

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS DE TELHADO VERDE NO SWMM

*Lucas Henrique Coelho¹; Priscilla Macedo Moura²; Deyvid Wavel Barreto Rosa³ & Surya
de Moura Rhossard⁴*

RESUMO – A análise de sensibilidade em modelos hidrológicos permite identificar quais parâmetros exercem maior influência sobre os resultados simulados, contribuindo para a compreensão do modelo e para o direcionamento em etapas posteriores, como a calibração. Nesse contexto, esse trabalho realizou uma análise de sensibilidade de um modelo hidrológico de telhado verde construído no software SWMM, considerando dados físicos do telhado verde implantado na Universidade Federal de Minas Gerais, dados de precipitação e evapotranspiração potencial média diária. Para o modelo, foram avaliados parâmetros associados à camada de vegetação, substrato e à camada de drenagem, comparando seus efeitos sobre a vazão de pico, coeficiente de *Runoff* e o tempo de pico do hidrograma. Os resultados indicaram maior sensibilidade da vazão de pico à altura da camada de armazenamento, enquanto o coeficiente de *Runoff* foi mais influenciado pela espessura da camada de substrato. Além disso, o tipo de solo do substrato apresentou-se relevante para todos os resultados considerados na avaliação, sobretudo no tempo de pico do hidrograma, reforçando a importância da análise de sensibilidade como etapa preliminar à calibração do modelo.

Palavras-Chave – Telhado verde; SWMM; Análise de sensibilidade.

ABSTRACT – Sensitivity analysis in hydrological models allows the identification of which parameters exert the greatest influence on simulated results, contributing to the understanding of the model and to the guidance of subsequent stages, such as calibration. In this context, this study performed a sensitivity analysis of a green roof hydrological model developed in the SWMM software, considering physical data from the green roof installed at the University Federal of Minas Gerais, as well as precipitation data and daily average potential evapotranspiration data. For the model, parameters associated with the vegetation layer, substrate, and drainage layer were evaluated, comparing their effects on peak flow, runoff coefficient, and the time to peak. The results indicated greater sensitivity of peak flow to the storage layer height, while the runoff coefficient was more influenced by the thickness of the substrate layer. In addition, soil type proved to be relevant for all results considered in the evaluation, especially regarding the hydrograph time to peak, reinforcing the importance of sensitivity analysis as a preliminary step for model calibration.

Key-words – Green Roof; SWMM; Sensitivity analysis.

1) Afiliação: Discente do curso de graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), lucashc00@gmail.com;

2) Afiliação: Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), priscilla.moura@ehr.ufmg.br;

3) Afiliação: Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), dwbrosa@ufmg.br;

4) Afiliação: Discente do curso de graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), surya6b@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Telhados verdes podem ser vistos como um tipo de infraestrutura verde e azul, incorporando soluções naturais ao ambiente construído, contribuem para a provisão de serviços ecossistêmicos, auxiliando na gestão de águas pluviais e na manutenção da biodiversidade e promovendo conforto térmico, complementando ou substituindo as infraestruturas cinzas convencionais. São classificados como intensivos quando são construídos como jardins, apresentando usualmente substrato mais profundo, variedade de espécies vegetais e preocupação estética, sendo normalmente mais custosos; ou como extensivos, constituídos por camadas de isolamento, impermeabilização, substrato menos profundo e vegetação de pequeno porte, tendo menores custos de implantação e fácil manutenção (Oberndorfer et al., 2007).

No contexto atual, onde centros urbanos sofrem com consequências da expansão mal planejada somada à ocorrência frequente de eventos extremos, esse tipo de infraestrutura pode ser uma alternativa viável para a mitigação de problemas recorrentes de manejo de águas pluviais. No entanto, o desempenho hidrológico dos telhados verdes depende de sua configuração e do clima local. A modelagem hidrológica pode contribuir para avaliar esses fatores e auxiliar na predição da efetividade dessas estruturas em outras escalas e contextos. Modelos como o SWMM já sendo amplamente utilizados, entretanto a representação dos processos hidrológicos por meio dos parâmetros dos modelos pode variar conforme a representação das condições locais é realizada. Dessa forma, a utilização de dados de monitoramento para a calibração dos modelos permite uma representação mais assertiva do desempenho de telhados verdes em outros contextos.

Buscando artigos recentes onde a modelagem hidrológica fosse combinada com o monitoramento de telhados verdes, foram encontrados alguns exemplos, publicados entre 2019 e 2024 na plataforma Science Direct. Em Sims et al. (2019), telhados verdes extensivos localizados em Londres foram monitorados e um modelo numérico baseado na equação de Richards foi calibrado com os dados obtidos experimentalmente. Em Fleck et al. (2022) a performance hidrológica de um telhado verde em Sidney, foi avaliada com auxílio de dois softwares: DRAINS e SWMM. Na província de Gansu, na China, Liu et al. (2023) monitoraram nove módulos extensivos de telhado verde com diferentes características e um modelo próprio foi desenvolvido e calibrado a partir dos dados coletados. Por fim, a performance de mantas de drenagem foi monitorada e modelada com auxílio do SWMM por Abdalla et al. (2024), na Noruega. Os trabalhos levantados foram realizados em diferentes regiões e condições climáticas e demonstram o potencial da integração entre

monitoramento e modelagem, porém é perceptível a lacuna de experiências recentes para outras regiões. Nesse sentido, um trabalho de modelagem apoiado em dados monitorados de um telhado verde em Belo Horizonte está em desenvolvimento e o presente trabalho apresenta a análise de sensibilidade realizada, por meio da avaliação do impacto dos parâmetros de entrada sobre as respostas simuladas de um modelo hidrológico de telhado verde no SWMM, a partir de um evento de precipitação monitorado. A análise busca identificar os parâmetros de maior sensibilidade e contribuir para um processo de calibração mais consistente.

METODOLOGIA

Área de estudo

O telhado verde encontra-se implantado nas dependências da Universidade Federal de Minas Gerais. A edificação em estudo possui a cobertura subdividida em quatro setores, sendo que cada setor corresponde a uma configuração distinta de telhado verde. Em cada setor há um medidor de volume do tipo balança, que são interligados a um *data logger*, que registram os dados de volume escoado a cada 5 minutos. Próximo à estrutura, encontra-se também um pluviômetro do tipo balança, responsável por registrar as precipitações em intervalos de 2 a 3 minutos. Neste sentido, neste trabalho serão utilizados os parâmetros físicos do setor com vegetação exótica, caracterizado pela presença de substrato de terra vegetal e cultivo de *Plectranthus ornatus*, popularmente conhecido como boldinho. A área deste setor corresponde a 11 m² e tem declividade de 2%.

Modelo hidrológico

A construção do modelo hidrológico do telhado verde foi realizada no software Storm Water Management Model (SWMM) versão 5.1. O SWMM é um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão utilizado em estudos de manejo de águas pluviais urbanas, incluindo o mapeamento de inundações e a avaliação do desempenho de técnicas sustentáveis (ROSSMAN e HUBER 2016).

O SWMM permite a simulação específica de LIDs, dentre elas o telhado verde, que é representado por três camadas: a camada superficial que pode permitir o acúmulo de água acima do substrato e onde fica a parte aérea da vegetação; camada de substrato onde se fixam as raízes da vegetação e a camada de drenagem.

A análise de sensibilidade realizada envolveu dados físicos do telhado verde, parâmetros relativos ao *LID Controls* do telhado verde requeridos pelo SWMM, além de dados temporais de precipitação. Os parâmetros do modelo serão apresentados na próxima seção do artigo.

Os dados temporais de precipitação foram registrados pelo pluviômetro instalado próximo ao telhado. Gomes (2023) coletou dados de precipitação e vazão do período de 9 meses, entre 1º de setembro de 2021 e 31 de maio de 2022. Para compatibilizar e unificar os dados de precipitação e vazão em eventos, o autor estabeleceu que o início e o fim de cada evento estão relacionados, respectivamente, ao início da precipitação e ao registro da última basculada resultante do escoamento superficial. Os eventos de precipitação foram considerados finalizados após um intervalo de seis horas consecutivas de tempo seco, ou seja, sem ocorrência de escoamento pelo telhado. Nesse sentido, um único evento pode englobar múltiplas ocorrências de chuva. Dessa forma, para o presente trabalho foi considerado o evento ocorrido entre os dias 02/10/2021 e 03/10/2021, com precipitação acumulada de 46,07 mm, duração de 18,75 horas e intervalo de 14,6 horas desde a última precipitação do evento antecedente.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada adotando-se a variação individual de cada parâmetro utilizado pelo modelo para representação do telhado verde dentro de uma faixa de variação, previamente definida, mantendo-se os valores centrais dos demais parâmetros constantes. As faixas de variação foram estabelecidas a partir de recomendações da literatura e de dados físicos extraídos de campo. Os valores centrais de cada parâmetro foram definidos com base em informações físicas conhecidas do telhado verde em estudo, e, na ausência dessas informações, adotou-se o valor médio da faixa recomendada pela literatura. A Tabela 1 apresenta os valores considerados e suas respectivas faixas de variação.

Em relação à altura de armazenamento da camada de armazenamento, adotou-se uma discretização mais refinada para valores inferiores a 1,5 cm, visto que, a partir de 3,0 cm não ocorre vertimento no telhado para o evento utilizado na calibração, e a vazão de pico passa a ser condicionada exclusivamente pela drenagem de fundo.

Cabe ressaltar que os dados de entrada referentes ao substrato, tratam-se de parâmetros fisicamente correlacionados. Dessa forma, seguindo as premissas estabelecidas por Rossman e Huber (2016), variáveis como porosidade, capacidade de campo e ponto de murcha foram tratadas como propriedades intrínsecas ao tipo de substrato e foram variadas conjuntamente. A espessura da camada do substrato foi discretizada em intervalos menores na faixa de valores compreendida entre 0,4 e 10 cm, enquanto valores superiores a 10 cm, apresentaram maiores intervalos de discretização. Essa condição de variação possibilita compatibilizar com os valores indicados pela Instrução Técnica para

Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem de Belo Horizonte, a serem analisados posteriormente com a utilização do modelo que está em desenvolvimento.

Tabela 1 – Parâmetros considerados para a análise de sensibilidade.

Parâmetro	Intervalo de valores	Valor de referência	Faixa de variação
Altura de armazenamento	0 – 100 (mm)	15 mm	-100 a 567 (%)
Volume de vegetação	0 - 0,4	2	-100 a 100 (%)
Manning da superfície	0,05 - 0,35	0,2	-75 a 75 (%)
Declividade da superfície	0,5 – 10 (%)	3,4 %	-75 a 400 (%)
Espessura da camada de substrato	40 – 1.000 (mm)	100 mm	-60 a 900 (%)
Condutividade hidráulica	0,25 – 120,37 (mm/h)	1,52 mm/h	-84 a 7.819 (%)
Inclinação da condutividade	30 – 60 (%)	45 %	-33 a 33 (%)
Espessura da camada de drenagem	5 – 25 (mm)	10 mm	-50 a 150 (%)
Volume de vazios	0,3 - 0,99	0,8	-63 a 24 (%)
Manning da camada de drenagem	0,05 - 0,5	0,2	-75 a 150 (%)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise de sensibilidade foram comparados em relação à vazão de pico, o tempo ao de pico e o coeficiente de *runoff*, para cada simulação.

Vazão de pico

Observa-se, nos resultados do modelo relativos à vazão de pico, indicados na Figura 1, maior sensibilidade em relação à altura de armazenamento da camada superficial, especialmente para valores inferiores à 150 mm, nos quais a vazão de pico apresenta comportamento inversamente proporcional ao aumento da altura. Verifica-se, ainda, sensibilidade da vazão de pico aos parâmetros como o volume de vegetação e a declividade da superfície, para os quais o aumento dos valores de cada parâmetro resultam na elevação da vazão de pico. Em menor escala, a declividade e a espessura da camada de substrato apresentaram parcial influência sobre a sensibilidade à vazão de pico.

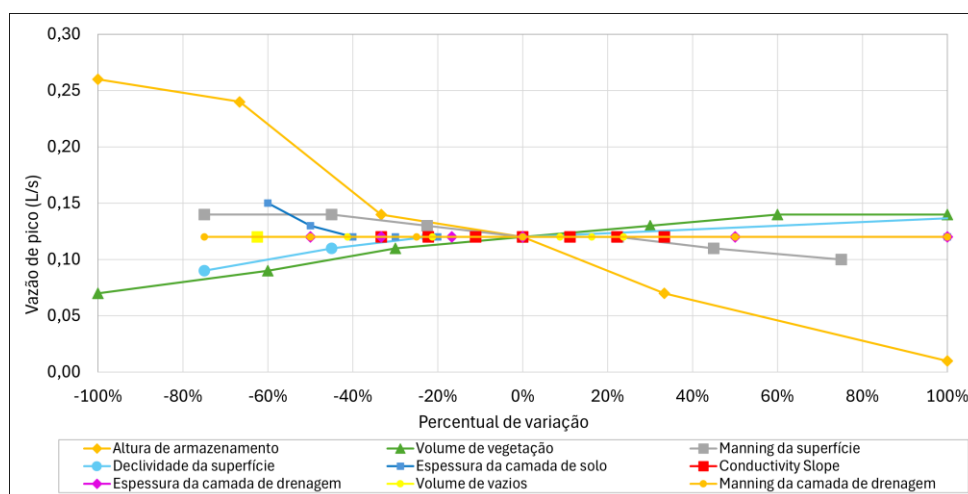
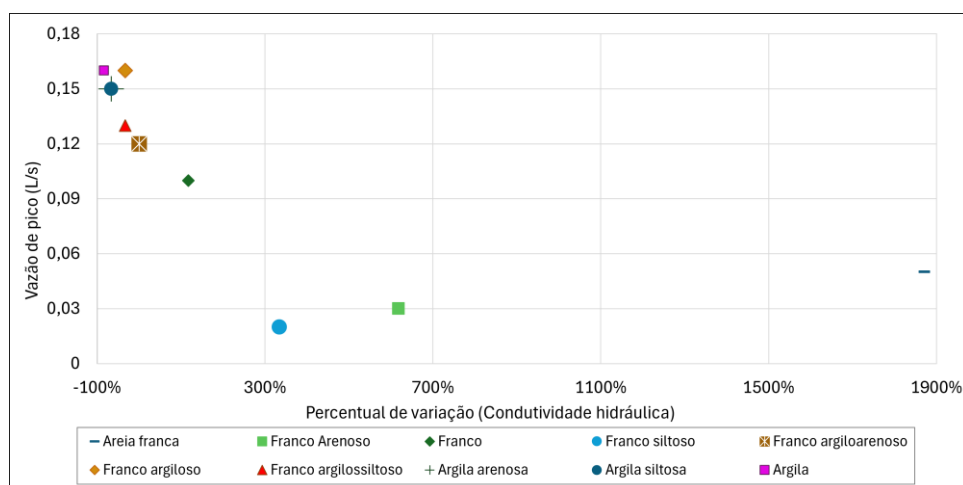


Figura 1 – Resultado da análise de sensibilidade da vazão de pico.

Quanto ao tipo de solo, ilustrado pela Figura 2, observa-se a redução da vazão de pico quanto a solos mais argilosos. Na representação gráfica da variação percentual, a condutividade hidráulica foi escolhida como parâmetro a ser exibido. Ainda, para fins de adequação da representação, o solo do tipo Areia não foi exibido no gráfico devido à maior variação percentual de sua condutividade hidráulica, embora tenha apresentado sensibilidade semelhante a areia franca quanto à vazão de pico. Os demais parâmetros analisados não apresentaram impacto significativo sobre a vazão de pico.



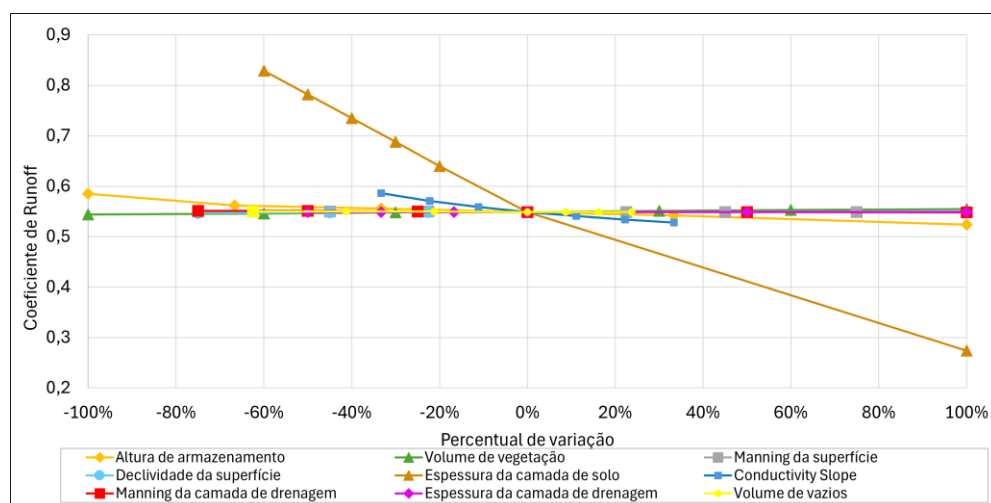


Figura 3 – Resultado da análise de sensibilidade do coeficiente de *Runoff*.

Observa-se também variação significativa da sensibilidade quanto ao tipo de solo, na qual solos mais arenosos apresentaram menor escoamento superficial, indicando maior volume de precipitação infiltrado comparado a solos mais argilosos. A análise de sensibilidade quanto ao coeficiente de *runoff* associado ao tipo de solo é ilustrada pela Figura 4.

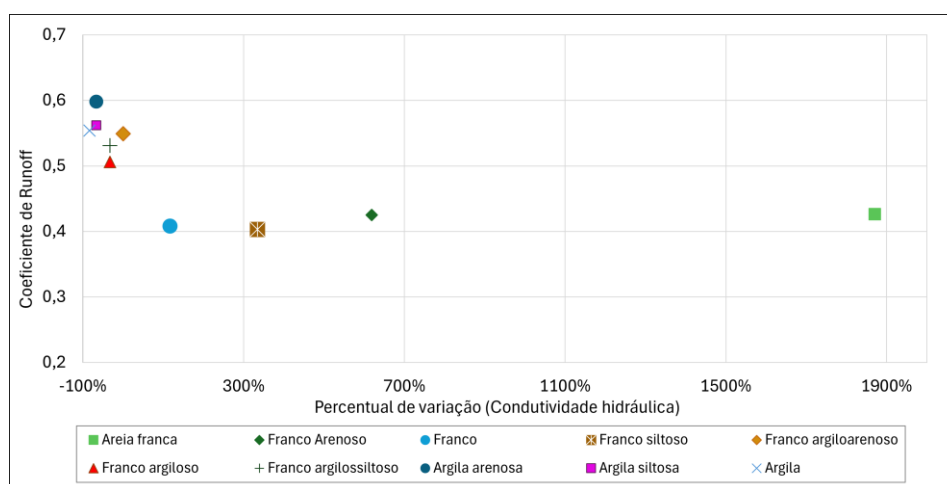


Figura 4 – Resultado da análise de sensibilidade do coeficiente de *Runoff* quanto ao tipo de solo. Os valores percentuais do gráfico são relativos à condutividade hidráulica.

Em menor nível, o “conductivity slope” (inclinação da curva de condutividade hidráulica em função do déficit de umidade do solo) apresentou sensibilidade moderada, com variação negativa do coeficiente de escoamento superficial em função do aumento deste parâmetro. O aumento desse parâmetro esteve relacionado à redução do coeficiente de runoff, resultado que pode estar associado à relação entre umidade do solo e condutividade hidráulica, influenciando a percolação da água no substrato e, consequentemente, reduzindo o coeficiente de *runoff*. Os demais parâmetros analisados não apresentaram influência significativa sobre o coeficiente de *runoff*.

Tempo ao pico

Em relação aos parâmetros de maior sensibilidade quanto ao tempo ao pico, destaca-se o tipo de solo, conforme apresentado na Figura 5, sendo observada maior sensibilidade relativa a solos mais arenosos. A altura de armazenamento apresenta tendência de variação negativa, indicando que menores valores desse parâmetro estão associados à antecipação do pico de vazão no hidrograma. Os demais parâmetros analisados não promoveram alterações significativas no tempo de ocorrência da vazão de pico.

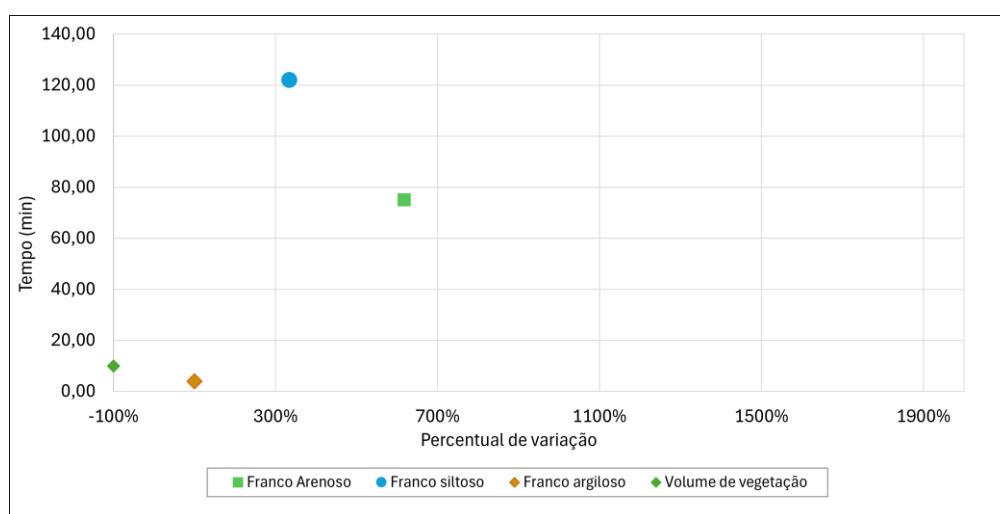


Figura 5 – Resultado da análise de sensibilidade do tempo ao pico por tipo de solo.

Em síntese, a Tabela 2 apresenta os resultados da análise de sensibilidade discutidos anteriormente, atribuindo a cada parâmetro um nível de influência observado sobre a vazão de pico, o coeficiente de *runoff* e o tempo ao pico.

Tabela 2– Síntese dos resultados da análise de sensibilidade.

Parâmetro	Efeito na vazão de pico	Efeito no coeficiente de runoff	Efeito no tempo ao pico	Comentários
Altura de armazenamento	Diminuição significativa	Diminuição moderada	Sem efeito observado	Com valores superiores a 30 mm, o modelo considera saída de escoamento apenas pelo dreno de fundo, sem extravasamento no telhado;
Volume de vegetação	Aumento significativo	Sem efeito observado	Diminuição moderada	Implica aumento significativo na vazão de pico até 0,2;
Manning da superfície	Diminuição moderada	Sem efeito observado	Sem efeito observado	O aumento do manning implica redução da vazão de pico;
Declividade da superfície	Aumento moderado	Sem efeito observado	Sem efeito observado	Declividade superior a 2% não implica mudança na vazão de pico;

Parâmetro	Efeito na vazão de pico	Efeito no coeficiente de runoff	Efeito no tempo ao pico	Comentários
Espessura da camada de substrato	Sem efeito observado	Diminuição significativa	Sem efeito observado	Valores superiores a 70 mm não causam efeito a vazão de pico;
Condutividade hidráulica	Diminuição significativa	Diminuição significativa	Aumento significativo	A condutividade associada ao tipo de solo é o parâmetro mais sensível sobre todos os resultados avaliados no modelo;
<i>Conductivity Slope</i>	Sem efeito observado	Diminuição moderada	Sem efeito observado	A redução implica na redução do escoamento superficial;
Espessura da camada de drenagem	Diminuição moderada	Sem efeito observado	Sem efeito observado	O aumento da espessura implica na redução da vazão de pico;
Volume de vazios	Diminuição moderada	Sem efeito observado	Sem efeito observado	O aumento da porosidade implica na redução da vazão de pico;
Manning da camada de drenagem	Diminuição moderada	Sem efeito observado	Sem efeito observado	O aumento do manning implica na redução da vazão de pico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A partir das simulações realizadas, verificou-se que os parâmetros associados à camada de armazenamento e aos parâmetros da camada de substrato apresentaram maior impacto sobre os resultados do modelo. De modo geral, a altura de armazenamento se destacou na resposta da vazão de pico, enquanto a espessura da camada de substrato apresentou maior influência sobre o coeficiente de *runoff*. Além disso, o tipo de solo, representado pela condutividade hidráulica, mostrou-se relevante para todos os resultados do modelo avaliados, sobretudo em relação ao tempo ao pico do hidrograma. Esses resultados são compatíveis com os obtidos por Jeffers et al. (2022), que obtiveram como parâmetros mais sensíveis a espessura e a porosidade do substrato do modelo de telhado verde no SWMM, em teste de sensibilidade de um telhado verde de bancada. Outros autores (Tansar et al., 2023), que analisaram a sensibilidade de parâmetros do SWMM em um telhado verde conceitual encontraram como parâmetros mais sensíveis a espessura do substrato, volume da vegetação e altura de armazenamento.

A partir dos resultados obtidos será possível a definição de estratégias de calibração manual do modelo que se baseiem em um ajuste inicial dos parâmetros mais sensíveis e posterior refinamento com calibração dos parâmetros menos sensíveis. Além disso é possível a ampliação da análise realizada para outros eventos de precipitação, com diferentes intensidades, durações e condições antecedentes de chuva, a fim de compreender melhor o comportamento do modelo frente a diferentes condições iniciais de umidade do telhado verde. Além disso, a comparação entre as espessuras de substrato simuladas e os valores indicados pela Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e

Projetos de Drenagem de Belo Horizonte pode subsidiar discussões posteriores, com o modelo calibrado.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, E.M.H.; ALFREDSEN, K.; MUTHANNA, T.M. (2024). “*Impacts of slope and length on the hydrological performance of green roof drainage mats*”. Journal of Hydrology 632, 130974.
- ANSAR, H.; DUAN, H.-F.; MARK, O. (2023) “Sensitivity analysis of green roof design parameters in SWMM for its improved understanding of hydrological performance”. In: EGU GENERAL ASSEMBLY, 2023, Viena, Áustria. Abstracts... Göttingen: Copernicus Publications, 2023. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-10523.
- FLECK, R.; WESTERHAUSEN, M.T.; KILLINGSWORTH, N.; BALL, J.; TORPY, F.R.; IRGA, P.J. (2022). “*The hydrological performance of a green roof in Sydney, Australia: A tale of two towers*”. Building and Environment 221, 109274.
- JEFFERS, Scott et al. (2022) “*Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs*”. Journal of Water Management Modeling, [s.l.], v. 30. DOI: <https://doi.org/10.14796/JWMM.C484>.
- LIU, W.; ZHANG, X.; FENG, Q.; ENGEL, B.A.; LI, Z. (2023). “*Substrate moisture variations of extensive green roofs with different structural configurations in a semi-arid region: Observational data and dynamic simulation*”. Journal of Hydrology 626(A), 130133.
- OBERNDORFER, E.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R.R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KÖHLER, M.; LIU, K.K.Y.; ROWE, B. (2007). “*Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services*”. BioScience 57(10), pp. 823-833
- ROSSMAN, L.A.; HUBER, W.C. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual: Volume III – Water Quality*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, Cincinnati, EPA/600/R-16/093, 155 p.
- SIMS, A.W.; ROBINSON, C.E.; SMART, C.C.; O’CARROLL, D.M. (2019). “*Mechanisms controlling green roof peak flow rate attenuation*”. Journal of Hydrology 577, 123972.