

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

EFEITOS DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDE) NA MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIA HIDROGRÁFICA

*Maria Eduarda Cruz Ferreira¹ ; Letícia Lopes Martins²; Jener Fernando Leite de Moraes³;
Édson Luis Bolfe⁴ & Gabriel Constantino Blain⁵*

Abstract: The spatial resolution of Digital Elevation Models (DEM's) directly influences hydrological modeling, by affecting terrain representation, drainage network delineation, and the surface runoff and infiltration process. This study evaluated the impact of the DEM spatial resolution on hydrological outputs simulated by the SWAT model (*Soil and Water Assessment Tool*) in the Agrometeorological District watershed of Alto Alegre – SP. Two scenarios were considered, using DEM with 30m and 90 m spatial resolution, while keeping all other input data constant. Simulation were performed on a monthly scale for the period of 1991-2019, with a 5-year warm up period. Model adjustments included parameters such as curve number (CN II), the factor C of the USLE equation, vegetal growth and management operations. The analyzed variables were streamflow and surface runoff, evaluated as a monthly averages at the watershed outlet. The 30 m DEM provide a more detailed representation of the drainage network and greater sensitivity to seasonal variations, resulting in slightly higher streamflow and surface runoff during the wettest months. The Kolmogorov-Smirnov test (two samples) indicated no statistically significant differences between the scenarios. However, the qualitative analysis highlights the importance of using higher-resolution DEMs to achieve more accurate spatial representation on hydrological processes.

Resumo: A resolução espacial dos Modelos Digitais de elevação (MDE's) influencia diretamente a modelagem hidrológica, afetando a representação do relevo, a delimitação da rede de drenagem, e os processos de escoamento e infiltração. Este estudo avaliou o efeito da resolução espacial do MDE sobre os resultados hidrológicos simulados pelo modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na bacia do Distrito Agrometeorológico de Alto Alegre – SP. Foram considerados dois cenários, com resoluções espaciais de 30 e 90 metros, mantendo constantes os demais dados de entrada. A simulação foi realizada em escala mensal para o período de 1991 a 2019, com cinco anos de aquecimento. Ajustes foram feitos em parâmetros como Curva Número (CN II), fator C da equação USLE, crescimento vegetal e operações de manejo. As variáveis analisadas foram a vazão e escoamento superficial, ambos em escala de média mensal, no exutório da bacia. A resolução de 30 metros resultou em maior detalhamento da rede de drenagem e maior sensibilidade às variações sazonais, refletindo em valores ligeiramente superiores de vazão e escoamento superficial nos meses mais chuvosos. O teste de Kolmogorov-Smirnov (duas amostras) indicou ausência de diferença estatística

1) Pós-graduação – Instituto Agronômico de Campinas, Av. Barão de Itapura, 1481, Campinas – SP. mariaferreira.ca@gmail.com

2) Centro de Solos – Instituto Agronômico de Campinas, Av. Barão de Itapura, 1481, Campinas – SP. leticia.lufv@gmail.com

3) Centro de Solos – Instituto Agronômico de Campinas, Av. Barão de Itapura, 1481, Campinas – SP. jener.moraes@sp.gov.br

4) Sensoriamento Remoto – Embrapa Agricultura Digital, Av. Dr. André Tosello, 209, Campinas – SP. edson.bolfe@embrapa.br

5) Centro de Biosistemas e Pós-colheita – Instituto Agronômico de Campinas, Av. Theodureto de Almeida Camargo, 1500, Campinas – SP. gabriel.blain@sp.gov.br

significativa entre os cenários. No entanto, os resultados qualitativos reforçam a importância do uso de resoluções mais detalhadas quando se busca maior fidelidade na representação espacial dos processos hidrológicos.

Palavras-Chave – Simulação hidrológica, Modelo SWAT.

INTRODUÇÃO

Análises hidrológicas em bacias hidrográficas partem da necessidade de se entender o funcionamento do balanço hídrico e os processos envolvidos no ciclo hidrológico. Diante disso, os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas têm avançado significativamente devido à necessidade de entender os processos que regulam o fluxo da água e de sedimentos, bem como seus efeitos sobre a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos. Nesse contexto, os modelos hidrológicos se estabeleceram como instrumentos fundamentais para representação desses fenômenos, apresentando grande potencial para a simulação de cenários relacionados a mudanças climáticas, modificações no uso do solo e intervenções humanas em diversas escalas espaciais e temporais (Blainski *et al.*, 2017; Soares, 2008).

Modelos hidrológicos são representações matemáticas que auxiliam na predição do fluxo hídrico superficial e subterrâneo, tendo a bacia hidrográfica como principal unidade de análise e a precipitação pluvial como principal entrada do sistema. Esses modelos simplificam processos hidrológicos complexos, frequentemente não lineares e multiescalares, permitindo compreender o equilíbrio dinâmico da bacia, mesmo sob impactos antrópicos (Pullar e Springer, 2000).

Diversos modelos matemáticos, tanto empíricos quanto teóricos, foram desenvolvidos para simular a produção de sedimentos e a vazão, visando estimar o escoamento superficial e seus efeitos na erosão hídrica. Esses modelos são aplicados no planejamento e na gestão integrada das bacias hidrográficas, podendo abranger sua totalidade ou áreas específicas (Alves, 2019). Dentre os modelos hidrossedimentológicos disponíveis, o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service do United States Department of Agriculture* (ARS - USDA), tem se destacado pela sua ampla aplicação global (Gassman *et al.*, 2007; Bressiani *et al.*, 2015).

A dinâmica hidrológica é diretamente influenciada e impactada pelo relevo, cujas variações são representadas pelos Modelos Digitais de Elevação (MDE) e pelo uso e ocupação do solo, em uma bacia hidrográfica. Sabe-se que os MDE's são inputs cruciais para a realização de simulações hidrológicas, uma vez que permitem a representação da topografia da bacia hidrográfica e influenciam diretamente na estimativa do escoamento superficial, direção de fluxo e delimitação de sub-bacias (Cruz *et al.*, 2011). Destaca-se ainda a resolução e o detalhamento dos mapas de entrada para o modelo, como MDE's, uso e ocupação e tipos de solo, que desempenham um papel importante na precisão da modelagem hidrológica, sendo que imagens mais detalhadas fornecem maior sensibilidade aos resultados. Em contrapartida, a utilização de resoluções menos sensíveis reduz a complexidade geral do processo de modelagem distribuída, mas a abordagem espacial de importantes características pode ser prejudicada, levando a resultados não apropriados (Shrestha *et al.*, 2006). Diante disso, formulou-se a hipótese de que a utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) com diferentes resoluções espaciais resultaria em variações significativas nos valores de vazão e escoamento superficial, uma vez que a modelagem hidrológica é fortemente dependente da resolução espacial do MDE, que determina o detalhamento do relevo, a definição da rede de drenagem e a correta representação dos processos hidrológicos na escala da bacia.

Considerando a influência da resolução espacial dos dados de entrada na modelagem hidrológica, este estudo teve como objetivo analisar o desempenho de uma simulação hidrológica na

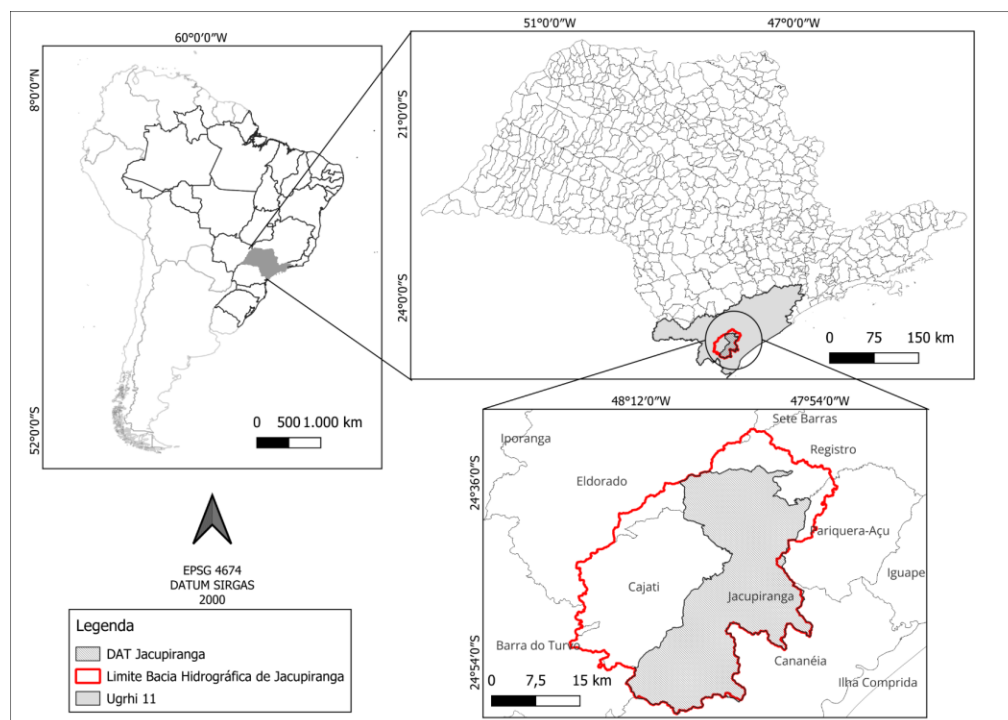
bacia do Distrito Agrometeorológico de Jacupiranga – SP, a partir da comparação entre MDE's com resoluções espaciais de 30 e 90 m.

METODOLOGIA

Área de estudo

O Distrito Agrometeorológico de Jacupiranga (DATJG) se localiza no município de Jacupiranga (SP), região do Ribeira, no litoral paulista (Figura 1), entre as coordenadas 21°42'06" e 21°31'38" de latitude Sul e 50°18'20" e 50°03'39" de longitude Oeste, com altitude média de 174m, e território de aproximadamente 174,136 km². Faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI)-11 (Ribeira de Iguapé e Litoral Sul). O bioma predominante da região é a Mata Atlântica, com vegetação dominante de pastagem e atividade agrícola concentrada no cultivo de banana. Segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013) o clima da região é Cfa – Subtropical úmido, oceânico sem estação seca e com verão quente. A temperatura do ar média torna-se, aproximadamente, 21,2°C e precipitação anual com cerca de 1800 mm.

Figura 1 – Mapa de localização do DAT de Jacupiranga, da Bacia Hidrográfica de estudo e UGRHI-11.



Modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT é um modelo semiconceitual, semidistribuído e contínuo no tempo, que opera em um passo de tempo diário, requerendo uma grande quantidade de dados espaciais e não espaciais que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais, explicando a razão entre a chuva e a vazão do rio e elucida matematicamente o que acontece em uma bacia hidrográfica (Blainski, 2017).

Abaixo serão descritas informações referentes aos componentes de entrada de dados utilizados pelo software para a simulação. A combinação desses dados de entrada resulta na delimitação de

Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's), que são combinações individuais das diferentes combinações entre o relevo, uso e ocupação do solo e pedologia (Arnold *et al.*, 1998).

Inputs para o modelo SWAT

Os MDE's utilizados foram obtidos a partir da plataforma Copernicus DEM, proveniente de dados do satélite Sentinel-2. Foram selecionadas duas resoluções espaciais distintas, sendo elas de 30x30 e 90x90 metros, com o objetivo de avaliar se há influência na representação do relevo sobre a modelagem hidrológica.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado por meio de classificação supervisionada, utilizando imagens do satélite Sentinel-2 referentes ao ano de 2022. A classificação foi realizada por meio do algoritmo Random Forest. O levantamento identificou as seguintes categorias de classificação de uso e ocupação do solo: água (WATR), vegetação nativa (FRSE), banana (BANA), pastagem (PAST), solo exposto (BSVG), mineração (MINR) e área urbana (URHD).

As informações pedológicas foram obtidas a partir da atualização do mapa pedológico do estado de São Paulo publicado por Rossi (2017), que apresenta mapas na escala de 1:500.000. Foram identificadas as seguintes classes de solos: CAMBISSOLO LATOSSOLO AMARELO LATOSSOLO /VERMELHO-AMARELO, NITOSSOLO VERMELHO. Além de associações e complexos de solos.

A declividade é um parâmetro fundamental para a modelagem hidrológica, contribuindo diretamente na definição das HRU's, fornecendo informações importantes referentes às características físicas da bacia. Para este estudo foram utilizadas as seguintes classes de declividade, de acordo com a EMBRAPA (1979): 0-3%, 3-8%, 8-20%, 20-45%, 45-75% e >75%.

Para a modelagem hidrológica, o modelo SWAT necessita de dados meteorológicos diários, incluindo precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar (Neitsch *et al.*, 2011). No presente estudo, utilizou-se as variáveis precipitação e temperaturas máxima e mínima, obtidas a partir do conjunto de dados de reanálise - Dados Meteorológicos Diários em Grade para o Brasil, desenvolvido por Xavier *et al.* (2022). Foi utilizado o período de 01 de janeiro de 1991 a 31 de dezembro de 2019 para a simulação, totalizando 29 anos de dados, sendo os primeiros cinco anos (1991-1995) destinados ao período de aquecimento (warm up) do modelo, utilizado para estabilizar as condições iniciais e garantir maior acurácia dos resultados simulados.

Modelagem hidrológica

Modificações nos dados de entrada

De acordo com Arroio Júnior (2016), a caracterização mais detalhada da bacia hidrográfica auxilia no processo de simulação hidrológica, minimizando possíveis erros potenciais. Diante disso, foram realizadas modificações nos dados de entrada do modelo SWAT com intuito de representar de forma mais precisa as condições reais da bacia da área de estudo. Dentre os principais ajustes realizados nos dados de entrada, ajustou-se os parâmetros conforme recomendado por Martins *et al.* (2020), destaca-se a modificação da Curva Número (CN II), parâmetro fundamental para a estimativa do escoamento superficial, que foram adaptados conforme as condições de uso e cobertura do solo predominantes na região de acordo com os estudos realizados por Sartori (2004). Também foi ajustado o fator C da equação USLE, com o objetivo de refinar a simulação da produção de sedimentos de acordo com o tipo de cobertura vegetal e manejo adotado. Além disso, foram alterados parâmetros relacionados ao crescimento vegetal, como aqueles que controlam a taxa de

desenvolvimento e cobertura das culturas. Por fim, foram removidas as operações de colheita nos arquivos de manejo para as classes de uso do solo FRSE e PAST (Martins *et al.*, 2020).

Ressalta-se que, por se tratar de uma etapa inicial do estudo, não foram realizados os processos de calibração e validação do modelo. Até o momento, o objetivo central é analisar os efeitos da resolução espacial dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) sobre os resultados hidrológicos, com base na comparação entre as resoluções de 30 e 90 metros. A calibração e validação do modelo estão previstas para etapas posteriores, a fim de aprofundar a análise da acurácia das simulações.

Cenários

Foram estabelecidos dois cenários de simulação hidrológica com o objetivo de avaliar a influência da resolução espacial dos MDE's sobre os resultados do modelo SWAT (Cenário 1: MDE com 30 m de resolução; Cenário 2: MDE com 90 m de resolução). Para a comparação, foram utilizados os resultados com base nas variáveis hidrológicas de vazão média mensal, que escoam através do exutório da bacia em cada mês, refletindo o equilíbrio entre precipitação, escoamento e infiltração, e escoamento superficial médio mensal que se refere ao volume de água proveniente do escoamento direto sobre a superfície do solo, ambas extraídas no ponto de saída da bacia hidrográfica (exutório), onde havia dados de vazão observados. A comparação estatística entre os dois cenários foi realizada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras (K-S) com 5% de significância, com o objetivo de verificar se as distribuições de vazão e escoamento superficial diferem significativamente entre as resoluções de 30 e 90 m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No cenário 1, a bacia foi subdividida em 12 sub-bacias, e no cenário 2, a bacia foi subdividida em 13 sub-bacias. Tal ocorrência pode ser explicada pela generalização do relevo promovida pela resolução mais “grosseira”, que pode alterar a direção do fluxo e definição da rede de drenagem e, consequentemente, o delineamento da rede de drenagem.

Verificou-se que não há diferenças significativas entre os cenários avaliados. Em relação às análises da vazão média mensal e escoamento superficial médio mensal (Figuras 2 e 3, respectivamente), observa-se que não há diferenças entre os cenários avaliados, corroborando os resultados observados na análise de Kolmogorov-Smirnov. Considerando a ausência de diferenças significativas entre os cenários avaliados, a utilização do MDE com resolução espacial de 30 metros é recomendada para estudos que demandem maior detalhamento do relevo, especialmente porque o tempo de processamento foi equivalente ao do MDE de 90 metros. Quando analisados os valores de vazão máxima, mínima e média, nota-se uma pequena diferença, sendo superiores para a resolução de 30 m. Essa diferença se concentrou principalmente nos meses mais chuvosos, sugerindo que uma resolução mais detalhada proporciona maior sensibilidade do modelo às variações sazonais de precipitação.

Figura 2 – Comparação entre os valores de vazão média mensal (m^3/s) no intervalo de 1996-2019, simulados para as resoluções espaciais (RE) de 30 e 90 m.

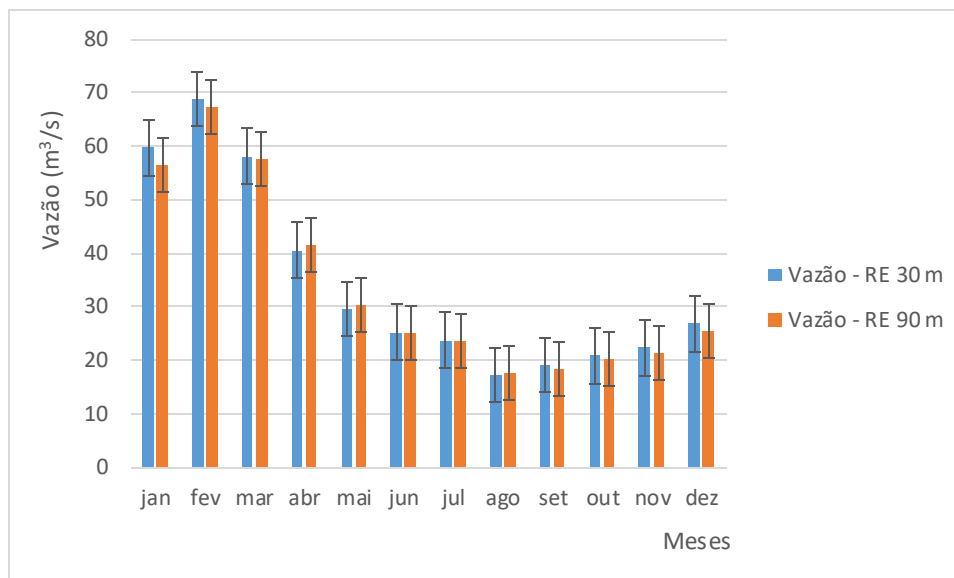
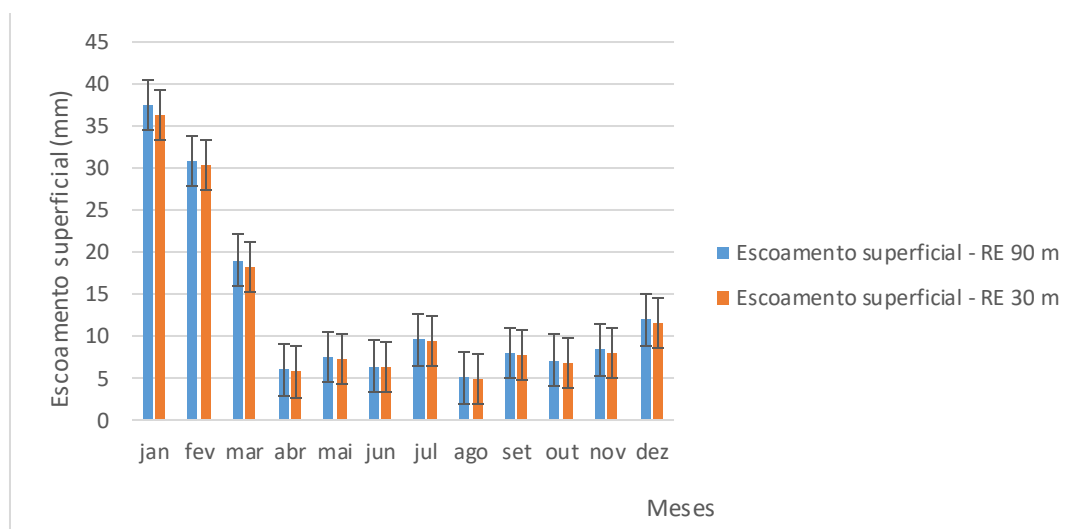


Figura 3 – Comparação entre os valores de escoamento superficial médio mensal (mm) no intervalo de 1996-2019, simulados para as resoluções espaciais (RE) de 30 e 90 m.



As análises referentes aos valores mínimos, médios e máximos da vazão e escoamento superficial são apresentados na Tabela 1. Essa análise descritiva é fundamental para compreender as dinâmicas hidrológicas nos diferentes cenários avaliados, permitindo identificar padrões e variações associadas às resoluções espaciais adotadas. No escoamento superficial, os valores máximos foram mais elevados no cenário com resolução de 30 m, o que pode ser atribuído ao melhor detalhamento das feições do relevo, permitindo uma representação mais precisa da geração do escoamento direto. Por outro lado, a média do escoamento superficial foi superior no cenário com resolução de 90 m, resultado que pode ser relacionado a maior generalização do relevo, a qual tende a confundir as áreas

de escoamento e infiltração, o que pode ser atribuído a uma representação menos precisa do relevo nas imagens com menor resolução, resultando em uma confusão na subdivisão da bacia. No que se refere à vazão, observou-se valores superiores no cenário 1 (com o MDE de 30 m), reforçando a sensibilidade do modelo às variações do relevo quando se utiliza uma resolução espacial mais detalhada.

Tabela 1 – Vazão e escoamento superficial máximo, mínimo e médio

Resolução Espacial	Vazão			Escoamento superficial		
	Mínima	Máxima	Média	Mínimo	Máximo	Médio
30 m	1,5	140,8	34,4	0,0	128,8	12,7
90 m	1,4	137,8	33,8	0,0	127,7	13,1

CONCLUSÃO

As análises realizadas podem auxiliar na escolha da resolução espacial de MDE's ao demonstrar que, embora resoluções mais generalizadas, como a de 90 m, sejam capazes de fornecer resultados hidrológicos consistentes em termos estatísticos, resoluções mais detalhadas, como de 30 m, oferecem maior precisão na definição da rede de drenagem.

Os MDE's, no que tange à avaliação da resolução espacial, não mostram diferenças significativas para esta fonte de variação. Entretanto, através da avaliação qualitativa da comparação visual dos mapas das sub-bacias, foi possível observar que há diferença significativa na identificação do relevo, tornando as imagens com resolução espacial de 30 metros mais seguras em uma modelagem cujo objetivo seja um maior detalhamento da rede hidrográfica e do relevo.

Trabalhos futuros devem considerar a calibração e validação com dados observados, bem como a análise de outras variáveis hidrológicas e a incorporação de diferentes cenários de uso e ocupação, com o intuito de aprofundar e enfatizar a importância da resolução espacial na modelagem hidrológica em bacias hidrográficas, reforçando que a escolha da resolução deve estar alinhada aos objetivos do estudo e à complexidade da bacia hidrográfica analisada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo para a primeira autora e pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa (processo 304609/2022-6) para o quinto autor.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), Brasil. (Proc. 2022/09319-9; [Proc. 2024/08132-8]).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. (2013). *Köppen's climate classification map for Brazil*. *Meteorologische Zeitschrift*. [Online] 22 (6), 711–728.10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVES, J. C. B. (2019). *Simulação da vazão com o modelo swat com dados meteorológicos observados e de reanálises*. Instituto Agronômico de Campinas. (Dissertação de Mestrado).
- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S., WILLIAMS, J.R. (1998). *Large area hydrologic modeling and Assessment part I: model development*. *Journal of the American Water Resources Association* [Online], 34. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- BLAINSKI, E., ACOSTA, E., NOGUEIRA, P. C. P. (2017). *Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense*. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* [Online], 12, 226-237. 10.4136/ambi-agua.1951
- BRESSIANI, D. DE A., GASSMAN, P. W., FERNANDES, J. G., GARBOSSA, L. H. P., SRINIVASAN, R., BONUMÁ, N. B., MENDIONDO, E. M. (2015). *Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* [online]. 8, 9-35. <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe>
- CRUZ, C. B. M., BARROS, R. S. DE., CARDOSO, P. V., REIS, R. B., ROSÁRIO, L. S. DO., BARBOSA, S. S., RABACO, L. M. L., LOURENÇO, J. S. Q. (2011). *Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR*. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. v15.p5463-5470. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/09.28.16.42/doc/@sumario.htm>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1979). *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos*. Rio de Janeiro. Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos. 83 p. (SNLCS. Miscelânea, 1)
- GASSMAN, P. W., REYES, M. R., GREEN, C. H., ARNOLD, J. G. (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. American Society of Agricultural and Biological Engineers [Online], 50. https://www.card.iastate.edu/research/resource-and-environmental/items/asabe_swat.pdf
- MARTINS, L. L., MARTINS, W. A., MORAES, J. F. L., PEDRO JÚNIOR, M. J., MARIA, I. C. (2020). *Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar*. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.13, n.02, p.576-594. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/243477/34948>
- NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation*. Version 2009. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas AgriLife Research.
- PULLAR, D., SPRINGER, D. (2000). *Towards integrating GIS and catchment models*. *Environmental Modelling Software*, v15, p451-459. [Online].
- SARTORI, A. (2004). *Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos*. 189f. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil Agricultura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SHRESTHA, R.; TACHIKAWA, Y.; TAKARA, K. (2006). *Input data resolution analysis for distributed hydrological modeling*. Journal of hydrology, v. 319, n. 1-4, p. 36-50.

SOARES, A. M. (2008). *A dinâmica hidrológica na bacia do alto curso do rio Uberabinha - Minas Gerais*. 225 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15910>

XAVIER, A. C., SCANLON, B. R., KING, C. W., & ALVES, A. I. (2022). *New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)*. International Journal of Climatology, 42(16), 8390–8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>