capacidade de realizar simulações detalhadas, permitindo a análise de diferentes cenários de escoamento (Costa, 2022).

Cenários de Simulações

Para avaliar a dinâmica hidrológica do escoamento no SWMM foram definidos seis cenários de ocupação do lote, conforme pode ser observado na Figura 1:

- 1º Cenário: 100% do lote ocupado por área construída (impermeável);
- 2º Cenário: 50% do lote com área construída (impermeável) e 50% permeável – conforme legislação vigente;
- 3º Cenário: 100% de área construída (impermeável) com telhado verde ocupando 50% da área;
- 4º Cenário: 100% de área construída (impermeável) com telhado verde ocupando 75% da área;
- 5º Cenário: 100% de área construída (impermeável) com telhado verde ocupando 100% da área;
- 6º Cenário: Pré-ocupação com 100% de área permeável;

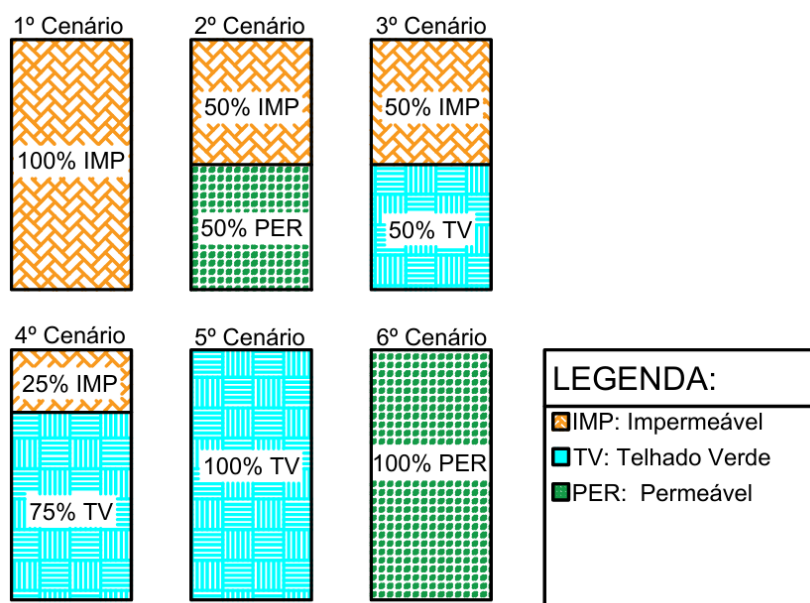


Figura 1 – Cenários de simulações adotados.

Fonte: Autores (2026).

Propriedades dos Telhados verdes

A técnica LID (telhado verde) foi adicionada ao lote e os parâmetros que caracterizam o telhado verde foram adotados baseados em valores recomendados pelo manual do SWMM (EPA 2022) conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de caracterização do Telhado Verde.

Solo	Espessura (mm) 100	Porosidade 0,44	Capacidade de campo 0,062	Ponto de Murcha 0,024	Condutividade (mm/h) 4,74	Coefficiente de variação da condutividade 45	Sucção Capilar (mm) 1,93
Camada de drenagem	Espessura (mm) 254	Fração nula 0,5	Rugosidade - (n – Manning) 0,1				
Superfície	Profundidade de Armazenamento (mm) 5	Rugosidade - (n – Manning) 0,1	Inclinação da superfície (%) 1				

Fonte: Autores (2026).

Chuva de Projeto

Para a definição das chuvas de projeto, utilizou a equação IDF (Equação 1) da cidade de Cuiabá (Castro *et al.*, 2011):

$$i = \frac{1016,453 * T_R^{0,133}}{(t+7,5)^{0,739}} \quad (1)$$

Onde: i é a intensidade da chuva (mm/h), T_R é tempo de retorno (anos) e t duração da chuva (min).

As chuvas de projeto foram definidas considerando tempos de retorno de 2, 5, 10, 25 e 50 anos. Para a duração da chuva (t) adotou-se um tempo 5 minutos, baseando-se no fato de ser a duração recomendada para projetos de águas pluviais (NBR 10844, 1989). A partir da curva IDF e para diferentes tempos de retorno, determinou-se a chuva de projeto empregando a metodologia dos Blocos Alternados.

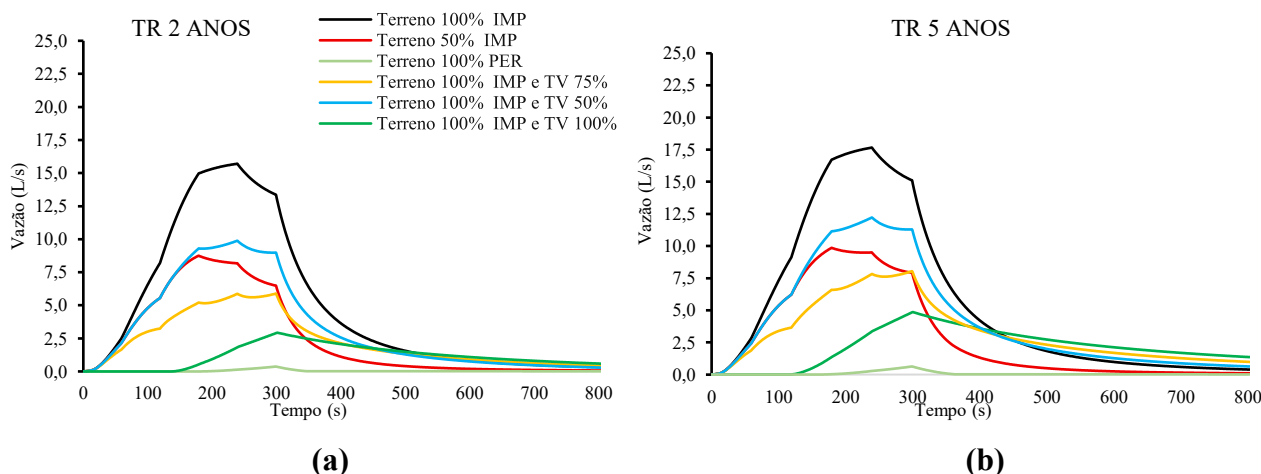
Avaliação dos parâmetros hidrológicos

A avaliação da dinâmica do escoamento se deu pela análise da vazão máxima, do coeficiente de escoamento e tempo ao pico considerando os diferentes cenários simulados e as precipitações de projeto. A vazão máxima (pico de escoamento) é decorrente da resposta hidrológica do lote devido a ocorrência da chuva (Chow *et al.*, 1988), o coeficiente de escoamento representa a relação entre o volume escoado superficialmente e o volume total precipitado (Tucci, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vazão Máxima

A Figura 2 exibe os hidrogramas de escoamento relacionando os diferentes cenários de ocupação e os respectivos tempos de retorno, sendo (a) TR de 2 anos; (b) TR de 5 anos; (c) TR de 10 anos; (d) TR de 25 anos e (e) TR de 50 anos.



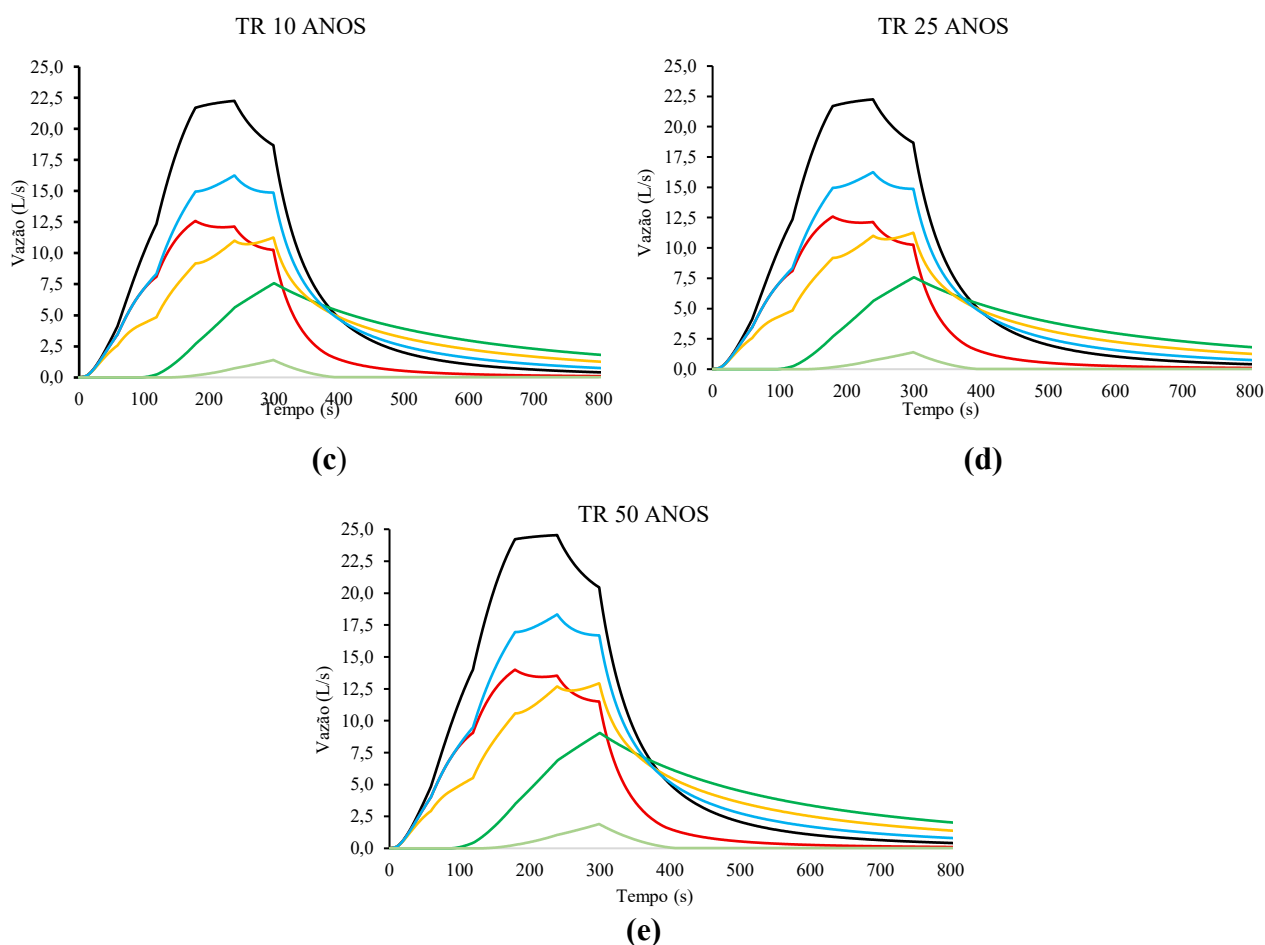


Figura 2 – Hidrograma de escoamento superficial para diferentes cenários de ocupação para (a) TR 2 anos, (b) TR 5 anos, (c) TR 10 anos, (d) TR 25 anos e (e) TR 50 anos.

Fonte: Autores (2026).

A Tabela 2 apresenta para o resumo das vazões máximas para os diferentes cenários para o tempo de retorno de (TR) de 2, 5, 10, 25 e 50 anos.

Tabela 2 - Vazão máxima para os diferentes cenários de impermeabilização.

Cenário Tempo de Retorno	TR 2 anos (L/s)	TR 5 anos (L/s)	TR 10 anos (L/s)	TR 25 anos (L/s)	TR 50 anos (L/s)
100% IMP	15,7	17,7	19,5	22,3	24,6
50% IMP e 50% PER	8,8	9,9	11,0	12,6	14,0
100% IMP e 50% TV	9,9	12,2	13,8	16,3	18,3
100% IMP e 75% TV	5,9	8,1	9,3	11,3	12,9
100% IMP e 100% TV	2,9	4,9	5,9	7,6	9,1
100% PER	0,4	0,6	0,9	1,4	1,9

Fonte: Autores (2026).

O primeiro cenário (100% impermeável), apresentou a maior vazão, o que evidencia a rápida geração de escoamento superficial em áreas completamente impermeabilizadas. No segundo cenário

(50% imp – 50% perv), em conformidade com a legislação, o terreno mostrou uma redução de ~44% da vazão máxima em comparação a condição de 100% impermeável. Ao integrar o telhado verde em 50% da área impermeável (3º cenário), observou-se uma redução menos acentuada na vazão máxima em comparação a condição de 75% e 100% com telhado verde. Porém, vale destacar que, principalmente para chuvas de menor magnitude, a vazão máxima se aproxima daquela observada no cenário exigido pela legislação. No quarto e quinto cenário, ao integrar o telhado verde em 75% e 100% do terreno impermeável, a vazão de pico foi menor que nos cenários anteriores, sendo um indicativo da eficácia do telhado verde no controle do escoamento superficial diretamente na fonte. Isso evidencia que um terreno integralmente ocupado com aplicação de telhado verde, a vazão de pico é menor do que a vazão máxima da ocupação tradicional prevista pelos códigos de uso do solo do município (cenário 2). Dessa forma, ocorre ganho econômico no sentido de permitir a ampliação da ocupação do lote, e mantendo os benefícios hidro ecológicos, com diminuição da vazão de escoamento.

Comparando-se cenários com as menores vazões (100% impermeável + 75% de telhado verde, e 100% impermeável + 100% de telhado verde) e maiores vazões (100% impermeável), houve uma redução da vazão máxima entre 81,4% e 63,2%, respectivamente.

Coeficiente de Escoamento

A Figura 3 apresenta a variação do coeficiente de escoamento para os diferentes cenários de impermeabilização e Períodos de Retorno (TR) de 2, 5, 10, 25 e 50 anos.

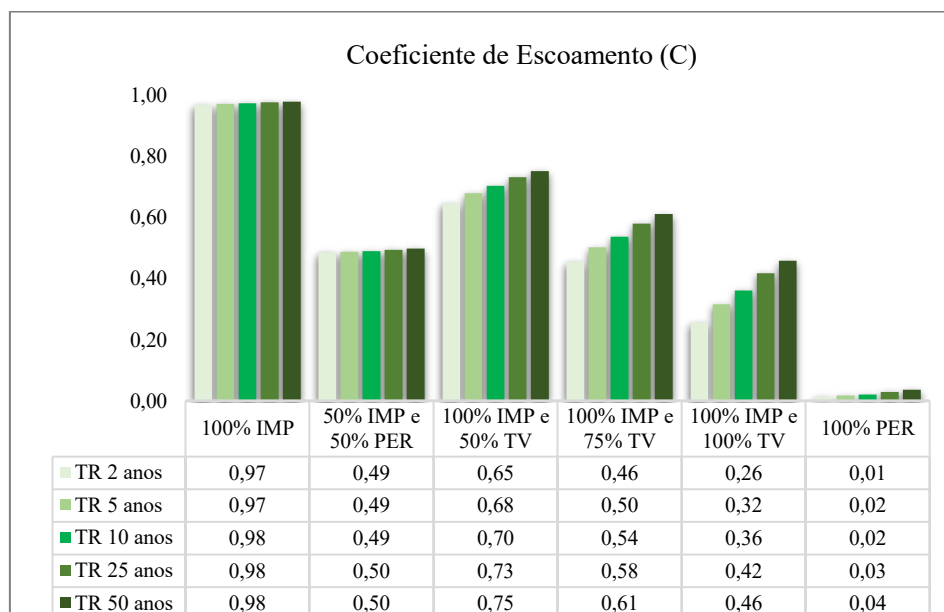


Figura 3 – Coeficientes de escoamento superficial para diferentes cenários de ocupação para TR 2, 5, 10, 25 e 50 anos.

Os resultados demonstram que o Coeficiente de Escoamento (C) varia significativamente conforme o tipo de cobertura superficial e o período de retorno analisado. No cenário totalmente impermeável (100% IMP), os valores de C permanecem elevados e praticamente constantes entre os períodos de retorno de 2 a 50 anos (0,97 a 0,98), indicando que a impermeabilização total do solo gera escoamento superficial máximo independentemente da frequência da chuva. Em contrapartida, o cenário totalmente permeável (100% PER) apresenta os menores coeficientes, variando de apenas 0,01 a 0,04, evidenciando a capacidade de infiltração do solo natural.

Os cenários intermediários, que combinam superfícies impermeáveis com telhados verdes (TV) ou áreas permeáveis (PER), revelam reduções expressivas no coeficiente de escoamento. A substituição de 50% da área impermeável por telhado verde ou por área permeável reduziu C para valores entre 0,49 e 0,73, dependendo do período de retorno. Notavelmente, mesmo em superfícies 100% impermeáveis com cobertura de telhado verde (100% IMP e 100% TV), os coeficientes caíram para a faixa de 0,26 a 0,46, demonstrando o papel relevante dos telhados verdes como medida de controle do escoamento urbano, especialmente em áreas densamente urbanizadas.

CONCLUSÃO

A simulação de diferentes cenários com a aplicação do telhado verde como técnica compensatória, comprovou a sua eficácia no contexto urbano de Cuiabá. O telhado verde demonstrou ser uma solução eficiente na redução das vazões de máximas, principalmente quando aplicada a 75% e 100% do lote, atendendo às exigências das legislações e diretrizes locais quanto ao controle de escoamento superficial.

Dessa forma, o estudo não apenas quantificou os benefícios da utilização do telhado verde no controle das vazões pluviais, como também confirmou a viabilidade de sua aplicação em áreas urbanas impermeabilizadas. Ao cumprir os requisitos de controle do escoamento, essa técnica mostrou-se eficaz e adaptável às demandas urbanísticas e ambientais, alcançando o objetivo de avaliar e quantificar os efeitos de sua implementação como uma solução sustentável para o gerenciamento do escoamento pluvial.

Diante desse contexto, os autores recomendam ainda outros esforços na investigação como a avaliação de eventos de chuva com maiores durações e a calibração do modelo SWMM com dados observados em campo. Além disso, as simulações foram realizadas em um cenário hipotético, demandando aplicação em casos reais para validação dos resultados. Recomenda-se a consideração de outros cenários e com outras características de configuração de telhados verdes, a fim de

compreender com maior precisão a real efetividade de telhados verdes aplicados no contexto urbano de ocupação e uso do solo.

AGRADECIMENTOS

Os Autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), a Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia (FAET) e a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelo apoio recebido na realização desse estudo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1989). “NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais”. Rio de Janeiro.
- BAPTISTA, M.B.; NASCIMENTO, N.O.; BARRAUD, S. (2011). *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2. ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.
- CANHOLI, A.P. (2014). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de Textos, São Paulo.
- CASTRO, A.L.P.; SILVA, C.N.P.; SILVEIRA, A. (2011). “Curvas intensidade-duração-frequência das precipitações extremas para o município de Cuiabá (MT)”. *Ambiência*, pp. 305–315.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- COSTA, T.F. (2022). “Aplicação do modelo SWMM para análise de inundações na área urbana de Itajubá” – MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Itajubá.
- CUIABÁ (MT). (2011). *Lei n.º 231/2011, dispõe sobre o uso, ocupação e urbanização do solo urbano*. Cuiabá: Câmara Municipal.
- EMBRAPA. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Embrapa, Brasília – DF
- FLETCHER, T.D. et al. (2015). “SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage”. *Urban Water Journal*, pp. 525–542.
- HOLZMANN, H.A.; DALLAMUTA, J. (2022). *Engenharias: criação e repasse de tecnologias*. Atena, Ponta Grossa – PR.
- JEFFERS, S. et al. (2022). “Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs”. *Journal of Water Management Modeling*.
- PENG, J. et al. (2024). “Parameter sensitivity analysis of SWMM: a case study of airport airfield area”. *Natural Hazards*, pp. 6551–6568.
- PORTO, R.M. (1998). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP.

SANTOS, L.B.; VIEIRA, C.L.; DUTRA, M.C.S. (2020). *Análise comparativa entre sistemas de drenagem convencional e a utilização de técnicas compensatórias em um condomínio residencial vertical*. In: Anais do XIII Encontro Nacional de Águas Urbanas.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (2005). “Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4.

SILVA, E. C. B. (2016). “Avanço da urbanização em Vicente Pires – DF: análise da rede de drenagem associada a medidas compensatórias utilizando o modelo SWMM e ABC”. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Brasília, Distrito Federal.

SOUZA, A.C.W.; LIMA, G.B. (2019). “Avaliação comparativa entre sistemas de drenagem convencional e drenagem sustentável: um estudo de caso no município de Santa Maria de Jetibá, ES”. Revista Interdisciplinar da Farese, pp. 69–90.

TASSI, R. et al. (2014). “Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais”. Ambiente Construído, pp. 139–154.

TUCCI, C. E. M. (2007). *Hidrologia: ciência e aplicação*. UFRGS Porto Alegre-RS

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). (2022). *Storm water management model user’s manual version 5.2*. Washington, DC: EPA.