

APLICAÇÃO DO *STORM WATER MANAGEMENT MODEL* PARA A MODELAGEM DE EVENTOS DE CHUVA NA BACIA DO RIO BARIGUI

*Raquel Nery Gonçalves¹; Caroline Kozak²; Mariane Kempka³, Cristovão Vicente Scapulatempo
Fernandes⁴*

RESUMO – As mudanças climáticas associadas à intensa urbanização evidenciam a necessidade do monitoramento hidrológico e hidráulico das bacias hidrográficas para prevenir impactos e compreender eventos de cheia. Nesse contexto, este trabalho visa modelar o comportamento hidrológico do rio Barigui utilizando o Storm Water Management Model (SWMM), comparando as vazões simuladas com dados observados nos pontos Almirante Tamandaré e Tingui, a partir de eventos de chuva ocorridos entre agosto e outubro de 2018. A modelagem foi realizada pelo método da onda dinâmica, após a delimitação de 64 sub-bacias e a definição dos parâmetros físicos e hidráulicos. Os resultados indicaram boa sincronia temporal entre as séries simuladas e observadas, embora as vazões simuladas tenham sido, em geral, inferiores às observadas. A avaliação do desempenho do modelo pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), indicou desempenho insatisfatório nos eventos 1 (-0,57) e 2 (0,22), enquanto o evento 3 apresentou desempenho muito bom, com NSE igual a 0,755. Verificou-se que parâmetros relacionados à impermeabilização e à largura das sub-bacias influenciaram significativamente a resposta hidrológica. Conclui-se que o SWMM é uma ferramenta adequada para a modelagem integrada de sistemas de drenagem urbana, sendo necessário, entretanto, aprimorar o processo de calibração para aumentar a precisão dos resultados.

Palavras-Chave – SWMM; Modelagem hidrológica; Bacia hidrográfica

ABSTRACT – Climate change associated with rapid urbanization has emphasized the need for hydrological and hydraulic monitoring of watersheds to prevent impacts and better understand flood events. In this context, this study aims to model the hydrological behavior of the Barigui River using Storm Water Management Model (SWMM), comparing simulated flows with observed data at the Almirante Tamandaré and Tingui sites, based on rainfall events between August and October 2018. Modeling was performed using the dynamic wave method, after delimiting 64 sub-watersheds and defining the system's physical and hydraulic parameters. The results showed good temporal agreement between simulated and observed series, although simulated flows were generally lower than observed values. Model performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient. The results indicated unsatisfactory performance for Events 1 (-0.57) and 2 (0.22), while Event 3 exhibited very good performance, with an NSE value of 0.755. Parameters related to impermeable areas and sub-basin width significantly influenced hydrological response. It is concluded that SWMM is a suitable tool for integrated urban drainage modeling; however, calibration improvements are necessary to enhance result accuracy.

Key-words – SWMM; Hydrological modeling; Watershed

1) Universidade Federal do Paraná (UFPR), raquelgoncalves182@gmail.com

2) Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), ckozak@unicentro.br

3) Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), marianekempka@utfpr.edu.br

4) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), cris.dhs@ufpr.br

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos extremos em todo o mundo. Conforme destacado pelo IPCC (2023) é previsto que muitas regiões experimentem um aumento na probabilidade de eventos compostos, como ondas de calor e inundações. Isso necessitará das cidades, o desenvolvimento de estruturas e estratégias mais resilientes para suportar tais mudanças. Contudo, o avanço da urbanização, frequentemente associado ao desequilíbrio entre o crescimento populacional e a preservação ambiental pela falta de planejamento adequado, tem contribuído para a degradação dos rios urbanos e para o comprometimento dos recursos hídricos disponíveis (Rocha, 2019).

Nesse contexto, os impactos da urbanização sobre as bacias hidrográficas tornam-se cada vez mais evidentes, especialmente no que se refere ao aumento do escoamento superficial e à deterioração da qualidade da água dos rios (Rocha, 2019). Diante dessa realidade, o monitoramento hidrológico e hidráulico, aliado à aplicação de modelos matemáticos, assume papel fundamental na compreensão desses processos, a fim de promover medidas de mitigação e adaptação. O desenvolvimento e aplicação de ferramentas que permitam analisar de forma integrada os sistemas urbanos e naturais tem se tornado fundamental na gestão integrada e resiliente das cidades (Batista, 2014).

Dessa forma, os softwares de modelagem hidrológica e hidráulica destacam-se como importantes instrumentos de apoio ao planejamento urbano e à gestão de recursos hídricos, permitindo avaliar as interações entre os sistemas fluviais e as áreas urbanizadas, bem como simular diferentes cenários de intervenção (Leal et al, 2024). Portanto, o presente trabalho utiliza o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) para representar o comportamento hidrológico do rio Barigui, na porção norte da bacia, contemplando o mapeamento das sub-bacias e a implementação do modelo, com ênfase na análise do escoamento superficial gerado durante a ocorrência de eventos de chuva.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia do Rio Barigui, que possui área total de 264,89 km² e 63 km de comprimento do rio. A bacia possui uso e ocupação do solo misto, com pequenas áreas com vegetação densa, que aparecem principalmente ao norte da bacia. A vegetação é composta principalmente por florestas caducifólias subtropicais com Araucária angustifolia, bracatinga, mata pluvial tropical-subtropical e campos (Martins, 2008). Já na porção central, onde fica localizado o município de Curitiba, a bacia encontra-se quase que totalmente urbanizada, aumentando as áreas sujeitas a inundação. Na porção final, a urbanização ainda está em desenvolvimento, embora a ocupação tenha avançado na direção da bacia. A Figura 1 mostra a localização e uso e ocupação do solo da Bacia do Rio Barigui. Os pontos de monitoramento utilizados neste estudo localizam-se na porção norte da

Bacia, antes da área urbana mais densa, sendo o primeiro localizado no município de Almirante Tamandaré, denominado BA01, e o segundo já em Curitiba, no Parque Tingui, denominado BA02. Essa porção corresponde a, aproximadamente 39% da bacia, drenando uma área de cerca de 103,68 km².

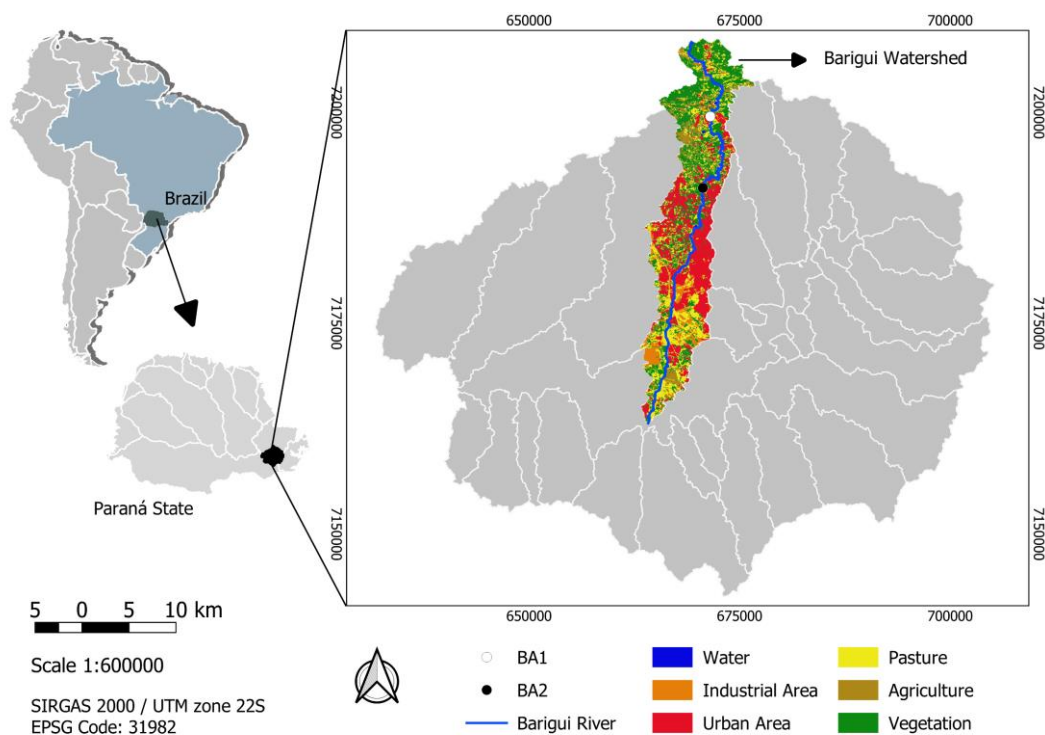


Figura 1 - Localização e uso do solo da Bacia do Rio Barigui
Fonte: Adaptado de Kozak (2020)

Parametrizações, coeficientes e configurações usadas no modelo.

A área de drenagem foi subdividida em 64 sub-bacias, conforme delimitação realizada por Ferreira (2019). Nesse cenário, o ponto BA02 foi definido como exutório da bacia e os arranjos resultaram em 27 condutos e 27 nós, conforme pode ser observado na Figura 2. Ao final de cada trecho das sub-bacias geradas foi inserido um nó de rede, observando a cota altimétrica para garantir o sentido de escoamento. Optou-se pelo uso do método da onda dinâmica para a resolução das equações de Saint-Venant, uma vez que esse método resolve completamente o equacionamento de forma unidimensional.

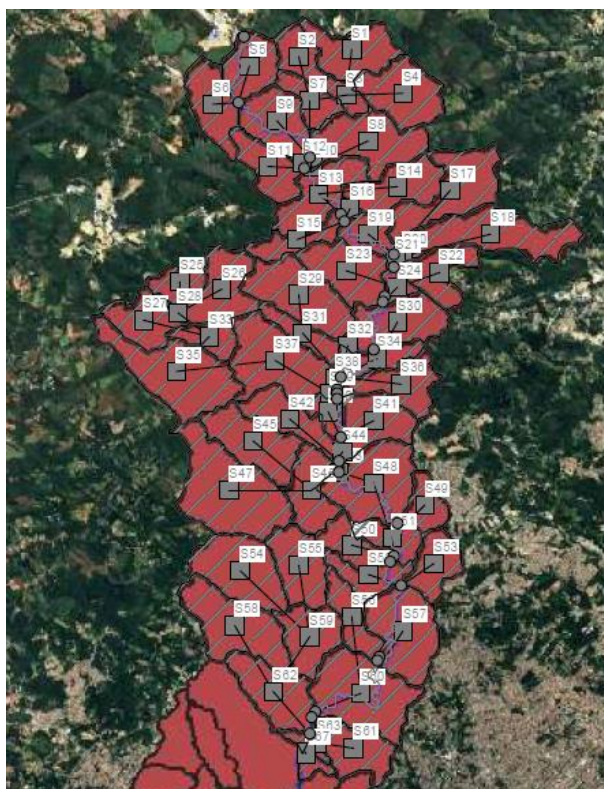


Figura 2 - Modelo SWMM na porção norte da bacia hidrográfica do Rio Barigui até o BA2

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para a obtenção do percentual de área impermeável (%_imperv), foram utilizadas as informações do tipo de uso e cobertura do solo de cada sub-bacia e calculado a média ponderada para definição mais precisa desse parâmetro, por sub-bacia. Na sequência, foi estimado o coeficiente de rugosidade de Manning (M_{pond_Sj}), através dos valores típicos para cada tipo de uso do solo (Tabela 1), presentes em cada sub-bacia, através da média ponderada.

Tabela 1 - Valores adotados de coeficiente de rugosidade de Manning

Uso do solo	Área Urbana	Área industrial	Pastagem	Floresta	Solo Exposto	Campo	Água	Outros
n de Manning	0.012	0.012	0.035	0.16	0.02	0.013	0.03	0.04

Fonte: Adaptado de USEPA (2010).

Dessa forma, foi calculado o coeficiente de impermeabilização (n_{imperv_Sj}) e o coeficiente de permeabilidade (n_{perv_Sj}) de cada sub-bacia, conforme as equações 1 e 2:

$$N_{imperv_{Sj}} = M_{pond_{Sj}} * \frac{\%_{imperv_{Sj}}}{100} \quad (1)$$

$$N_{perv_{Sj}} = M_{pond_{Sj}} * \frac{100 - \%_{imperv_{Sj}}}{100} \quad (2)$$

Onde $M_{pond_{Sj}}$ é o coeficiente de Manning ponderado para a sub-bacia j; $\%_{imperv_{Sj}}$ é o percentual de área impermeável para a sub-bacia j.

O coeficiente de escoamento superficial usado foi o CN, obtidos em Kozak (2019). Na ausência de dados para alguma sub-bacia, adotou-se o valor de uma sub-bacia vizinha com características semelhantes de tipo de solo. Da mesma forma, o coeficiente de cada sub-bacia foi calculado através da média ponderada (CN_{Sj}). A Tabela 2 apresenta os valores mínimo, médio e máximo dos parâmetros %_Imperv, N_imperv, N_perv e CN, calculados nos itens anteriores.

Tabela 2 - Síntese dos parâmetros de impermeabilização calculados

	%Imperv	N_imperv	N_perv	CN
Mínimo	14,248	0,00683	0,01378	46,184
Médio	31,316	0,01948	0,04258	74,467
Máximo	70,993	0,04888	0,06251	84,286

Fonte: Os autores (2026).

Para os parâmetros de armazenamento foram adotadas as profundidades de armazenamento em depressão de 1,57 mm para áreas impermeáveis e 2,54 mm para permeáveis, além de 98% de área impermeável sem armazenamento (USEPA, 2010). A largura da sub-bacia foi definida pela relação entre a área e seu maior comprimento, enquanto a declividade média foi obtida a partir do modelo digital de elevação.

A parametrização dos offsets de entrada e saída dos condutos foram obtidos com uso do modelo digital de elevação e ferramentas SIG. As seções foram consideradas irregulares, pois nessa porção da bacia os cursos d'água são majoritariamente não canalizados. Dessa forma, o coeficiente de Manning para os condutos foi fixado em 0,06 para todo o canal. Os valores de elevação da seção transversal são ajustados automaticamente pelo modelo, de modo que a cota de fundo se mantenha compatível com as elevações definidas para o respectivo trecho do canal. Para os nós foram extraídas as coordenadas geográficas com uso de ferramenta SIG e adotou-se a profundidade de 4 m, de acordo com USEPA (2010).

As vazões simuladas no modelo SWMM foram avaliadas utilizando o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o qual representa uma medida estatística do grau de ajuste entre modelos hidrológicos e os dados observados. O desempenho do modelo foi avaliado considerando $0,75 < NSE \leq 1,00$ como modelo muito bom; $0,65 < NSE \leq 0,75$ como modelo bom; $0,50 < NSE \leq 0,65$ como modelo satisfatório; e $0,50 \leq NSE$ como modelo insatisfatório.

Dados hidrológicos

Na execução das simulações no modelo chuva-vazão do SWMM foram utilizados dados provenientes da estação pluviométrica de alta frequência localizada em BA. Para o presente estudo foram utilizadas as informações de três eventos registrados entre agosto e outubro de 2018. A Tabela 4 apresenta as principais características dos eventos registrados, usados para a modelagem

Tabela 3 – Características dos eventos E1, E2 e E3 monitorados em BA1.

EVENTOS	DATA	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (MM)	DURAÇÃO DO EVENTO (H)	VAZÃO MÁXIMA MEDIDA (M ³ /S)
1	24/08/2018 a 26/08/2018	23,60	36h	1,62
2	03/10/2018 a 04/10/2018	15,40	18h	3,20
3	17/10/2018 a 20/10/2018	45,80	68h	4,57

Fonte: Adaptado de Kozak (2019)

A precipitação no SWMM foi representada por um pluviômetro nas mesmas coordenadas da estação BA1, associado a todas as sub-bacias. Os dados de chuva foram inseridos como séries temporais com resolução de 15 minutos, incluindo data, horário e volume precipitado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a primeira simulação dos eventos de chuva ocorrido entre agosto e outubro de 2018, no ponto BA1.

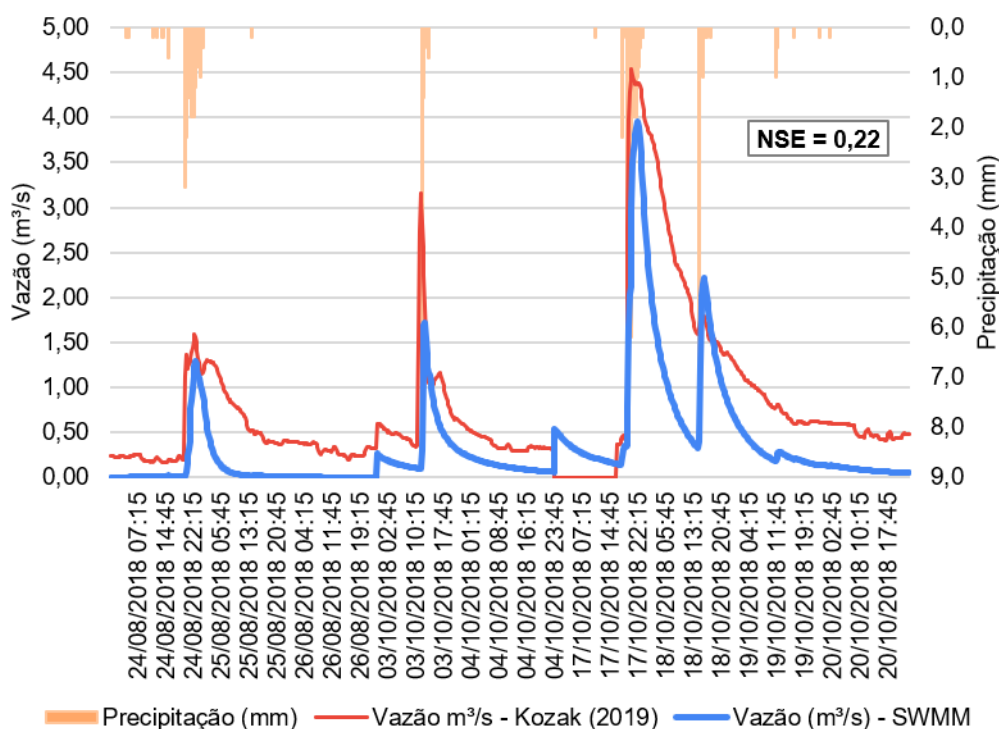
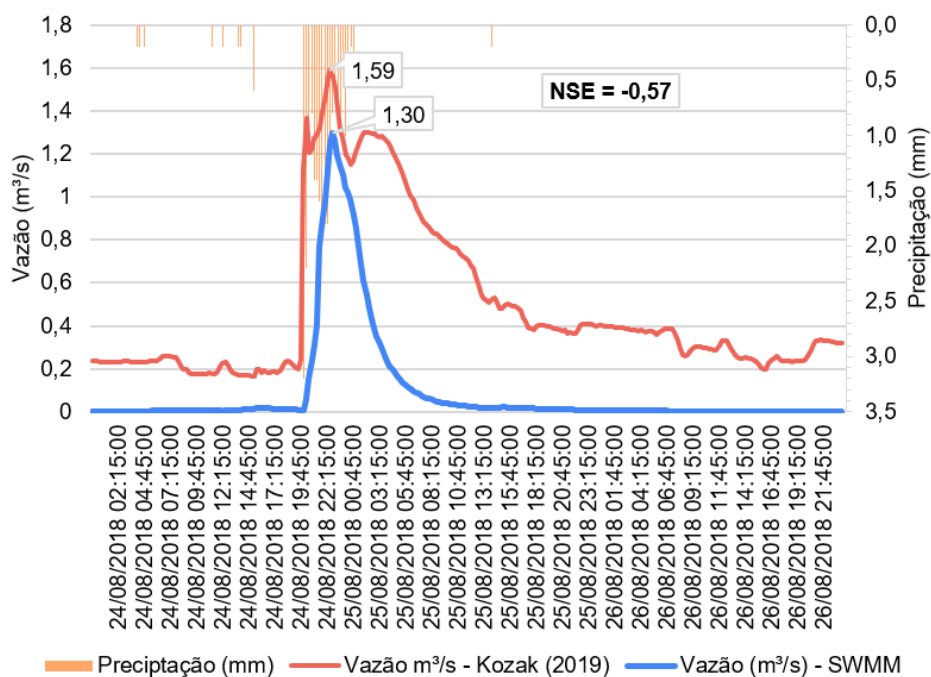


Figura 3 – Hietogramas e hidrogramas observados, e hidrogramas calculados no ponto BA1 pelo SWMM.

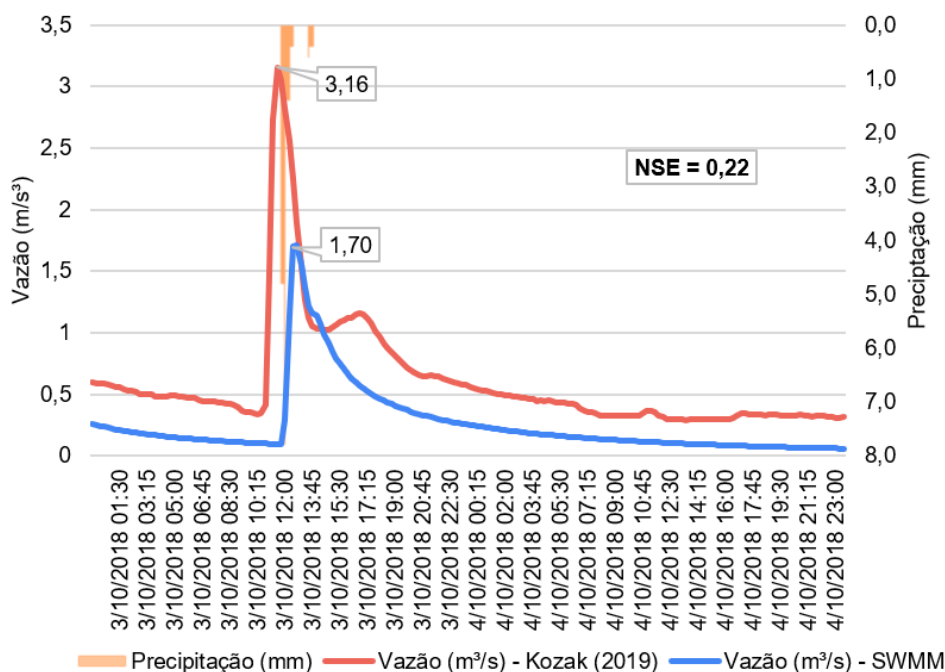
A partir das Figuras 3 e 4, estima-se que o modelo demonstra boa precisão temporal, uma vez que os picos de vazão simulados e observados estão visualmente próximos aos eventos de chuva. No entanto, o desempenho do modelo é reduzido pois o hidrograma simulado apresenta diferenças significativas de magnitude em relação ao hidrograma observado. Após calcular o NSE, obteve-se um valor de 0,22, sendo insatisfatório para a representação do comportamento da bacia.

Portanto, com o intuito de realizar uma análise mais aprofundada e investigar as causas de tal índice, os hidrogramas foram separados por eventos isolados. A Figura 4a apresenta o hidrograma e

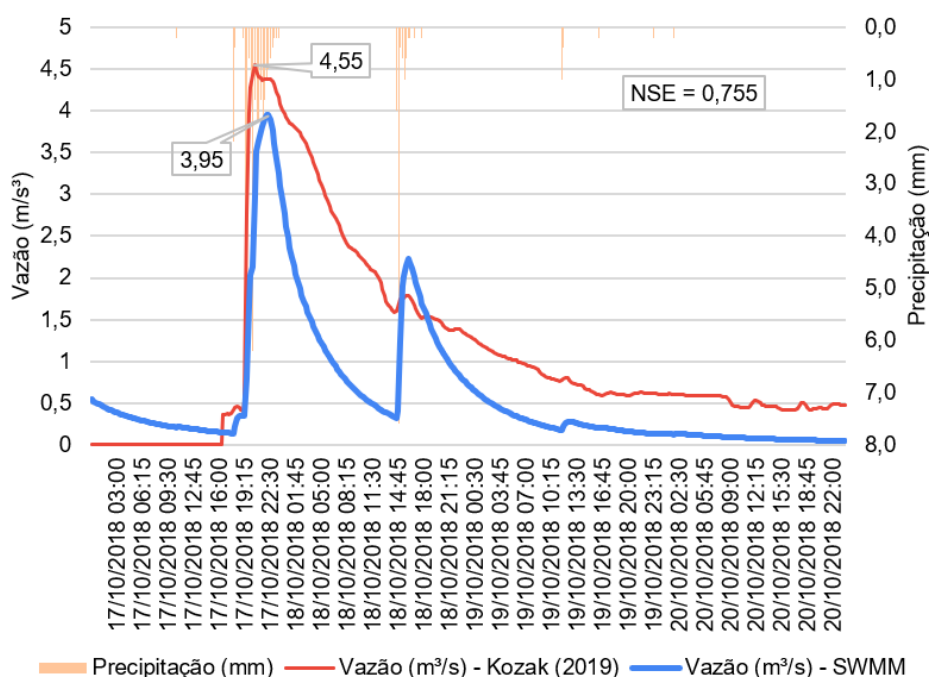
hietograma para o E1, enquanto das Figuras 4b e 4c apresentam o hietograma e os hidrogramas simulados para os eventos E2 e E3, respectivamente.



a) Evento E1



b) Evento E2



c) Evento E3

Figura 4 – Hietograma e hidrogramas observados e hidrogramas calculados no ponto BA1 para os eventos a) E1, b) E2 e c) E3 usando o SWMM.

No evento 1, percebe-se que ambos os hidrogramas observado e simulado apresentaram picos em horários próximos (entre 24/08/2018, às 21h45, e 25/08/2018, às 01h45), indicando boa estimativa do tempo do evento. Porém, o modelo subestimou as vazões ao longo de todo o período, com pico observado de 1,59 m³/s e simulado de 1,30 m³/s, além de um decaimento mais rápido que o observado. Pela equação da continuidade ($Q = vA$), a recessão mais rápida do hidrograma simulado sugere velocidades de escoamento superestimadas, acelerando o esvaziamento do armazenamento na bacia. Além disso, o modelo não foi capaz de registrar o segundo pulso de pico de vazão, associado à chegada de maior vazão da porção de montante do ponto analisado. O NSE calculado para o E1 foi -0,57, indicando desempenho insatisfatório do modelo.

Semelhantemente, no E2 os hidrogramas observado e simulado indicaram o pico de vazão em horários próximos (entre 31/10/2018, às 10:15, e 31/10/2018, às 14:45), sugerindo boa estimativa do tempo do evento. Embora os picos tenham ocorrido em intervalos temporais próximos, o resultado simulado apresentou defasagem em relação ao observado, reduzindo o tempo disponível para a emissão de alertas, potencializando os impactos associados a eventos de inundação. O modelo também subestimou as vazões, sendo esse evento o que obteve maior diferença entre os picos de vazão observado (3,16 m³/s) e medido (1,70 m³/s). Da mesma forma, o segundo pulso de vazão não foi reproduzido ao final do evento como registram os dados observados, indicando escoamento mais rápido no modelo. O coeficiente NSE foi 0,22, também caracterizando desempenho insatisfatório.

No E3, a vazão máxima observada foi de $4,55 \text{ m}^3/\text{s}$ e a simulada de $3,95 \text{ m}^3/\text{s}$. Os hidrogramas indicaram picos em períodos próximos (entre 17/10/2018 às 19h e 18/10/2018 às 03h15), mostrando boa estimativa do momento do evento. Em alguns instantes, como às 19h do dia 17/10, as vazões coincidiram, indicando boa precisão pontual. No entanto, o modelo manteve a tendência de escoamento mais rápido que o observado, possivelmente devido à falta de calibração de parâmetros como infiltração e largura das sub-bacias, além de apresentar uma superestimativa pontual no final do evento. Também houve diferença no instante de ocorrência da vazão máxima, mesmo com os mesmos dados pluviométricos de entrada. Apesar das divergências, o modelo apresentou melhor desempenho neste evento em comparação aos anteriores, especialmente na representação de picos mais elevados, a reprodução do segundo pulso de vazão. O evento E3 é o mais longo entre os eventos monitorados. O NSE foi de 0,755, indicando desempenho muito bom na simulação do comportamento hidrológico da bacia.

De um modo geral, observa-se que os três eventos simulados, apesar de suas características particulares, apresentaram comportamentos em comum, como vazões calculadas com valores inferiores aos valores observados, e um escoamento mais rápido do que o observado.

Silveira et al. (2022) identificaram que, na bacia do ribeirão Vai e Volta (MG), os parâmetros mais influentes nos hidrogramas são a área impermeável, o coeficiente de rugosidade das áreas impermeáveis ($n\text{-imperv}$), a largura (W) e, em menor grau, a declividade (S). Enquanto W , S e $n\text{-imperv}$ afetam a velocidade do escoamento e o pico de vazão, a área impermeável influencia o volume de escoamento gerado. Rabori et al. (2017) destacam que os parâmetros mais sensíveis estão ligados às áreas impermeáveis. Já Amaral (2014) enfatiza que a correta definição da umidade inicial do solo é essencial, pois sua ausência gera hidrogramas irreais, com vazão inicial nula, picos exagerados e recessão abrupta. Por fim, Rocha, Pereira e Neto (2021) observaram que as vazões medidas tendem a ser maiores que as modeladas, além de apresentarem defasagem temporal. Desse modo, destaca-se que os parâmetros associados à área impermeável apresentam elevada sensibilidade no modelo. O escoamento no modelo se apresentou de forma mais rápida do que o observado, provavelmente associados às estimativas dos parâmetros de área impermeável como o armazenamento das áreas impermeáveis, a área impermeável em si e o $n\text{-imperv}$ ponderado. Essa dinâmica pode ter influenciado uma superestimação das velocidades superficiais e uma defasagem temporal.

CONCLUSÃO

Para ambos os pontos de análise, revelou-se uma sincronia temporal satisfatória entre as séries simulada e observada, embora as vazões calculadas pelo modelo tenham apresentado, na maioria dos eventos, valores inferiores aos observados. Os parâmetros associados às áreas impermeáveis

apresentam alta sensibilidade e devem ser priorizados na calibração do modelo, pois explicam a defasagem do pico de vazão simulado em relação ao observado e a superestimação das velocidades de escoamento, principalmente nos eventos E1 e E2, com NSE de -0,57 e 0,22, respectivamente. Destacam-se parâmetros de área impermeável, como o armazenamento das áreas impermeáveis, a área impermeável e o n-imperv, os elementos cruciais para melhor ajuste das representações observadas, sendo necessário mais estudos.

A modelagem mostrou que o E3 apresentou coeficiente NSE muito bom, indicando que, mesmo sem calibração, o modelo foi eficiente, especialmente para picos de vazão maiores em eventos de maior duração. Dessa forma, conclui-se que o SWMM é uma ferramenta adequada para a integração de modelos hidrológicos e hidráulicos, no entanto, para a bacia do rio Barigui, recomenda-se um estudo mais aprofundado de calibração, a fim de melhorar a precisão na estimativa de vazões e na representação dos hidrogramas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, Daniele Pereira Batista. Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro. 2014. 154 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental: controle da poluição urbana e industrial) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/10956>.
- BATISTA, J. A. N.; BOLDRIN, A. J. Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 2, p. 263–273, 2018. DOI: 10.1590/s1413-41522018170663. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018170663>. Acesso em: maio de 2025.
- FERREIRA, David Bispo. Structural Best Management Practices (BMPs) and hydrological effects modelling using SWAT for urban watershed. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2019.
- KOZAK, Caroline. Water quality assessment from diffuse pollution from a semi-urban watershed based on event-driven influence. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2020.
- LEAL, Paola Luiza de Oliveira; NEVES, Raphael Davidson Del Bisogno das; ROCHA, Viviane Borda Pinheiro. Avaliação dos impactos da urbanização na bacia do Córrego Ressaca utilizando o modelo SWMM. In: XV ENAU - Encontro Nacional de Águas Urbanas e VI SRRU - Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Recife, 2024. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16161>.
- MARTINS, Raquel Fernandes. Avaliação da presença de metais e de biomarcadores fecais em sedimentos do Rio Barigui na região metropolitana de Curitiba – PR. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/152-Raquel_Fernandes_Martins.pdf.
- MORIASI, D. N.; ARNALD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, T. L.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineering*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. <http://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; PEREIRA, Silvano Porto; LIMA NETO, Iran Eduardo. Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 3, p. 451–459, mai./jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190328>.
- ROCHA, Maria de Jesus Delmiro. Aplicação do SWMM para Modelagem Hidrológico-Hidráulica em uma Grande Bacia de um Rio Costeiro. 2019. 62 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/50566>.
- ROSSMAN, Lewis A. Manual do usuário EPA SWMM 5.0: modelo de gestão de drenagem urbana. Tradução para o português realizada por Heber Pimentel Gomes e equipe técnica do LENHS/UFPB. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2012. Disponível em: https://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/programa-swmm/manual_swmm.pdf.
- U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Storm Water Management Model – User's Manual. EPA/600/R-05/040. Cincinnati, OH 45268, USA, 2010.