

## **EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NA RESPOSTA HIDROLÓGICA DE UMA BACIA NO MUNICÍPIO DE POÇOS DE CALDAS/MG**

*Natália Aparecida Lopes<sup>1</sup>; Alexandre Silveira<sup>2</sup>; Frederico Carlos Martins de Menezes Filho<sup>3</sup>*

**RESUMO** – A representação espacial da precipitação é um fator decisivo em estudos hidrológicos, sobretudo em aplicações voltadas ao planejamento e à gestão da drenagem urbana. Nesse contexto, este trabalho investiga os efeitos de diferentes formas de distribuição da precipitação na resposta da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas, localizada no município de Poços de Caldas (MG). Para tal, realizaram-se simulações no modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), considerando dois cenários distintos: (i) distribuição uniforme e (ii) distribuição espacial associada à subdivisão em sub-bacias. Os resultados evidenciam que a abordagem espacializada está associada a picos de vazão menos expressivos, cerca de 47% de redução e respostas mais rápidas, além de modificações no destino da água precipitada, com redução de aproximadamente 41% no escoamento superficial e de 62% no armazenamento superficial, acompanhadas por aumento de cerca de 56% na infiltração. Esses resultados indicam que a consideração das particularidades locais ao longo da bacia contribui para uma representação mais consistente dos mecanismos de geração do escoamento, dos tempos de resposta e da propagação do fluxo ao longo da rede de drenagem.

**Palavras-Chave** – Variabilidade espacial, Modelagem distribuída, Tempo de resposta.

**ABSTRACT**– The spatial representation of precipitation is a key factor in hydrological studies, particularly in applications related to urban drainage planning and management. In this context, this study investigates the effects of different precipitation distribution approaches on the hydrological response of the Vargens de Caldas watershed, located in the municipality of Poços de Caldas (MG), Brazil. To this end, simulations were performed using the Storm Water Management Model (SWMM), considering two distinct scenarios: (i) uniform distribution and (ii) spatial distribution associated with sub-basin discretization. The results indicate that the spatially distributed approach is associated with lower peak flows, with an approximate reduction of 47%, and faster responses, as well as changes in the fate of precipitation, including a reduction of about 41% in surface runoff and 62% in surface storage, along with an increase of approximately 56% in infiltration. These findings suggest that accounting for local characteristics across the watershed contributes to a more consistent representation of runoff generation processes, response times, and flow routing along the drainage network.

**Key-words** – Spatial variability, Distributed modeling, Response time.

1) Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL, Rodovia José Aurélio Vilela, 1199, BR 267 km 533, 37715-400, Tel (35) 3697-4600, Poços de Caldas – MG, natalia.lopes@sou.unifal-mg.edu.br.

2) Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL, Rodovia José Aurélio Vilela, 1199, BR 267 km 533, 37715-400, Tel (35) 3697-4600, Poços de Caldas – MG, alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br.

3) Universidade Federal de Viçosa – UFV, Rodovia BR 230 km 7, 38810-000, Tel (34) 3855-9300, Rio Paranaíba – MG, frederico.menezes@ufv.br

## INTRODUÇÃO

Em bacias hidrográficas, a heterogeneidade das características espaço-temporais e as atividades antrópicas que, frequentemente, alteram o meio natural, intensificam a complexidade da resposta hidrológica, tornando sua representação um desafio relevante para o planejamento e gestão territorial (SOUSA, 2022). Nesse contexto, modelos hidrológicos têm sido amplamente utilizados para simular a resposta de bacias hidrográficas sob diferentes condições.

Devido à grande quantidade de dados exigidos e à complexidade de sua obtenção, é comum a adoção de abordagens que representam a bacia como uma unidade homogênea, com parâmetros hidrológicos invariáveis, conhecidos como modelos concentrados. No entanto, essa simplificação pode introduzir incertezas relevantes, especialmente em áreas caracterizadas por elevada variabilidade espacial.

Para representar essas variações, os modelos hidrológicos distribuídos apresentam-se como uma alternativa mais adequada. Nesses modelos, a escala de representação exerce influência relevante sobre os resultados, sendo, portanto, um fator fundamental a ser considerado (ICHIBA *et al.*, 2018). Esse aspecto tem sido amplamente investigado, como em Dehotin e Braud (2008), que destacam a importância da definição de uma discretização espacial capaz de estabelecer um equilíbrio entre a escala dos componentes, a disponibilidade de dados e a finalidade da análise.

A precipitação constitui o principal elemento de entrada no ciclo hidrológico, sendo responsável por alimentar processos como infiltração, armazenamento e escoamento superficial. A maneira como esses processos se distribuem no espaço e no tempo está diretamente relacionada às características fisiográficas e hidrológicas da área de estudo, o que evidencia a importância de uma adequada representação dessas variáveis na análise hidrológica.

Em muitas aplicações, a precipitação é considerada espacialmente uniforme, com base em dados provenientes de redes pluviométricas de baixa densidade, o que torna complexa a previsão de inundações em áreas urbanas (YOON e LEE, 2017). Estudos indicam que as propriedades espaço-temporais da precipitação influenciam diretamente a resposta hidrológica da bacia, bem como a sensibilidade dos parâmetros do modelo e destacam o impacto da utilização de pluviômetros espacialmente distribuídos para a melhoria do desempenho das simulações (XU *et al.*, 2013; MELES *et al.*, 2024).

Dessa forma, a investigação proposta baseia-se na simulação de duas formas de representação da precipitação no modelo chuva-vazão *Storm Water Management Model* (SWMM), sendo a primeira considerando sua aplicação uniforme em toda a bacia e outra incorporando sua distribuição espacial em função da subdivisão em sub-bacias. Essa abordagem permite avaliar as implicações dessas

diferentes representações tanto na resposta hidrológica no exutório, por meio dos hidrogramas de vazão, quanto na distribuição da precipitação entre as principais componentes do balanço hídrico, evidenciando a relevância da variabilidade espacial da precipitação.

O estudo foi aplicado à bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas, localizada no município de Poços de Caldas/MG, selecionada em função da recorrência de eventos de cheia e dos impactos associados, bem como da heterogeneidade de suas características físico-hidrológicas e de uso e ocupação do solo, que a tornam uma área representativa para a análise proposta.

## **METODOLOGIA**

### **Área de estudo**

O município de Poços de Caldas, localizado no sudoeste do estado de Minas Gerais, na divisa com São Paulo, situa-se aproximadamente entre as coordenadas 46° 33' 45" W e 21° 47' 18" S, possuindo área territorial de 546,96 km<sup>2</sup> e população estimada em 172.339 habitantes (IBGE, 2025).

A cidade apresenta altitude média de aproximadamente 1.200 metros, com relevo predominantemente ondulado e presença de áreas montanhosas que influenciam a dinâmica do escoamento superficial. A região é caracterizada por vegetação de campos e floresta tropical pouco densa, inserida no bioma Mata Atlântica, pertencente à região hidrográfica do Paraná, com clima mesotérmico brando e temperaturas médias variando entre 10 °C e 15 °C, além de índice pluviométrico anual em torno de 1.745 mm (POÇOS DE CALDAS, 2018; IBGE, 2019).

A bacia de estudo (Figura 1) conta com uma área de 41,37 km<sup>2</sup> e perímetro de 29,66 km, abrangendo diversos bairros da zona sul do município, como Jardim Esperança, Santa Tereza e Jardim Kennedy I e II, sendo este último localizado em maior proximidade à faixa de inundação do Córrego Vargens de Caldas, principal receptor das águas provenientes do escoamento superficial da bacia, o que contribui para a recorrência de eventos de inundação nesta região.

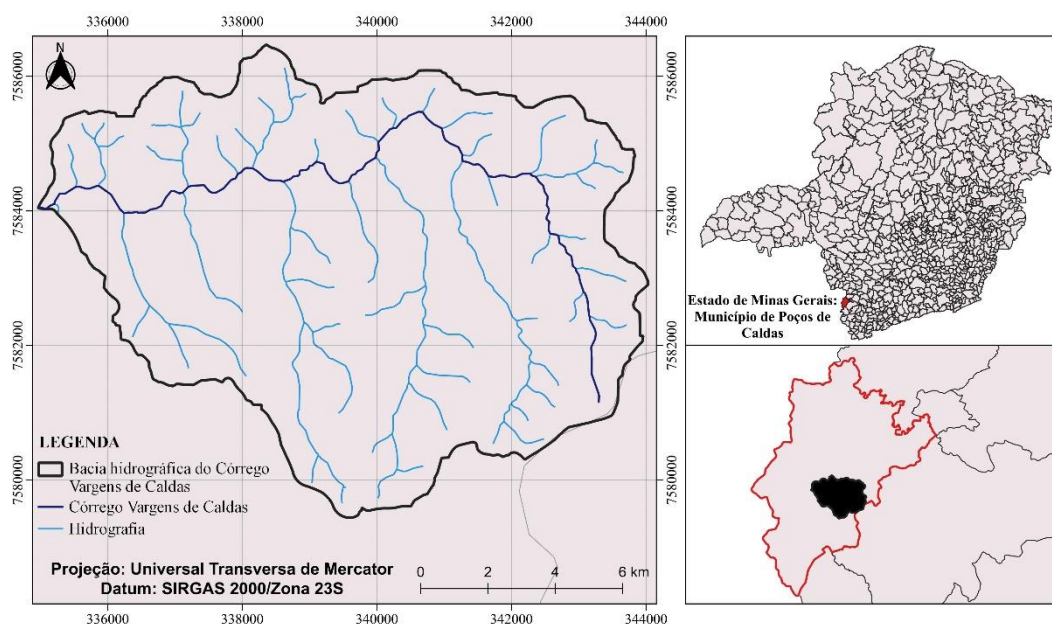


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas em Poços de Caldas/MG.

### Dados de entrada do modelo

Para esta análise, o modelo foi composto por seis sub-bacias (Figura 2), delimitadas com base no padrão de uso e ocupação do solo e nos pontos de confluência da rede de drenagem (nós). As informações relativas às características fisiográficas, ao uso e ocupação do solo, à delimitação das sub-bacias e à rede de drenagem, bem como os parâmetros de infiltração e escoamento, foram obtidas a partir de estudo previamente desenvolvido na área de estudo por Lopes (2025).

Esses dados foram derivados de diferentes fontes, incluindo bases cartográficas utilizadas para a obtenção de informações altimétricas e geração do Modelo Digital de Terreno (MDT), fornecidas pela Prefeitura Municipal de Poços de Caldas; dados vetoriais georreferenciados de otobacias e rede de drenagem disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH); informações de uso e ocupação do solo obtidas a partir de imagens de sensoriamento remoto processadas no ambiente QGis; e parâmetros hidrológicos definidos com base no manual do *Storm Water Management Model* (SWMM) e em equações empíricas da literatura, incluindo equações de tempo de concentração e as relações intensidade-duração-frequência (IDF), adotadas em função da ausência de dados observados de precipitação.

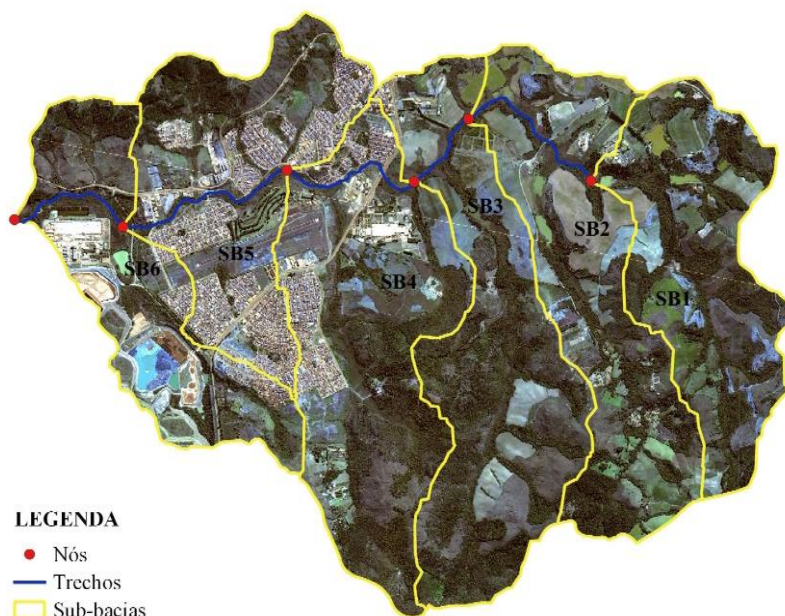


Figura 2 – Discretização espacial da bacia hidrográfica em 6 sub-bacias e curso d'água principal dividido em trechos.

Na tabela a seguir, são apresentadas as principais características físicas das sub-bacias, relacionadas à área, permeabilidade e parâmetros geométricos.

Tabela 1 – Características principais das sub-bacias.

| Sub-bacia | Área (km <sup>2</sup> ) | Largura média (km) | Declividade (%) | Área permeável (%) | Área impermeável (%) |
|-----------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| SB única  | 41,37                   | 4,71               | 14,82           | 84,22              | 15,78                |
| SB1       | 6,18                    | 1,33               | 18,05           | 93,51              | 6,49                 |
| SB2       | 7,09                    | 1,26               | 15,25           | 94,46              | 5,54                 |
| SB3       | 7,94                    | 1,28               | 16,33           | 96,02              | 3,98                 |
| SB4       | 8,26                    | 1,39               | 14,08           | 82,17              | 17,83                |
| SB5       | 6,52                    | 2,46               | 12,88           | 60,39              | 39,61                |
| SB6       | 5,38                    | 1,52               | 11,78           | 74,54              | 25,46                |

Fonte: Os autores, 2026.

As equações utilizadas para o cálculo dos tempos de concentração de cada sub-bacia foram as de Kirpich (Equação 1), aplicável a bacias rurais, e de Carter (Equação 2), destinada à bacias urbanas (SILVEIRA, 2005), sendo adotadas conforme o perfil predominante de cada sub-bacia, conforme observado na Tabela 2.

$$t_c = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad (1)$$

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad (2)$$

Em que:

$t_c$  = Tempo de concentração (horas);

$L$  = Comprimento do talvegue (km);

$S$  = Declividade (m/m).

Tabela 2 – Equação utilizada em cada sub-bacia em função do perfil predominante e respectivo valor de  $t_c$ .

| Sub-bacia | Perfil predominante | Equação | $t_c$ (min.) |
|-----------|---------------------|---------|--------------|
| SB1       | Rural               | Kirpich | 40           |
| SB2       | Rural               | Kirpich | 15           |
| SB3       | Rural               | Kirpich | 5            |
| SB4       | Rural               | Kirpich | 15           |
| SB5       | Urbano              | Carter  | 20           |
| SB6       | Rural               | Kirpich | 15           |

Fonte: Os autores, 2026.

Na sequência, procedeu-se conforme descrito em Lopes (2025), obtendo-se: o cenário (i), representado por um único pluviômetro, cujo dado de entrada foi o hietograma aplicado a toda a bacia; e (ii), representado por seis pluviômetros correspondentes aos hietogramas definidos para cada sub-bacia, conforme ilustrado pela Figura 3.

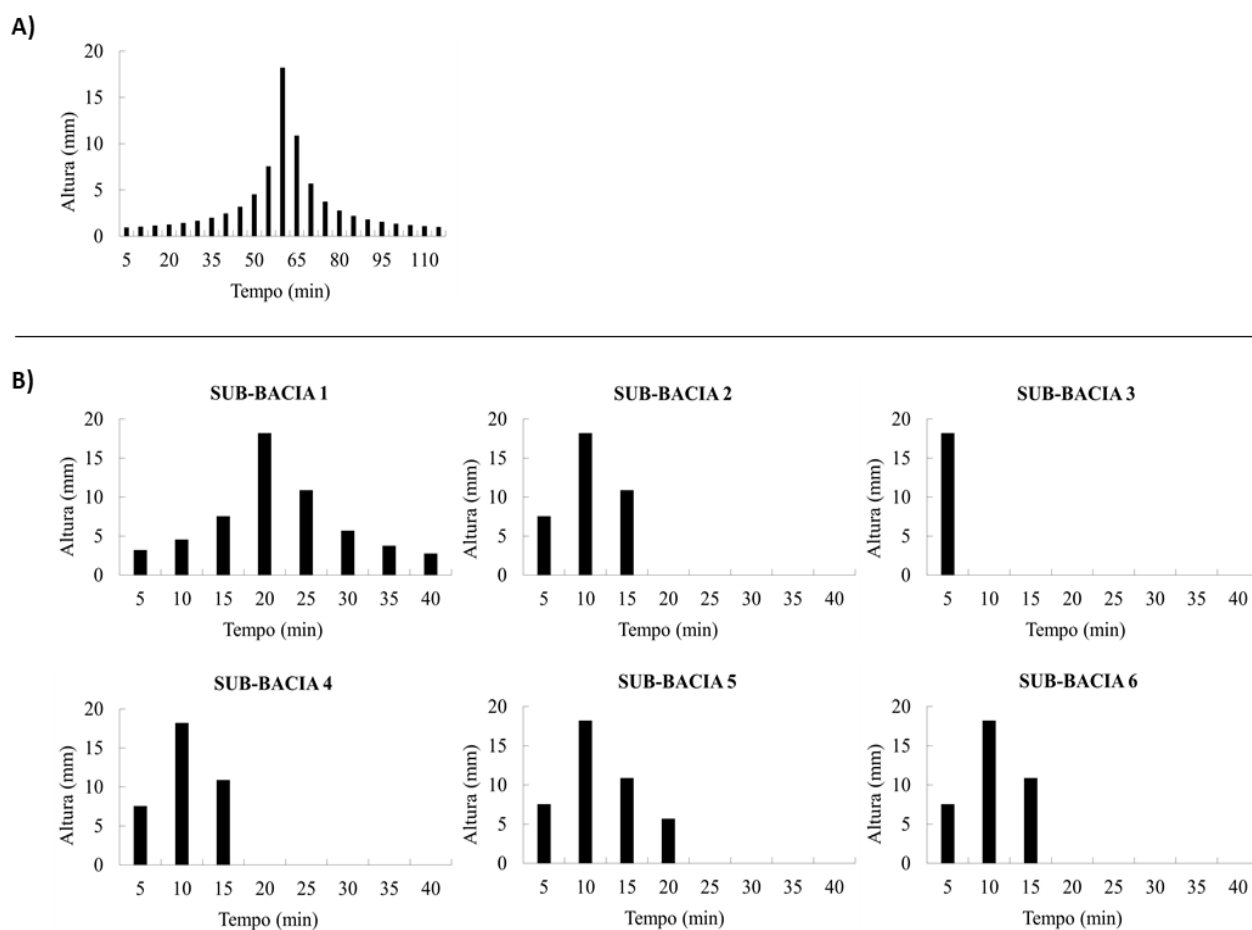


Figura 3 – Hietogramas de chuva para A) cenário (i) e B) cenário (ii).

## Simulação hidrológica

As simulações foram realizadas por meio do modelo SWMM, na qual se procedeu à representação da bacia e dos elementos que compõem sua rede de drenagem principal. Essa etapa envolveu a definição das sub-bacias e dos trechos do canal que as interligam, bem como a inserção dos parâmetros físicos e hidrológicos previamente obtidos, incluindo características geométricas, percentual de áreas impermeáveis e propriedades relacionadas à infiltração.

Para a propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem, adotou-se o método da onda cinemática, enquanto o processo de infiltração foi estimado por meio do método da Curva Número (CN), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), dos Estados Unidos. As simulações foram conduzidas considerando-se os dois cenários de chuva descritos na etapa anterior.

Com base nessas configurações, foram obtidos os hidrogramas no exutório da bacia, a partir dos quais se analisaram as vazões de pico, permitindo a comparação das magnitudes e da dinâmica temporal do escoamento em função da forma de representação da precipitação. Adicionalmente, o balanço hídrico foi avaliado a partir do relatório de estado da simulação, possibilitando a comparação entre cenários por meio da quantificação de cada componente.

## RESULTADOS

A Figura 4 apresenta os hidrogramas simulados no exutório da bacia para os dois cenários de precipitação considerados.

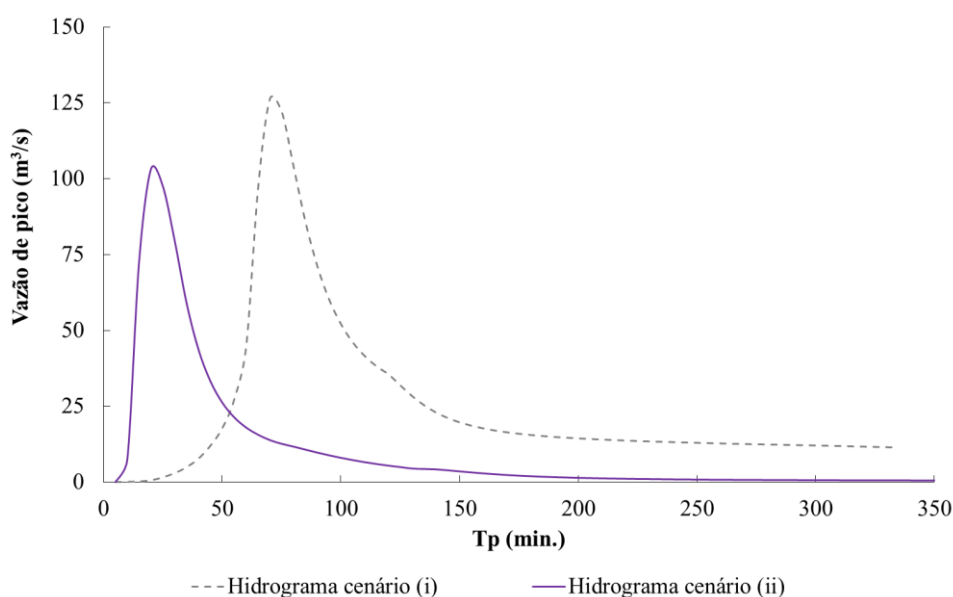


Figura 4 – Hidrogramas para os cenários (i) e (ii)

A análise da Figura evidencia, de forma clara, diferenças significativas entre os hidrogramas. Observa-se que o cenário (i) apresenta maior vazão de pico e ocorrência mais tardia, enquanto o cenário (ii) apresenta resposta mais rápida, com antecipação do tempo ao pico e vazão cerca de 18% menor. Além disso, o hidrograma associado à chuva distribuída apresenta forma mais concentrada no tempo, com ascensão e recesso mais acentuadas, ao passo que o cenário uniforme resulta em uma resposta mais suavizada e distribuída ao longo do tempo.

Como complemento à análise comparativa, a Figura 5 ilustra a distribuição da precipitação total entre as componentes do balanço hídrico, sendo elas o escoamento superficial, a infiltração e o armazenamento superficial, para ambos os cenários.

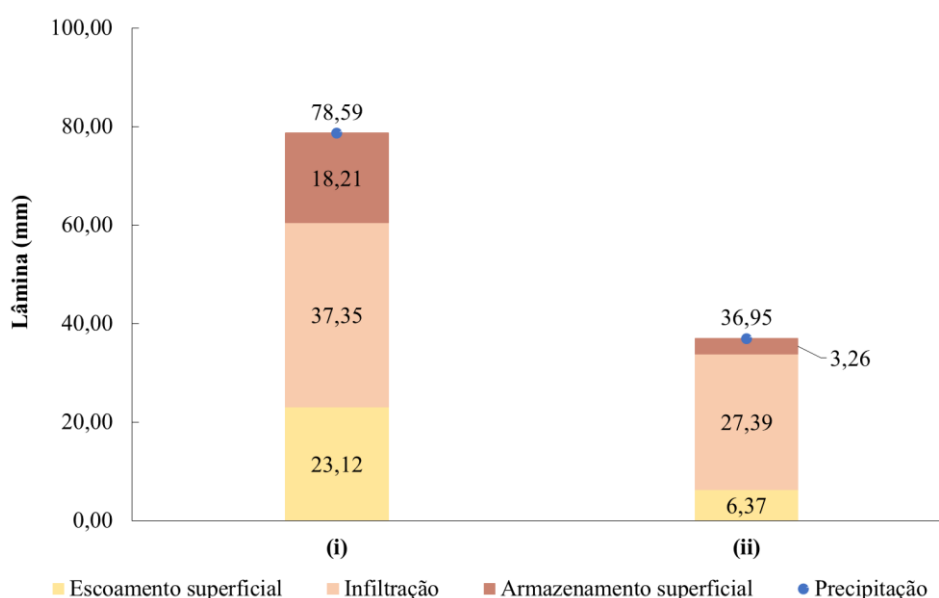


Figura 5 – Distribuição da lâmina de precipitação total entre as componentes do balanço hídrico para (i) e (ii).

A partir dos resultados obtidos, denota-se que a precipitação total sofreu uma redução de aproximadamente 47% do cenário (i) para o cenário (ii), revelando uma superestimação da lâmina precipitada mediante a adoção da chuva uniforme para toda a bacia.

Verifica-se ainda que a maior parte da chuva é convertida em infiltração, seguida pelo escoamento e armazenamento superficial, padrão que se mantém consistente em ambos os cenários analisados.

Entretanto, houve redução do escoamento superficial no cenário distribuído, da ordem de 41%, bem como redução mais acentuada do armazenamento superficial (62%), acompanhadas por aumento significativo da infiltração, de aproximadamente 56%.

De maneira integrada, os resultados indicam que a redução do percentual de escoamento superficial no cenário distribuído está associada à diminuição da vazão de pico observada nos hidrogramas, enquanto o aumento da infiltração contribui para a atenuação da resposta hidrológica.

Ainda que careçam de validação para confirmação das hipóteses levantadas, os resultados obtidos dialogam com a literatura ao evidenciar a influência da variabilidade espacial da precipitação na resposta hidrológica. Nesse sentido, Emmanuel *et al.* (2015) destacaram que diferentes configurações espaciais da precipitação foram capazes de gerar dispersões relevantes nos resultados das simulações. De forma análoga, Moura (2020) concluiu que a consideração da precipitação distribuída foi capaz de reproduzir com maior êxito o comportamento hidrológico real da bacia, o que reforça a relevância da abordagem adotada, ainda que os resultados aqui obtidos apresentem particularidades associadas às condições e simplificações do modelo.

## CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da variabilidade espacial da precipitação na dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica de caráter periurbano, a partir da comparação entre dois cenários de simulação que diferem quanto à forma de distribuição espacial da chuva: (i) precipitação concentrada e (ii) precipitação distribuída em função de sub-bacias. A análise foi conduzida com base na resposta hidrológica no exutório, representada pelos hidrogramas de vazão máxima, e na conversão da precipitação nas principais componentes do ciclo hidrológico, por meio das simulações realizadas no modelo hidrológico SWMM.

Os resultados indicaram sensibilidade considerável do modelo à forma de representação da precipitação, com efeitos na sincronização das contribuições das sub-bacias e na propagação do fluxo ao longo da rede de drenagem. Isso sugere que a adoção de uma abordagem distribuída, ao considerar as diferenças nas características locais, contribui para as variações nos padrões de geração do escoamento e nos tempos de contribuição, refletindo na forma do hidrograma e na magnitude das vazões de pico.

Nesse contexto, ressalta-se a importância da adequada representação espacial da precipitação em estudos hidrológicos, especialmente em bacias com características heterogêneas, uma vez que simplificações podem resultar na superestimação da lâmina precipitada e em distorções na estimativa das variáveis de interesse.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo o apoio recebido de: Fundação de Pesquisa Minas Gerais (FAPEMIG) projeto APQ-05218-23, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

(CAPES) pela bolsa de mestrado, Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL/MG, Campus Poços de Caldas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EMMANUEL, I. *et al.* Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modeling: Benefit of a simulation approach?. **Journal of Hydrology**, v. 531, p. 337-348, 2015.

DEHOTIN, J.; BRAUD, I. Wich spatial discretization for distributed hydrological models? Proposition of a methodology and ilustration for medium to large-scale catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, n. 3, p. 769-796, 2008.

ICHIBA, A. *et al.* Scale effect challenges in urban hydrology highlighted with a distributed hydrological model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, p. 331-350, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**: Poços de Caldas, Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/pocos-de-caldas/panorama>. Acesso em: 21 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Monografias Municipais**: Sudeste/Minas Gerais/Poços de Caldas, Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

LOPES, N. A. **Efeito da discretização espacial da bacia hidrográfica do Córrego Vargens de Caldas – Poços de Caldas/MG na modelagem hidrológica utilizando o modelo computacional SWMM**. 2025. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2025.

MELES, M. B. *et al.* Rainfall distributional properties control hydrologic model parameter importance. **Journal of Hydrology: Regional studies**, v. 51, 101662, 2024.

MOURA, N. D. da S. **Estudo da influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica de bacias urbanas de pequeno porte**. 2020. 171 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

POÇOS DE CALDAS. **Clima**: Prefeitura Municipal de Poços de Caldas, 2018. Disponível em: <https://pocosdecaldas.mg.gov.br/perfil/clima/>. Acesso em: 22 abr. 2026.

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.10, n. 1, p. 5-23, jan./mar. 2005.

SOUSA, F. J. C. de. **Efeito da resolução espacial na simulação hidrológica com o modelo Hidropixel – DLR**. 2022. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

YOON, S. S.; LEE, B. Effect of using high-density rain gauge networks and weater radar data on urban hydrological analysis. **Water**, v. 9, n. 12, 931, 2017.

XU, H. *et al.* Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 1-12, 2013.