MODELAGEM HIDROLÓGICA EM AMBIENTES URBANOS: AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL E SEUS IMPACTOS

Camilla Ferreira Kranzfeld [1]; Igor da Silva Rocha Paz [2]& Marcelo de Miranda Reis [3]

Palavras-Chave – Discretização espacial; Delimitação hidrológica; Inundações urbanas.

INTRODUÇÃO

A crescente frequência de eventos hidrológicos extremos, associada à expansão urbana e à intensificação da impermeabilização do solo, tem ampliado a ocorrência de inundações em áreas urbanas e aumentado os desafios relacionados à gestão do risco de desastres (Kundzewicz, 2008; IPCC, 2022).

Nesse contexto, modelos hidrológicos e hidráulicos têm sido amplamente utilizados para simular o comportamento do escoamento superficial, subsidiar sistemas de alerta, avaliar intervenções de drenagem e apoiar o planejamento urbano. Entretanto, a qualidade dos resultados obtidos depende diretamente da forma como a bacia hidrográfica é representada espacialmente no modelo (Tucci, 2005).

Modelos semi-distribuídos, como o SWMM, representam a bacia por meio da subdivisão em sub-bacias hidrologicamente homogêneas. Apesar da ampla utilização desses modelos, ainda não existe consenso sobre critérios para definição do nível adequado de discretização espacial, especialmente em áreas urbanas complexas, onde a heterogeneidade do relevo, do uso do solo e da rede de drenagem pode influenciar significativamente os resultados das simulações (Devia, Ganasri e Dwarakish, 2015).

Grande parte dos estudos encontrados na literatura concentra-se na comparação dos resultados produzidos por diferentes discretizações, porém poucos trabalhos descrevem de forma sistemática o processo de construção de cenários multiescala preservando a coerência hidrológica da bacia hidrográfica. Essa lacuna metodológica dificulta a reprodutibilidade dos estudos e limita comparações entre diferentes aplicações.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para construção de cenários multiescala de discretização espacial em bacias urbanas, utilizando como estudo de caso a Bacia do Canal do Mangue (BCM), localizada no município do Rio de Janeiro. A proposta busca fornecer uma estrutura espacial consistente para futuras aplicações em modelagem hidrológica e avaliação de riscos de inundação.

METODOLOGIA

A área de estudo corresponde à Bacia do Canal do Mangue (BCM), localizada na cidade do Rio de Janeiro/RJ, inserida em uma região densamente urbanizada e historicamente suscetível à ocorrência de alagamentos e inundações durante eventos de precipitação intensa.

1) Instituto Militar de Engenharia – camilla.marques@ime.eb.br
2) Instituto Militar de Engenharia – igorpaz@ime.eb.br
3) Instituto Militar de Engenharia – marceloreis@ime.eb.br

A metodologia foi dividida em quatro etapas principais: delimitação hidrologicamente condicionada da bacia, geração das direções de fluxo de drenagem, definição das sub-bacias elementares e construção dos cenários multiescala de discretização.

Inicialmente, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) TOPODATA com resolução espacial de 30 m. O modelo foi reprojetado para o sistema SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S e submetido a procedimentos de condicionamento hidrológico, incluindo preenchimento de depressões espúrias e incorporação da rede hidrográfica por meio da ferramenta *r.carve* do GRASS GIS.

A partir da definição do exutório principal da BCM foi realizada a delimitação automática da área contribuinte utilizando a ferramenta *r.water.outlet*. A utilização de MDE para extração automática da estrutura de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas é amplamente consolidada na literatura desde os trabalhos pioneiros de Jenson e Domingue (1988).

Em seguida foram geradas as direções de fluxo e as acumulações de contribuição utilizando a ferramenta *r.watershed.* A determinação das direções de escoamento constitui uma etapa fundamental da análise hidrológica baseada em MDEs, sendo discutida por Tarboton (1997) no desenvolvimento de algoritmos para representação do fluxo superficial.

Todas as ferramentas citadas anteriormente encontram-se disponíveis no GRASS GIS, sistema de informações geográficas de código aberto amplamente utilizado em aplicações ambientais e hidrológicas (Neteler et al., 2012).

A Figura 1 apresenta a comparação entre o limite oficial disponibilizado pelo DATA.RIO e o limite obtido por meio do condicionamento hidrológico do MDE. A análise permitiu identificar diferenças entre a representação administrativa da bacia e a área efetivamente contribuinte ao exutório principal.

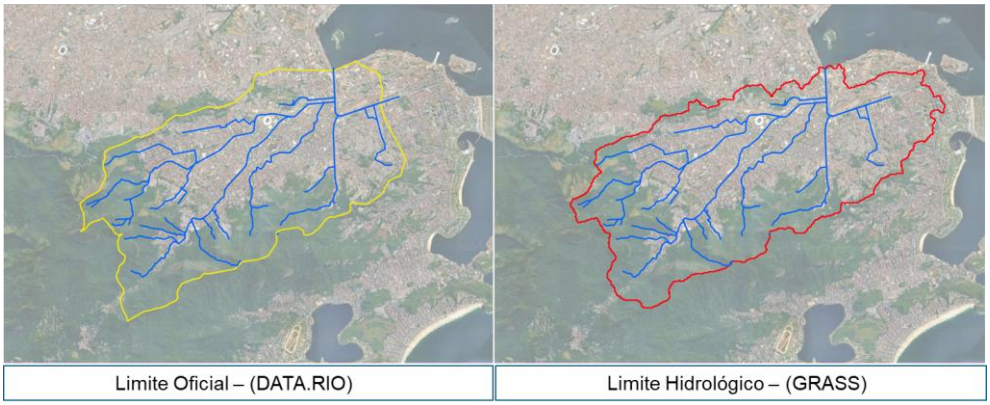


Figura 1. Comparação entre o limite oficial da Bacia do Canal do Mangue disponibilizado pelo DATA.RIO e o limite hidrologicamente condicionado obtido a partir do MDE utilizando ferramentas GRASS. Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado na Figura 1, parte da hidrografia existente encontra-se fora dos limites estabelecidos pelo DATA.RIO e, portanto, algumas áreas potencialmente contribuintes ao escoamento superficial associado a esses canais não estão integralmente inseridas no perímetro oficial da bacia. Em contrapartida, a delimitação obtida por meio da análise das direções de fluxo e da topografia incorpora essas contribuições, resultando em uma representação mais coerente da dinâmica hidrológica local. A delimitação oficial possui área de 45,40 km², enquanto a delimitação hidrológica resultou em uma área de 46,11 km², correspondendo a um acréscimo de aproximadamente 0,71 km², equivalente a cerca de 1,6% da área total da bacia.

Após a delimitação da bacia, foi realizada a definição das sub-bacias elementares por meio da calibração do parâmetro *threshold* do algoritmo *r.watershed*. O valor adotado permitiu a geração de aproximadamente 981 sub-bacias, consideradas neste trabalho como a discretização de referência.

Os demais cenários foram construídos por agregação progressiva das unidades elementares até a obtenção dos cenários discretizados com 750, 500, 250, 125, 60 e 30 sub-bacias.

O processo de agregação seguiu critérios hierarquizados:

(i) preservação da conectividade hidrológica com a priorização da rede hidrográfica oficial;

(ii) manutenção da coerência topográfica entre áreas adjacentes com a preservação dos caminhos preferenciais de escoamento superficial.

RESULTADOS

A aplicação da metodologia permitiu a obtenção de uma representação hidrologicamente consistente da BCM, evidenciando diferenças entre o limite geográfico tradicionalmente utilizado e o limite derivado da análise hidrológica do terreno.

A principal contribuição do trabalho consiste na construção de uma estrutura multiescala composta por sete níveis de discretização espacial, variando de 981 a 30 sub-bacias. A Figura 2 demonstra a organização hierárquica dos cenários desenvolvidos. Diferentemente de abordagens baseadas exclusivamente na alteração de parâmetros automáticos de segmentação, os cenários foram construídos por agregação progressiva das sub-bacias elementares, preservando a conectividade hidrológica e a estrutura da drenagem ao longo de todas as escalas analisadas.

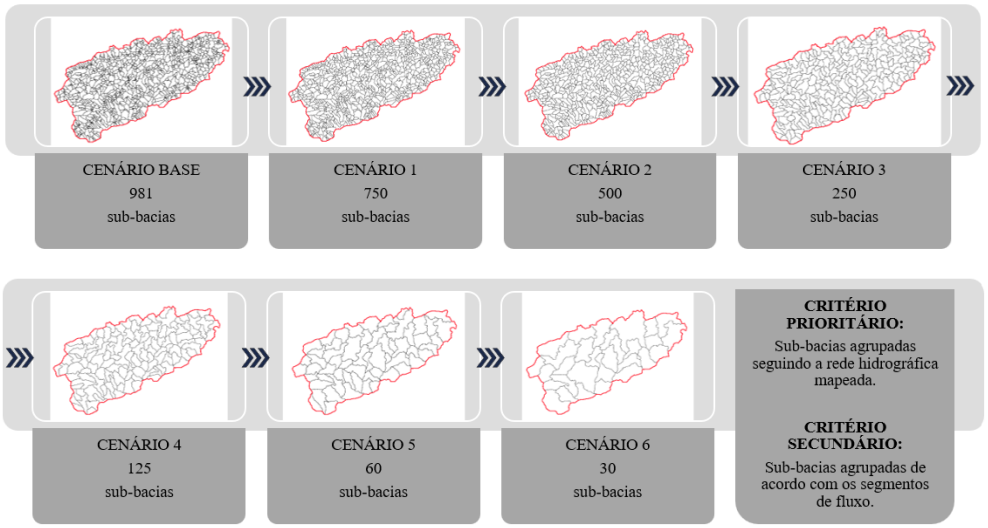


Figura 2. Estrutura multiescala da Bacia do Canal do Mangue composta por sete níveis de discretização espacial. Fonte: autoria própria.

Os resultados demonstram que técnicas de geoprocessamento e análise hidrológica permitem desenvolver bases espaciais consistentes para estudos de modelagem hidrológica urbana, reduzindo subjetividades frequentemente associadas à definição manual de sub-bacias.

Como principal limitação, o trabalho não contempla a avaliação dos impactos hidrológicos decorrentes dos diferentes níveis de discretização, etapa que será desenvolvida posteriormente por

meio da implementação de modelos hidrológicos semi-distribuídos e da comparação de eventos observados.

Os produtos gerados possuem potencial aplicação em modelagem hidrológica urbana, estudos de drenagem, elaboração de mapas de suscetibilidade a inundações, sistemas de alerta hidrológico e planejamento de medidas de adaptação às mudanças climáticas.

CONCLUSÕES

• Foi desenvolvida uma metodologia reprodutível para construção de cenários multiescala de discretização espacial em bacias urbanas.

• A metodologia preserva a conectividade hidrológica e a coerência topográfica durante o processo de agregação das sub-bacias.

• Foram estruturados sete cenários espaciais independentes para futuras aplicações em modelagem hidrológica.

• O método pode ser reproduzido em outras bacias urbanas com características semelhantes.

• Os produtos obtidos possuem potencial aplicação em estudos de gestão do risco de inundações e planejamento da drenagem urbana.

• Os impactos hidrológicos associados a cada nível de discretização serão avaliados em etapa futura da pesquisa.

REFERÊNCIAS

a) DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. (2015). "*A review on hydrological models*". Aquatic Procedia, v.4, p.1001-1007.
b) IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.7
c) JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. (1988). "*Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.54, n.11, p.1593-1600.
d) KUNDZEWICZ, Z. W. (2008). "*Climate change impacts on the hydrological cycle*". Ecohydrology & Hydrobiology, v.8, n.2-4, p.195-203.
e) NETELER, M.; BOWMAN, M. H.; LANDSDALE, T.; METTLER, B. (2012). "*GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS*". Environmental Modelling & Software, v.31, p.124-130.
f) TARBOTON, D. G. (1997). "*A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*". Water Resources Research, v.33, n.2, p.309-319.
g) TUCCI, C. E. M. (2005). Modelos Hidrológicos. Editora da UFRGS, Porto Alegre/RS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes pelo suporte acadêmico e institucional que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. O autor Igor Paz agradece o apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), SEI-260003/020458/2025.