

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DESAFIOS NA DELIMITAÇÃO DE SUB-BACIAS PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Marina Fagundes e Souza¹; Anaí Floriano Vasconcelos²; Marcos Roberto Benso³ & Maria Clara Fava⁴

Abstract: Hydrological modeling is an important tool for flood risk management in urban areas. Digital Terrain Models (DTMs) serve as inputs for this process but require correction and adequate resolution to accurately represent reality. This correction impacts the watershed delineation stage, which is essential for establishing the model's foundation. This paper addresses the automated division into subcatchments using different methodologies. At the end of the process, it was found that the HEC-HMS tool yielded the best results, despite the need for data processing and error correction, which may have originated from inaccuracies in the input DTM correction.

Resumo: A modelagem hidrológica constitui uma importante ferramenta para o gerenciamento de risco de inundações em áreas urbanas. Os modelos numéricos de terreno (MNT) são entradas para esse processo, mas precisam ser corrigidos e ter resolução adequada para representarem fielmente a realidade. Essa correção impacta a etapa de delimitação de sub-bacias, essencial para formar a base do modelo. Este artigo trata da divisão automatizada em sub-bacias utilizando diferentes metodologias. Ao fim do processo, constatou-se que a ferramenta HEC-HMS apresentou os melhores resultados, apesar da necessidade de tratamento de informações e correção de erros que, possivelmente, foram oriundos de erros de correção do MNT de entrada.

Palavras-Chave – Qualidade dos MNTs; Modelagem hidrológica; Delimitação automática de sub-bacias.

INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta para o gerenciamento de risco de inundações em áreas urbanas. O Poder Público pode se valer de modelos hidrodinâmicos na tomada de decisões adequadas para a prevenção e mitigação de prejuízos - como perdas de vidas humanas ou danos patrimoniais - em caso de emergência (Demeritt *et al.*, 2010).

A topografia, representada pelos modelos numéricos de terreno (MNTs), agrupa informações essenciais para a modelagem de inundações. Viegas (2019) destaca dois tipos de MNTs:

- 1) **Modelos Digitais de Terreno (MDT):** modelos de elevação do terreno, sem vegetação e edificações, por exemplo;

¹⁾ Universidade Federal de São Carlos: Rodovia Washington Luís, km 235 - SP-310, bairro Jardim Guanabara, São Carlos (SP); telefone: (16) 3351-8111; fax: (16) 3361-2081; email: marina.fagundes@estudante.ufscar.br

²⁾ Universidade Federal de São Carlos: Rodovia Washington Luís, km 235 - SP-310, bairro Jardim Guanabara, São Carlos (SP); telefone: (16) 3306-6792; email: anai.vasconcelos@ufscar.br

³⁾ Universidade Federal de São Carlos: Rodovia Washington Luís, km 235 - SP-310, bairro Jardim Guanabara, São Carlos (SP); telefone: (16) 3351-8111; fax: (16) 3361-2081; email: marcosbenso@gmail.com

⁴⁾ Universidade Federal de São Carlos: Rodovia Washington Luís, km 235 - SP-310, bairro Jardim Guanabara, São Carlos (SP); telefone: (16) 3351-8111; fax: (16) 3361-2081; email: mcfava@ufscar.br

2) **Modelos Digitais de Elevação (MDE):** modelos que contêm informações de elevação de edificações, vegetação e terreno.

Chanjin Jeong *et al.* (2023) e Chowdhury (2023) afirmam que os **MDEs** são mais adequados para a modelagem hidrológica, uma vez que **representam o terreno com maior precisão**.

Os modelos devem ter resolução adequada para a modelagem, pois resoluções muito baixas prejudicam os resultados de modelos hidráulicos, especialmente em áreas urbanas e/ou de pequena extensão (Abreu Claudino *et al.*, 2022; Benso *et al.*, 2024). Muthusamy *et al.* (2021) destacam que MDEs com maiores resoluções geram melhores resultados, contanto que o modelo consiga lidar com a resolução. Ou seja, não necessariamente será usado o modelo de terreno de maior resolução, mas sim aquele de **resolução ótima** para a situação.

Além disso, o processo de tratamento dos modelos pode impactar profundamente a precisão da topografia. As incertezas e limitações dos modelos de terreno devem ser levadas em consideração, juntamente com a complexidade da área de estudo, os recursos disponíveis e a precisão almejada (Pereira *et al.*, 2024). Áreas urbanas estão mais suscetíveis a erros devido a alturas e densidades de construções, uso e ocupação do solo, infraestrutura urbana, entre outros fatores (Liu *et al.*, 2021; Okolie *et al.*, 2024; Olajubu *et al.*, 2021).

Por conseguinte, em áreas urbanas ou em estudos que demandam alta precisão, o *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*) é a opção mais indicada, pois oferece alta resolução espacial e precisão vertical para a modelagem do terreno. No entanto, seu pós-processamento deve ser cuidadoso, caso contrário, pode resultar em deterioração do modelo de terreno (Pereira *et al.*, 2024). Modelos de terreno corrigidos apresentam benefícios, tais como diminuição de deslocamentos de terrenos e melhores morfologias de cursos d'água (Okolie *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2021). Xu *et al.* (2021) afirmam, entretanto, que algumas formas de pós-processamento (como, por exemplo, filtros de suavização de ruído) não necessariamente resultam em bons modelos.

Portanto, a depender da correção aplicada, os modelos de terreno não necessariamente são boas representações do mundo real. Isso causa grandes impactos na delimitação de bacias, o que também é essencial para a modelagem hidrológica, já que a base do modelo deve estar dividida em sub-bacias. Para a modelagem, essas bacias devem ser complementares. Isto quer dizer que, se a bacia A está contida na bacia B, a área da bacia B deve ser igual a $B - A$. Além disso, são necessárias outras informações espaciais das sub-bacias, como uso do solo, *Curve Number* (CN) e área. Tudo isso é feito em *softwares* de geoprocessamento externos, uma vez que a maioria dos *softwares* de modelagem hidrológica não possuem ferramentas de geoprocessamento adequadas e nativas.

A extensão da área, o nível de detalhamento e até mesmo a resolução do modelo de terreno podem tornar esse processo demasiadamente complexo. A quantidade de sub-bacias desejadas, por exemplo, pode inviabilizar sua marcação individual; e uma alta resolução do modelo de terreno pode fazer com que o processo demore horas para concluir, ou mesmo, seja inviabilizado pela indisponibilidade de computadores com alta capacidade de processamento.

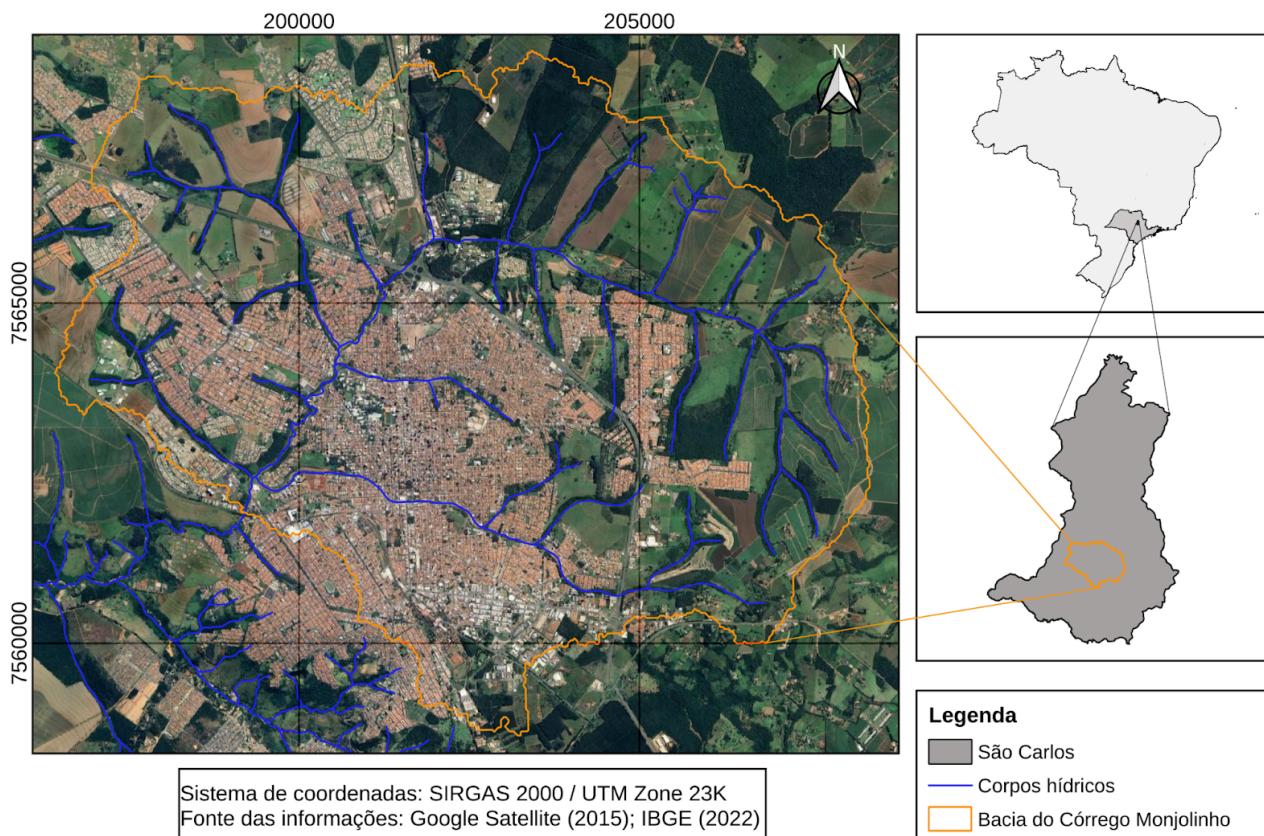
Dessa forma, é essencial dedicar um tempo considerável à etapa aqui denominada de **pré-modelagem**. Embora muitas vezes subestimada, essa etapa consiste no processamento de informações em *softwares* de geoprocessamento, com o objetivo de preparar a base a ser utilizada no *software* de modelagem hidrológica. Este artigo aborda a etapa de divisão em sub-bacias, utilizando a bacia do Monjolinho, em São Carlos (SP), como estudo de caso, apresentando os desafios enfrentados durante o processo e as estratégias adotadas para superá-los, com foco na

minimização dos esforços empregados. Além disso, busca-se compartilhar essas estratégias de forma clara e prática, de modo a auxiliar outros profissionais e pesquisadores a evitarem dificuldades semelhantes.

METODOLOGIA

A bacia do Monjolinho está localizada em São Carlos (SP), uma cidade de médio porte do interior do estado de São Paulo, com aproximadamente 255.000 habitantes. A área do município é de 1.126,907 km², dos quais 79,87 km² correspondem à área urbana (IBGE, 2025). Apesar de sediar duas universidades com importantes grupos de pesquisa sobre a área (Universidade de São Paulo – USP e Universidade Federal de São Carlos – UFSCar), São Carlos sofre corriqueiramente com alagamentos, enchentes, inundações e enxurradas, além de possuir um gerenciamento de riscos deficitário. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo.

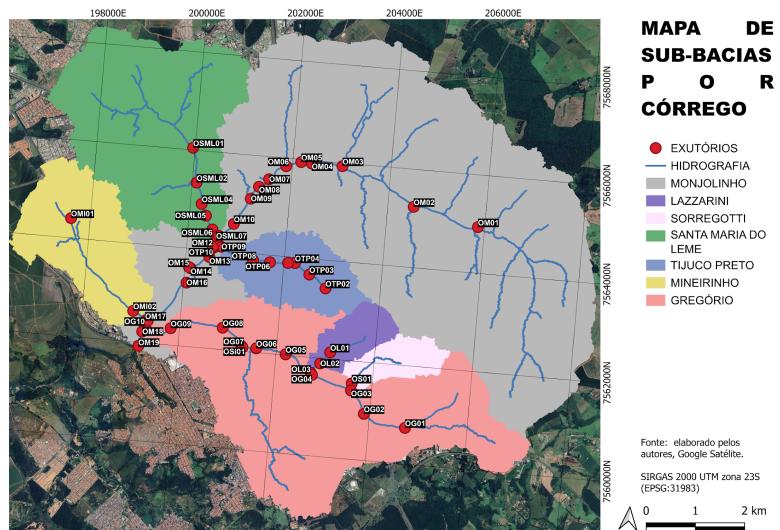
Figura 1 – Mapa de localização de São Carlos, SP, Brasil, e da bacia do Monjolinho.



Fonte: elaborado pelos autores.

Os MNTs utilizados para este estudo foram obtidos com base em levantamentos fotogramétricos realizados em 2024 e com alta resolução (50 cm). A primeira etapa para delimitação das sub-bacias é a definição de seus pontos de exutório. Para isso, marcaram-se cinquenta e quatro exutórios, nomeados como **O** (*outlet* ou exutório); **letras identificadoras do córrego** (G para Gregório, L para Lazzarini, MI para Mineirinho, M para Monjolinho, SML para Santa Maria do Leme, S para Sorregotti e TP para Tijuco Preto); e **número** referente ao ponto, marcado de montante para jusante. Por exemplo, OG01, OL03, OM19, entre outros. A Figura 2 apresenta a subdivisão de bacias em córregos e os pontos de interesse para exutório.

Figura 2 – Sub-bacias divididas por córregos, com os exutórios de interesse.



Fonte: elaborada pelos autores.

O MDE foi o MNT escolhido para o processamento da base para a modelagem hidrológica neste estudo, conforme recomendação de Chanjin Jeong *et al.* (2023) e Chowdhury (2023). Ao longo do processo, entretanto, realizou-se a delimitação das sub-bacias com o MDT para verificar se geraria resultados mais adequados. Como os resultados ainda apresentaram erros significativos, essa alternativa foi descartada e retornou-se para a delimitação a partir do MDE.

Durante o processo, foram aplicadas as ferramentas apresentadas na Tabela 1 para a divisão em sub-bacias.

Tabela 1 – Métodos utilizados.

Etapa	<i>Ferramentas</i>		
	<i>TauDEM</i>	<i>Whitebox Tools (RStudio)</i>	<i>HEC-HMS</i>
Pré-processamento	<i>Pit remove.</i>	<i>FillDepressions, BreachDepressions, FillBurn.</i>	<i>Preprocess sinks, Preprocess Drainage, Identify streams.</i>
Fluxo	<i>D8 Flow Direction, D8 Contributing Area.</i>	<i>D8FlowAccumulation.</i>	Não especificado
Informações adicionais	É necessário ajustar os pontos existentes aos resultados obtidos.	<i>Threshold = 15000, precisou-se “marcar” a hidrografia no MDE.</i>	É preciso remarcar todos os exutórios (<i>break points</i>) e aplicar <i>fix geometry</i> no <i>QGIS</i> .

Fonte: elaborada pelos autores.

Cogitou-se utilizar o *GRASS, plugin do QGIS*, mas ele foi considerado como última opção, caso as demais alternativas falhassem. O *GRASS* permite a divisão em sub-bacias, uma a uma, através da escolha manual do exutório. Entretanto, as bacias geradas são sobrepostas, o que envolveria a necessidade de realizar a diferença de áreas de cada uma delas.

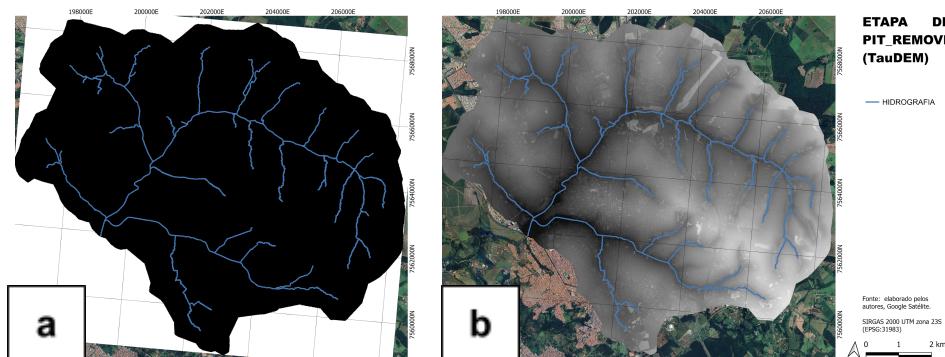
Além dos aspectos já apresentados, a quantidade necessária de sub-bacias configurava-se como um problema a ser contornado. MDEs de alta resolução, como era o caso, demoram muito

para serem processados ou precisam ser redimensionados. O redimensionamento foi feito através da ferramenta *r.resample* do *QGIS*. Devido às dimensões da rede de drenagem da bacia e a capacidade computacional disponível, optou-se por redimensionar o MDE para a resolução de dez metros.

RESULTADOS

A primeira ferramenta testada foi o TauDEM. Ao aplicar a ferramenta de *pit remove*, percebe-se que o *plugin* não consegue executar o arquivo redimensionado. Essa etapa identifica depressões no MDE e as eleva até o ponto mais baixo em seu limite. Ela é opcional, caso se acredite que as depressões existem na realidade. Como não havia essa certeza, a etapa foi aplicada no modelo. As Figuras 3a e 3b apresentam o resultado para, respectivamente, os MDEs de resolução de dez metros e de cinquenta centímetros.

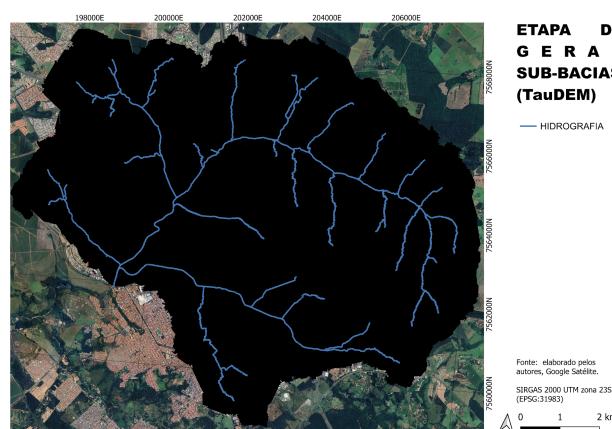
Figura 3 – Etapa de *pit_remove* para os MDEs de dez metros (a) e de cinquenta centímetros de resolução (b) (*TauDEM*).



Fonte: elaborada pelos autores.

É notório que o resultado para o MDE de dez metros é inadequado. Essa etapa foi executada diversas vezes e, em todas elas, a imagem resultou em apenas uma altitude para toda a bacia, o que não corresponde à realidade. Uma vez que os resultados para o MDE de dez metros não puderam ser utilizados, optou-se por dar continuidade ao processo com o MDE original, que apresentou resultados adequados após a etapa de *pit remove*. Utilizando os exutórios apresentados na Figura 2 e os resultados do processamento no *TauDEM*, a etapa de gerar sub-bacias resultou na Figura 4.

Figura 4 – Etapa de gerar sub-bacias através dos exutórios marcados (*TauDEM*).



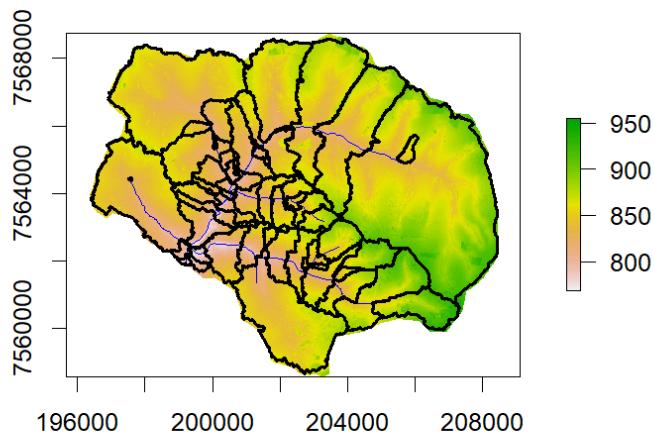
Fonte: elaborada pelos autores.

O processamento resultou em apenas uma camada de sub-bacia, igual à própria bacia do Monjolinho. Isso tornou necessário reajustar os pontos para que eles gerassem sub-bacias adequadas. O processo de reajustar os pontos e gerar as bacias, porém, se tornou inviável por duas razões: (i) o tempo demandado - cada etapa demorava horas para ser executada; e, (ii) o que deveriam ser bacias diferentes ficaram unificadas em uma única camada, algo inadequado para o objetivo da modelagem. Assim, o *TauDEM* foi descartado e partiu-se para a próxima ferramenta disponível.

O *RStudio*, junto com a ferramenta *Whitebox Tools* (WBT), é uma alternativa viável para geoprocessamento de arquivos (Wu & Brown, 2022). Entretanto, a automatização do processo ainda não é perfeita: o *software* apresentou dificuldade em distinguir ruas de córregos, o que gerou problemas de coerência nos primeiros resultados. Para contornar essa questão, foi necessário “marcar” a hidrografia, através de *streams_burn* e um arquivo *shapefile* da hidrografia gerado no *QGIS*. Este problema não necessariamente está associado ao *software* em si, mas pode ser resultado da presença de vegetação ripária nos corpos hídricos da área de estudo, o que causaria um falso divisor de águas no MDE.

O *RStudio* apresenta-se eficaz para a delimitação de bacias sobrepostas. Apesar de ainda existirem alguns problemas, após o redimensionamento do MDE para dez metros de resolução e a marcação da hidrografia na base, o *software* gerou cinquenta e uma das cinquenta e quatro sub-bacias inicialmente previstas. Os pontos não reconhecidos foram descartados. O resultado, apresentado pela visualização do próprio *RStudio*, está na Figura 5.

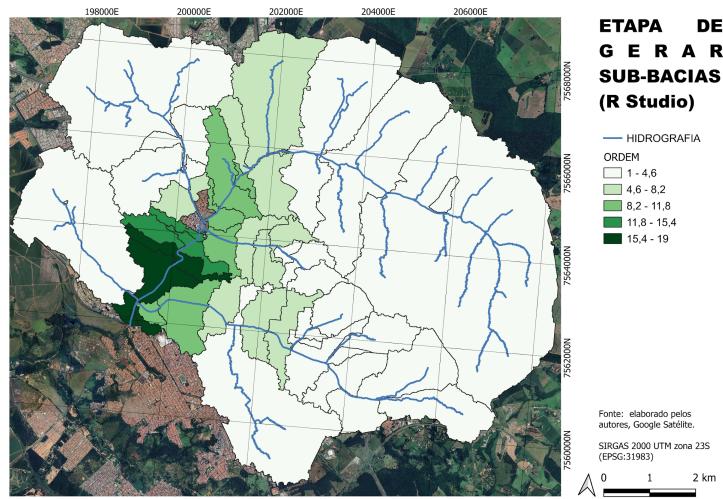
Figura 5 – Geração de sub-bacias sobrepostas no *RStudio*.



Fonte: elaborada pelos autores.

Entretanto, bacias sobrepostas não eram o objetivo desta modelagem. Para contornar esse problema, foi necessário subtrair, de forma semi-manual, as bacias entre si. Isso foi um processo demorado e complexo, que gerou os resultados apresentados na Figura 6. A ordem é um parâmetro adimensional que indica o nível de conectividade de uma bacia em uma rede de drenagem. Geralmente, bacias de ordem baixa encontram-se à montante dos córregos, enquanto as bacias de ordem alta se localizam à jusante.

Figura 6 – Geração de sub-bacias complementares no *RStudio*.

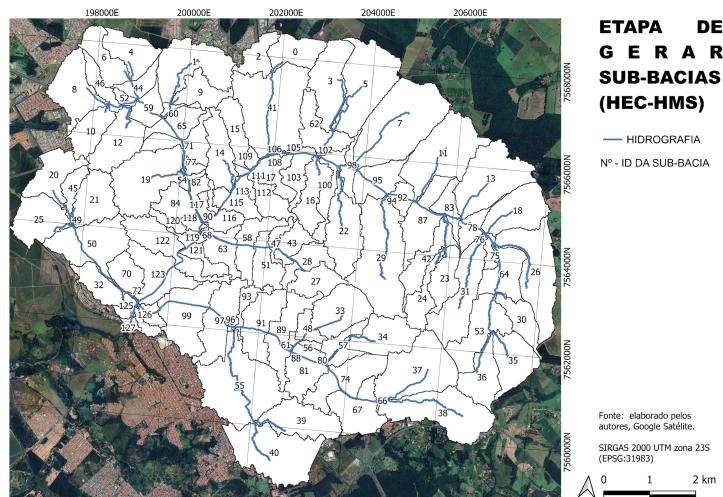


Fonte: elaborada pelos autores.

Mesmo assim, o resultado não foi satisfatório: as bacias ainda necessitariam de muitas correções manuais e algumas (por exemplo, no trecho final do Santa Maria do Leme) sequer foram delimitadas.

Por fim, dadas as dificuldades com as ferramentas anteriores, explorou-se o *HEC-HMS*. Ao realizar o processo no *software* e remarcar todos os exutórios de forma adequada aos resultados, o programa gerou automaticamente as sub-bacias. Para melhorar o resultado e para evitar a geração de hidrografia inadequada, utilizou-se o MDE de dez metros de resolução com a hidrografia marcada pelo *RStudio*. Este processo resultou **em cento e vinte e sete sub-bacias**. Essas sub-bacias eram individuais e cobriram completamente a área de estudo, o que as configurou como a solução mais adequada dentre as exploradas. A Figura 7 ilustra as sub-bacias geradas pelo *software*, que foram exportadas em *shapefile* para uso no *QGIS*:

Figura 7 – Geração de sub-bacias com o MDE de dez metros de resolução e com hidrografia marcada no *HEC-HMS*.



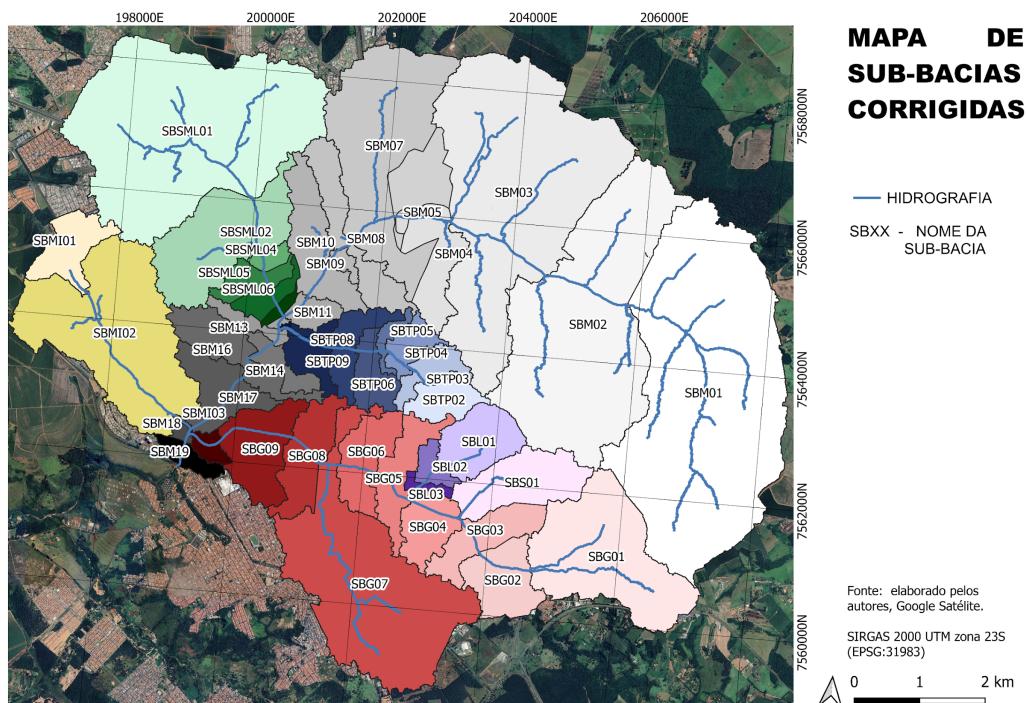
Fonte: elaborada pelos autores.



Após a importação das sub-bacias no *QGIS* e a aplicação do *fix geometry*, as sub-bacias resultantes do *HEC-HMS* foram unidas e dissolvidas para coincidir com as sub-bacias de interesse para o estudo. *Fix geometry* é uma ferramenta do *QGIS* que repara geometrias inválidas em camadas vetoriais, como auto-intersecção ou geometrias com falhas. Esse passo é essencial, uma vez que geometrias inválidas podem causar erros de processamento em etapas posteriores.

Depois disso, as bacias foram analisadas uma a uma e corrigidas manualmente através da readequação de vértices e com base no conhecimento dos autores das suas características físicas oriundas de visitas a campo. Ao final de todo o processo, cinco exutórios foram eliminados, ou seja, o projeto final foi composto por quarenta e nove exutórios e, consequentemente, quarenta e nove sub-bacias. Os pontos descartados não foram reconhecidos como exutórios pelo *HEC-HMS*, ou seja, não geraram sub-bacias, e por isso foram descartados. O resultado se encontra na Figura 8.

Figura 8 – Sub-bacias-corrigidas.



Fonte: elaborada pelos autores.

CONCLUSÃO

O processo de divisão em sub-bacias, uma das etapas da pré-modelagem, é usualmente considerado como corriqueiro, mas mostrou-se mais complexo e demandou mais tempo do que o inicialmente previsto. Existem várias ferramentas de delimitação automática de bacias, mas elas não necessariamente funcionam de maneira adequada. Erros não corrigidos no MDE, resolução maior do que o poder de processamento, tamanho da bacia, posicionamento dos exutórios são alguns dos fatores que impactam esse processo.

Apesar dos avanços tecnológicos, a modelagem hidrológica e todas as etapas precedentes a ela ainda são processos que dependem muito de um especialista e de conhecimento de campo da área a ser modelada. Além disso, mesmo os softwares mais populares, ainda não são capazes de

realizar todo o processo internamente de forma adequada, sem o uso de *softwares* complementares para o geoprocessamento.

Das três alternativas exploradas, o *HEC-HMS* apresentou os melhores resultados, apesar de ainda necessitar de uma etapa manual de tratamento de informações e correção de erros.

REFERÊNCIAS

- Abreu Claudino, C. M. D., Abrantes, S. L. M., Almeida, A. A. R. D., Sena, T. D. S., Silva, C. S. D., & Filgueira, H. J. A. (2022). AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA GERAÇÃO DE MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO A PARTIR DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND). *Geosciences = Geociências*, 41, 227–241. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i1.16313>
- Benso, M. R., Macedo, M. B. de, Lopes, A. V., Vasconcelos, A. F., Carvalho, B. C. S. de, Costa, M. E. L., Tomasella, J., Fava, M. C., & Biscaro, T. S. (2024). *Efeito da resolução de modelos digitais de elevação na acurácia de modelagem hidráulica em áreas urbanas*. 10. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16211>
- Chanjin Jeong, Dong-Hyun Kim, Hyung-Ju Yoo, & Seung-Oh Lee. (2023). Selection of Elevation Models for Flood Inundation Map Generation in Small Urban Stream: Case Study of Anyang Stream. *Advances in Technology Innovation*, 9(1), 28–41. <https://doi.org/10.46604/aiti.2023.12000>
- Chowdhury, Md. S. (2023). Modelling hydrological factors from DEM using GIS. *MethodsX*, 10, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102062>
- Demeritt, D., Nobert, S., Cloke, H., & Pappenberg, F. (2010). Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorological Applications*, 17(2), Artigo 2. Scopus. <https://doi.org/10.1002/met.194>
- Liu, Y., Bates, P. D., Neal, J. C., & Yamazaki, D. (2021). Bare-Earth DEM Generation in Urban Areas for Flood Inundation Simulation Using Global Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 57(4), e2020WR028516. <https://doi.org/10.1029/2020WR028516>
- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088>
- Okolie, C., Mills, J., Adeleke, A., & Smit, J. (2024). DIGITAL ELEVATION MODEL CORRECTION IN URBAN AREAS USING EXTREME GRADIENT BOOSTING, LAND COVER AND TERRAIN PARAMETERS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W9-2024, 275–282. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-275-2024>
- Olajubu, V., Trigg, M. A., Berretta, C., Sleigh, A., Chini, M., Matgen, P., Mojere, S., & Mulligan, J. (2021). Urban correction of global DEMs using building density for Nairobi, Kenya. *Earth Science Informatics*, 14(3), 1383–1398. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00647-w>
- Pereira, T. S. R., Santos, K. A. dos, Reis, G. da C. dos, Cardoso, B. A., Ribeiro, H. J., & Formiga, K. T. M. (2024). AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO EM SIMULAÇÕES DE INUNDAÇÕES URBANAS: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA. 10. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16639>
- São Carlos (SP) | Cidades e Estados | IBGE. (2025). IBGE. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-carlos.html>
- R Core Team (2024). “R: A Language and Environment for Statistical Computing”. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Viegas, V. S. (2019). *Modelo Digital De Elevação Aplicado à Áreas Urbanas: Um Estudo de Caso para o Centro de Niterói (RJ)* [Mestrado em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)]. <http://objdig.ufrj.br/16/teses/882071.pdf>
- WU, Q., BROWN, A. (2022). “whitebox: 'WhiteboxTools' R Frontend”. R package version 2.2.0. <<https://CRAN.R-project.org/package=whitebox>>
- Xu, K., Fang, J., Fang, Y., Sun, Q., Wu, C., & Liu, M. (2021). The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and a Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 890–902. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00377-z>

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida à primeira autora e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do projeto “Avanços em ferramentas de *nowcasting* aplicadas a inundações urbanas” Processo: 446043/2023-0, por financiar essa pesquisa.