

EFEITO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA (SBNs) NA DINÂMICA DO ESCOAMENTO EM UMA MICROBACIA URBANA

Dipietra Arantes de Oliveira¹; Leonardo Lucas Santos Rondon²; Leonardo Nascimento de Souza³; Cristiano Gabriel Persch⁴ & Rafael Pedrollo de Paes⁵

RESUMO – A urbanização aumenta a impermeabilização do solo e intensifica o escoamento superficial, elevando picos de vazão e riscos de alagamento. Neste contexto, o estudo avaliou a eficiência de Soluções baseadas na Natureza (SbNs), com foco em telhado verde e pavimento permeável, por meio de simulações no EPA SWMM em uma microbacia urbana de Cuiabá/MT. Foram simulados quatro cenários para chuvas com TR de 5 e 10 anos: sem SbNs, com pavimento permeável, com telhado verde e combinação das duas técnicas. Os resultados mostraram que individualmente o telhado verde apresentou reduções mais significativas das vazões de pico, enquanto o pavimento permeável teve efeito mais discreto. O cenário combinado apresentou o melhor desempenho, reduzindo aproximadamente 24% da vazão máxima em relação ao cenário sem SBNs. Conclui-se que as SBNs são estratégias promissoras e complementares à drenagem convencional no controle do escoamento superficial urbano.

Palavras-Chave – Soluções baseadas na Natureza; modelagem; hidrologia urbana.

ABSTRACT – Urbanization increases soil impermeability and intensifies surface runoff, raising peak flows and flood risks. In this context, the study evaluated the efficiency of Nature-Based Solutions (NBSs), focusing on green roofs and permeable pavement, through simulations in the EPA SWMM in an urban microbasin in Cuiabá/MT. Four scenarios were simulated for rainfall with retention times (RT) of 5 and 10 years: without NBSs, with permeable pavement, with green roofs, and a combination of the two techniques. The results showed that green roofs presented more significant reductions in peak flows, while permeable pavement had a more discreet effect. The combined scenario presented the best performance, reducing the maximum flow by approximately 24% compared to the scenario without NBSs. It is concluded that NBSs are promising and complementary strategies to conventional drainage in the control of urban surface runoff.

Key-words – Low Impact Development; modeling; urban hydrology

INTRODUÇÃO

A urbanização tem causado alterações no ciclo hidrológico natural, com destaque para o aumento da impermeabilização do solo e a consequente intensificação do escoamento superficial

1) Engenheira Sanitarista e Ambiental. E-mail: dipietraarantes00@gmail.com

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

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

4) 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

5) 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: rafael.paes@ufmt.br

(ANA, 2024; IPCC, 2022). A substituição de áreas vegetadas por superfícies impermeáveis, como telhados, calçadas e vias pavimentadas, reduz a capacidade de infiltração da água da chuva, aumentando o volume e a velocidade do escoamento, o que contribui para a sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana e, frequentemente, para a ocorrência de alagamentos (Tucci, 2008; SÃO PAULO, 2012).

Historicamente, a solução predominante é o uso de infraestrutura cinza (galerias, canais, sarjetas), eficiente para transportar rapidamente a água, mas limitada para lidar com a variabilidade e a severidade crescentes dos eventos extremos. Com o aumento da frequência e da intensidade desses eventos devido às mudanças climáticas, esses sistemas frequentemente se mostram insuficientes para garantir o escoamento seguro das águas pluviais (Tucci, 2008; IPCC, 2022).

Nesse contexto, a aplicação de Soluções baseadas na Natureza (SbN) buscam integrar o ambiente construído aos processos naturais do ciclo da água. Dentre essas soluções, em áreas urbanas, tipologias como telhados verdes e pavimentos permeáveis favorecem retenção, infiltração e evapotranspiração, atenuando picos e volumes de escoamento e oferecendo cobenefícios como a mitigação de ilhas de calor e incremento de serviços ecossistêmicos (Fletcher *et al.*, 2013; UNDRR, 2021; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2025).

Evidências científicas apontam para reduções consistentes do escoamento superficial e atrasos na ocorrência da vazão máxima quando SbN são adotadas, embora a magnitude do efeito dependa de clima, solo, intensidade/duração da chuva, parâmetros de projeto e manutenção (Stovin *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2021). Revisões e estudos de caso mostram que telhados verdes tendem a reter uma fração significativa da chuva enquanto pavimentos permeáveis aumentam a percolação e amortecem o hidrograma (Fioretti *et al.*, 2010; Water *et al.*, 2021). Entretanto, traduzir essas evidências para a escala de microbacia requer análises comparativas situadas, com método reprodutível e indicadores claros.

Para isso, a modelagem hidrológica com o uso do EPA SWMM é amplamente utilizada em estudos de hidrologia urbana, pois representa bem os processos de escoamento na superfície e a infiltração. Além disso, o modelo dispõe de módulos de SbN, entre eles Green Roof e Permeable Pavement (EPA, 2022). O software permite aplicar chuvas de projeto, comparar cenários e quantificar efeitos na vazão de pico, volume escoado e coeficiente de escoamento (Rossman, 2015; EPA, 2022).

Nesse contexto, o presente estudo propõe avaliar, por meio de simulações no SWMM, os efeitos da aplicação de SbN na dinâmica do escoamento de uma microbacia urbana. A justificativa deste trabalho reside na necessidade de investigar, por meio de simulações hidrológicas, a eficiência das

SbNs como solução complementar aos sistemas de drenagem urbana, evidenciando sua contribuição para o controle quantitativo das águas pluviais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A região de estudo compreende uma área urbana de 8,74 ha, correspondente ao Condomínio Rio Claro, com lotes de aproximadamente 150 m², localizado na região Leste de Cuiabá/MT, centrada com coordenadas 15°36'29,73"S e 56°1'21,44"W (Figura 1). O perímetro que representa os limites do condomínio corresponderá à microbacia de contribuição que será adotada para as simulações no modelo. A escolha pela referida área foi hipotética, sem relação direta com o condomínio, e por se julgar uma área que apresenta importantes características de ocupação que possam justificar a avaliação de SbNs.

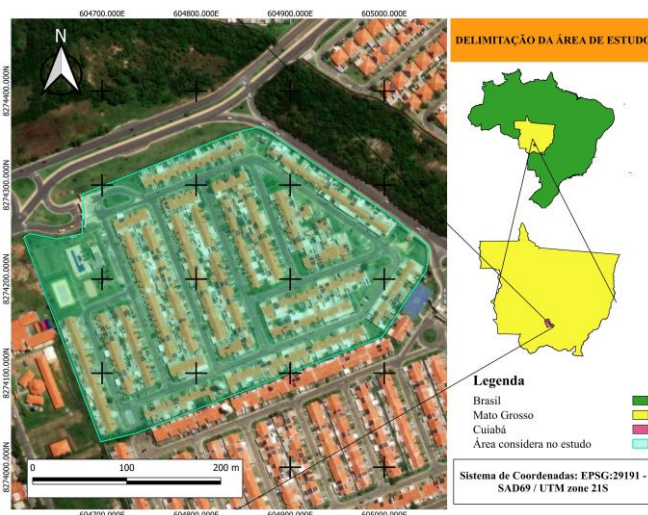


Figura 1 – Área de estudo.

Fonte: Autores (2026).

Do ponto de vista pedológico, o tipo de solo predominante no município de Cuiabá (MT) é classificado como Latossolos, especialmente Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, frequentemente profundos e bem drenados (EMBRAPA, 2018; EMBRAPA, 2011). Para fins de métodos de infiltração (método SCS-CN), esses solos se enquadram no Grupo Hidrológico de Solo (GHS) B, admitindo ajustes locais para GHS C quando houver maior teor de argila, compactação ou restrições à drenagem (Sartori *et al.*, 2005). Neste estudo, adotou-se o GHS B como condição de referência para a atribuição de parâmetros de infiltração. A partir do GHS B foi estimado o CN considerando uma umidade antecedente do solo na condição II, sendo definido como CN 85 uniformes para toda a área (Tucci, 1998). Para as análises da dinâmica do escoamento, foram

definidas chuvas de projeto elaboradas a partir da curva intensidade-duração-frequência com os parâmetros originais ajustados para cidade de Cuiabá (Leão, D. S. *et al.*, 2025).

Foi estabelecido chuvas com tempos de retorno de 5 e 10 anos (Silveira, 2006), embora não represente uma prática usual de projeto, a adoção de um tempo de retorno de 10 anos justifica-se pela intenção de submeter o sistema a condições pluviométricas mais severas, possibilitando uma avaliação mais criteriosa da eficiência dos telhados verdes em cenários extremos. Na definição das chuvas de projeto, optou-se por utilizar uma duração da chuva de 60 min, maior que o tempo de concentração estimado para a área (~10 min), o que permitiu avaliar o desempenho dos diferentes dispositivos quando submetidos a condições mais críticas. Essa abordagem já foi adotada por outros autores, a exemplo de Oliveira (2018).

Configuração da área de estudo no SWMM

Na implementação do modelo, assumiu-se uma única microbacia homogênea para isolar o efeito hidrológico das SBN sobre a resposta global da área de estudo. As SBN empregadas no estudo foram o telhado verde (TV) e pavimento permeável (PP), baseada no princípio de que sua implementação desempenha importante papel no manejo hidrológico urbano, retendo e detendo porções de precipitação direta para reduzir o escoamento superficial e prevenir inundações (Johannessen *et al.*, 2019). Após um mapeamento da superfície, foi definido a área de implantação de cada SBN, resultando em 29,3% da área com telhado verde e 4% da área com pavimento permeável. Em relação aos parâmetros das SBN, foram adotados valores de referência pelo manual do SWMM (EPA 2022) cujos valores são apresentados na Tabela 1 e 2.

Tabela 1 – Definição dos parâmetros e valores adotados para o módulo de telhado verde.

Camada	Parâmetro	Valor Adotado
Camada Superficial – Vegetação	Fração do volume da cobertura vegetal	0,5
	Rugosidade de Manning	0,1
	Declividade da superfície (%)	1
	Armazenamento superficial (mm)	5
Camada Solo	Espessura do substrato (mm)	100
	Porosidade (fração de volume)	0,7
	Capacidade de campo (fração de volume)	0,25
	Ponto de murcha (fração de volume)	0,1
	Condutividade saturada Ks (mm/h)	100
	Inclinação da condutividade	5
	Sucção capilar (mm)	100
Material da camada de drenagem	Espessura da manta/armazenamento (mm)	25
	Fração de vazio	0,5
	Rugosidade de Manning	0,1

Fonte: Autores (2026).

Tabela 2 – Definição dos parâmetros e valores adotados para o módulo do pavimento permeável.

Camada	Parâmetro	Valor Adotado
Camada Superficial	Rugosidade de Manning	0,014
	Declividade da superfície (%)	1
	Armazenamento superficial (mm)	5
Camada de Pavimento	Espessura (mm)	70
	Fração de vazio	0,15
	Fração superfície impermeável	0
	Permeabilidade efetiva (mm/h)	250
	Fator de colmatção	0
Camada do Solo (Areia)	Espessura (mm)	50
	Porosidade (fração de volume)	0,3
	Capacidade de campo (fração de volume)	0,2
	Ponto de murcha (fração de volume)	0,05
	Condutividade (mm/h)	120
	Inclinação de condutividade	5
Camada de Armazenamento	Sucção capilar (mm)	50
	Espessura do reservatório (mm)	300
	Fração de vazio	0,4
	Taxa de infiltração solo (mm/h)	50
	Fator de colmatção	0

Fonte: Autores (2026).

No módulo de sub-bacia do SWMM, alguns parâmetros precisaram serem definidos, tais como: área, largura média, porcentagem de área impermeável, coeficiente de rugosidade de Manning para áreas permeáveis e impermeáveis, armazenamento que ocorre nas depressões para áreas permeáveis e impermeáveis.

No que tange aos parâmetros de rugosidade superficial, utilizou-se o coeficiente de Manning (n -Imperv) de 0,015 para representar as zonas impermeáveis, enquanto o valor de 0,15 (n -Perv) para as superfícies permeáveis. As perdas iniciais em áreas impermeáveis foram padronizadas em 2,54 mm, e para as porções permeáveis, o valor de 5,1 mm, seguindo as recomendações técnicas de Rossman e Simon (2022). A infiltração no solo foi simulada por meio do método *Soil Conservation Service* (SCS), adotando-se o valor de 85 para a Curva Número (CN), baseado no tipo de solo e ocupação do empreendimento.

Para a simulação dos eventos, foram adotadas chuvas de projeto, cuja distribuição temporal adotou-se o Método de Blocos Alternados (Chow *et al.*, 1988). Foi estabelecido chuvas com tempos de retorno de 2 e 5 anos e duração total de 60 minutos (Silveira, 2006).

Para as simulações hidrológicas no SWMM (chuva-vazão) foram analisados quatro cenários: (i) microbacia sem SbNs (cenário base), (ii) com pavimento permeável, (iii) com telhado verde e (iv) combinação das duas técnicas.

Avaliação e análise hidrológica

Para a avaliação da dinâmica de escoamento em cada cenário de ocupação foram analisados a vazão máxima, coeficiente de escoamento e a eficiência específica por área tratada. A vazão máxima (vazão de pico) é consequência da resposta hidrológica da microbacia devido ao evento de precipitação; o coeficiente de escoamento representa a relação do volume escoado superficialmente e o volume total precipitado e a eficiência específica por área tratada obtida pela relação entre a redução da vazão de pico e a área efetivamente tratada pelas SBNs.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vazão máxima - microbacia

A Figura 2 exibe os hidrogramas de escoamento superficial para (a) o cenário base no TR de 5 e 10 anos, (b) cenários de uso das SbN com TR de 5 anos e (c) cenários de uso das SbN com TR de 10 anos.

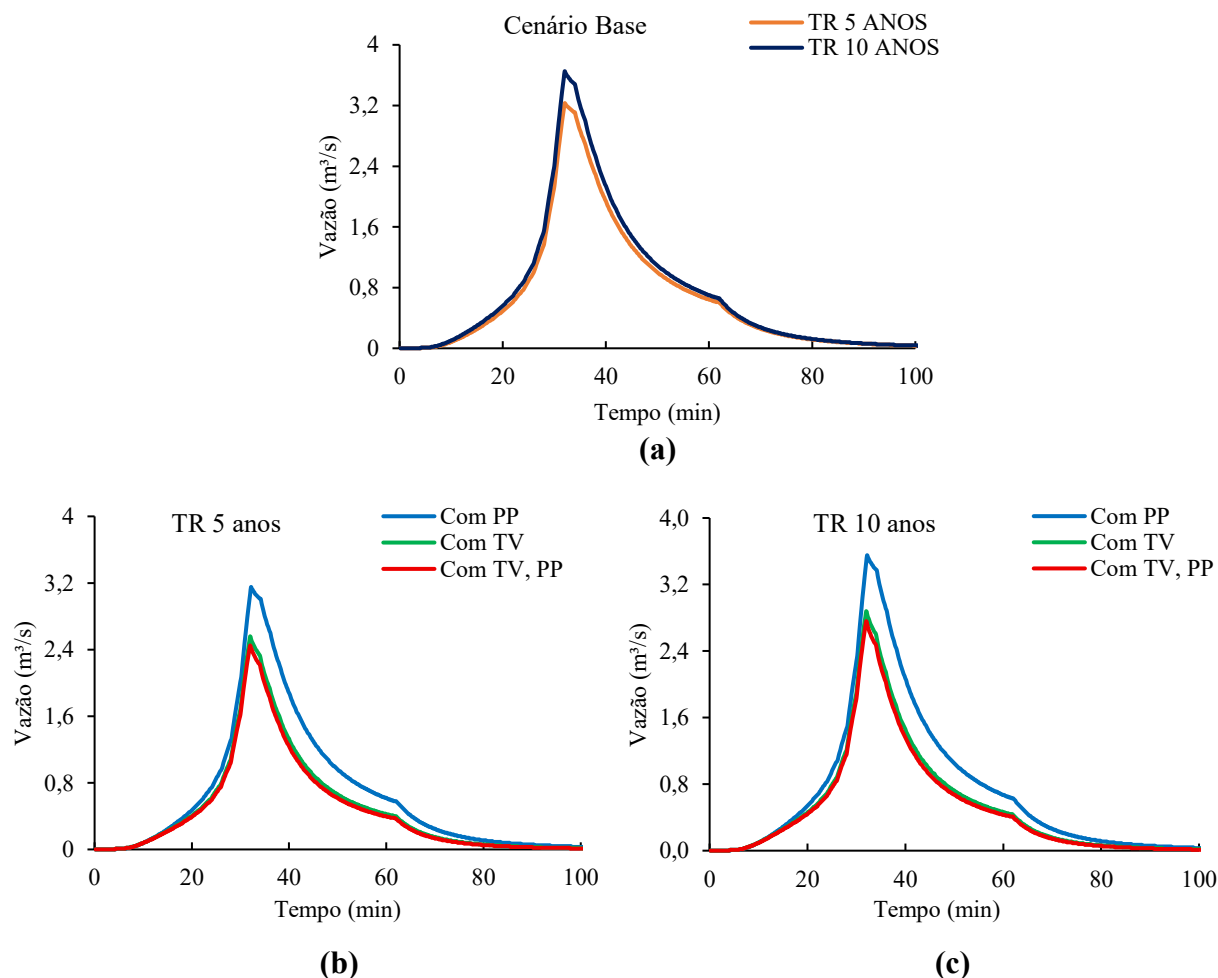


Figura 2 - Hidrograma de escoamento superficial para diferentes cenários de ocupação considerando TR 5 anos e TR 10 anos (Legenda: PP – Pavimento Permeável; TV – Telhado Verde).

Fonte: Autores (2026).

O cenário base resultou em vazões de pico de 3,23 m³/s para TR = 5 anos e 3,65 m³/s para TR = 10 anos. A elevação do pico no maior período de retorno é esperada, pois eventos mais raros tendem a apresentar maiores intensidades e lâminas precipitadas, aumentando o volume gerado e a taxa de contribuição ao exutório.

O cenário com pavimento permeável (PP) apresentou redução da vazão máxima em torno de 2,5–2,7%, respectivamente para TR de 5 e 10 anos. Isso pode ser explicado devido a escala e da fração de implantação do pavimento permeável em parcela limitada na área de estudo. O telhado verde (TV) se destacou como a técnica individual de maior eficiência hidrológica no conjunto analisado, apresentando reduções da vazão máxima na ordem de 21%. O desempenho superior do telhado verde, se deu possivelmente pela maior fração de área com cobertura efetivamente controlada (telhado verde) em comparação ao pavimento permeável. O cenário combinado (TV + PP) apresentou o melhor desempenho global entre todos os cenários analisados, com reduções de vazão máxima em torno de 24%. A superioridade do cenário combinado pode ser explicada pela complementaridade e similaridade dos mecanismos de atuação. O telhado verde reduz a geração de escoamento nas coberturas, enquanto o pavimento permeável atua sobre superfícies de circulação, ao somar os efeitos, o sistema passa a ter maior capacidade de retenção distribuída e maior potencial de reduzir tanto o pico quanto o volume total escoado.

Coefficiente de Escoamento

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

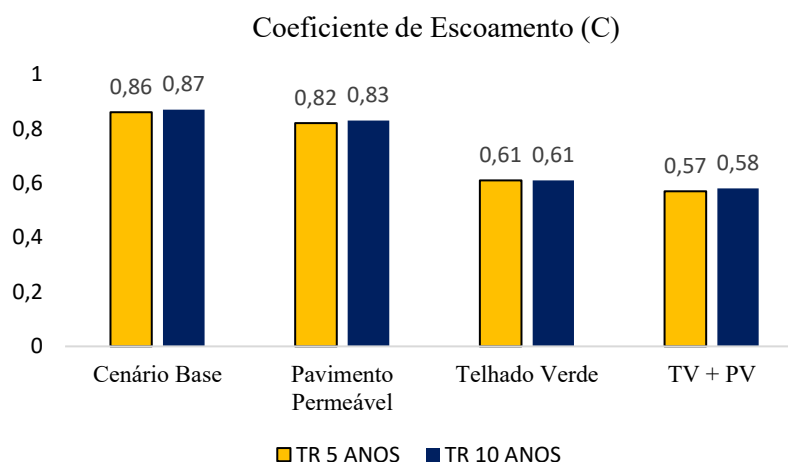


Figura 3 - Coeficiente de escoamento para diferentes cenários de ocupação para TR de 5 e 10 anos (Legenda: PP – Pavimento Permeável; TV – Telhado Verde).

Fonte: Autores (2026).

O cenário base apresentou coeficientes de escoamento elevados com $C = 0,86$ e $C = 0,87$ para TR de 5 e 10 anos respectivamente, evidenciam o efeito do alto grau de impermeabilização da área de estudo. O cenário com a implementação do pavimento permeável (PP) demonstrou pequenas reduções no coeficiente de escoamento próximo a 4% comparado ao cenário base. Em contrapartida, o cenário com telhado verde (TV) apresentou reduções de 29% no coeficiente de escoamento em ambos os tempos de retorno. Já o cenário combinado (telhado verde + pavimento permeável) apresentou melhor desempenho com reduções de 33% com $C = 0,57$ e $C = 0,58$ para TR de 5 e 10 anos respectivamente.

Avaliação da Eficiência das SBNs por área

A Tabela 3 apresenta a comparação entre as técnicas implantadas em frações diferentes da microbacia para TR de 5 e 10 anos.

Tabela 3 - Eficiência das SBNs por área.

Cenário	Eficiência TR=5 (m³/s/ha)	Eficiência TR=10 (m³/s/ha)
PP	0,23	0,29
TV	0,26	0,30
TV + PP	0,27	0,31

Fonte: Autores (2026).

A análise da eficiência das SBNs por área demonstrou que, embora o telhado verde tenha produzido reduções globais mais expressivas que o pavimento permeável, a eficiência por área apresentou valores próximos entre as duas técnicas. Isso indica que o desempenho inferior do pavimento permeável (PP) no resultado global está associado principalmente ao menor percentual de implantação adotado no cenário, e não a uma baixa capacidade da técnica. O cenário combinado (TV+PP) resultou em eficiência específica levemente superior, sugerindo efeito complementar das técnicas quando distribuídas em diferentes superfícies da microbacia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciaram que a adoção de SBNs melhoram o desempenho hidrológico da microbacia quando comparada ao cenário de referência (sem SBN). A análise da vazão máxima demonstrou redução do pico nos cenários com SBNs, com destaque para o telhado verde com reduções em torno de 21% e, principalmente, para o cenário combinado (telhado verde + pavimento permeável) com reduções na ordem de 24%. Em paralelo, a avaliação do coeficiente de escoamento do evento evidenciou diminuição na fração da precipitação convertida em escoamento no exutório, onde o

telhado verde teve reduções na ordem de 29%, e o cenário combinado com reduções de 33% para ambos os períodos de retorno, indicando maior capacidade de controle quantitativo do volume gerado.

Esses resultados corroboram a premissa de que Soluções baseadas na Natureza, ao incorporarem armazenamento temporário, retardamento e, quando aplicável, infiltração, contribuem para reduzir a conectividade imediata entre as superfícies impermeáveis e a rede de drenagem. Recomenda-se, em estudos futuros, ampliar a análise para diferentes tipologias de ocupação e períodos de retorno mais longos, a fim de consolidar a viabilidade da técnica em escala regional.

A modelagem adotada constitui uma representação simplificada de uma dinâmica complexa e integrada, resultante da interação entre fenômenos naturais e ações antrópicas. Dessa forma, os resultados aqui apresentados requerem calibração e validação com dados de eventos de chuva reais para maior aplicabilidade prática.

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

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2024). *Normas de referência para saneamento básico e drenagem urbana*. Brasília – DF, ANA.
- EMBRAPA. (2011). *O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos.
- EMBRAPA. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Brasília – DF, Embrapa.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2022). *Storm Water Management Model (SWMM) Version 5.2 User's Manual*. Cincinnati, EPA.
- FIORETTI, R. et al. (2010). “Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate”. *Building and Environment*, v. 45, n. 8, pp. 1890–1904.
- FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. (2013). “Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art”. *Advances in Water Resources*, v. 51, pp. 261–279.
- INSTITUTO TRATA BRASIL. (2025). *Soluções baseadas na natureza e drenagem urbana sustentável*. São Paulo: Instituto Trata Brasil.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.

LEÃO, D. S. et al. (2025). “*Curvas intensidade-duração-frequência para o município de Cuiabá/MT*”. Cuiabá: UFMT.

OLIVEIRA, D. A. (2018). *Avaliação hidrológica de técnicas compensatórias aplicadas à drenagem urbana. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)* – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.

ROSSMAN, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (EPA).

SÃO PAULO (Estado). (2012). *Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo*. São Paulo: SMDU.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (2005). *Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da infiltração e escoamento superficial*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, pp. 5–18.

SMDU – SECRETARIA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO. (2012). *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas*. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo.

STOVIN, V. et al. (2017). “*The influence of green roofs on runoff reduction in urban catchments*”. Journal of Hydrology, v. 552, pp. 879–892.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

UNDRR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. (2021). *Nature-based solutions for disaster risk reduction*. Geneva: United Nations.

WATER SILVA, M. et al. (2021). “*Avaliação do desempenho hidrológico de pavimentos permeáveis em áreas urbanas*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 26, pp. 1–12.

ZHENG, X.; ZHANG, S.; WANG, J. (2021). “*Hydrological performance of nature-based solutions for urban stormwater management: A review*”. Journal of Environmental Management, v. 286, pp. 112–132.