XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

# CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA EM BACIA HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA POR MEIO DO MODELO SWAT+

*Monaliza Araújo de Santana [1]; Aline Maria Soares das Chagas [1]; Mariana Caroline Gomes de Lima [1]; Mirella Veras Maciel [1]; Talita Xavier Gouveia [1]; Abelardo Antônio Assunção Montenegro[1]; Rennan Cabral Nascimento [2]; Yuri Jacques Agra Bezerra da Silva [1]*

**RESUMO** – A degradação dos solos constitui um dos maiores desafios ambientais nas regiões semiáridas, pois compromete os recursos hídricos, a produção agrícola e principalmente a sustentabilidade dos ecossistemas. Este estudo teve como objetivo caracterizar morfometricamente a sub-bacia do Riacho do Brum, localizada no Médio Jaguaribe (CE), com uma área de 293,85 km², através de técnicas de geoprocessamento e modelagem hidrológica, utilizando o modelo SWAT+. A delimitação automática da bacia e a extração dos parâmetros fisiográficos foram realizadas no QGIS integrado ao SWAT+, a partir de dados do MDE. Foram analisados parâmetros geométricos da rede de drenagem e do canal principal. Os resultados indicaram que a bacia apresenta formato alongado, com valores de Kf = 0,401, Ic = 0,342 e Kc = 1,69, sugerindo baixa propensão a enchentes. A rede de drenagem foi classificada como de 5ª ordem, com Dd = 1,65 km km$^{-2}$ e Is = 1,31, caracterizando um canal principal moderadamente sinuoso. Apesar da configuração morfométrica reduzir a ocorrência de cheias rápidas, fatores ligados ao uso e ocupação do solo e às características edáficas podem intensificar a vulnerabilidade ambiental. Os resultados reforçam a importância da integração entre geotecnologias e modelagem hidrológica para o planejamento ambiental e a gestão sustentável dos recursos hídricos em regiões semiáridas.

**ABSTRACT**– Soil degradation is one of the greatest environmental challenges in semi-arid regions, as it compromises water resources, agricultural production, and especially ecosystem sustainability. This study aimed to morphometrically characterize the Riacho do Brum sub-basin, located in the Médio Jaguaribe region (Ceará), with an area of 293.85 km², through geoprocessing techniques and hydrological modeling using the SWAT model. The automatic delineation of the basin and extraction of physiographic parameters were carried out in QGIS integrated with SWAT, based on DEM data. Geometric parameters, drainage network, and the main channel were analyzed. Results indicated that the basin has an elongated shape, with values of Kf = 0.401, Ic = 0.342, and Kc = 1.69, suggesting low susceptibility to flooding. The drainage network was classified as fifth order, with Dd = 1.65 km km$^{-2}$ and Is = 1.31, characterizing a moderately sinuous main channel. Although the morphometric configuration reduces the occurrence of flash floods, factors related to land use and occupation, as well as edaphic characteristics, may intensify environmental vulnerability. The findings highlight the importance of integrating geotechnologies and hydrological modeling for environmental planning and sustainable management of water resources in semi-arid regions.

**Palavras-Chave** – degradação dos solos; semiárido; morfometria

[1]) Universidade Federal Rural de Pernambuco. Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n –Recife – PE, 52171-900. E-mails: monaliza.araujo@ufrpe.br; alinemschagas@gmail.com; mariana.caroline@ufrpe.br; mirellaverasambiental@gmail.com; talita.xgouveia@ufrpe.br; abelardo.montenegro@ufrpe.br; yuri.silva@ufrpe.br

[2]) Instituto Nacional do Semiárido. Av. Francisco Lopes de Almeida, 4000 – Campina Grande – PB, 58434-700. E-mail: rennan.nascimento@insa.gov.br

## INTRODUÇÃO

A degradação dos solos constitui uma das principais preocupações ambientais da atualidade, comprometendo a estabilidade dos ecossistemas, a produtividade agrícola e o bem-estar humano, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Segundo a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (UNCCD), aproximadamente 25% da superfície terrestre encontra-se degradada, afetando diretamente os meios de subsistência de mais de 1,5 bilhão de pessoas em todo o mundo. Esse processo resulta, em grande parte, do uso inadequado do solo, promovendo fenômenos negativos como erosão, desertificação, desmatamento, salinização e práticas insustentáveis de manejo (Badapalli *et al.* 2026).

No contexto brasileiro, a região Nordeste apresenta elevada vulnerabilidade à degradação dos solos, em função de suas características hidroclimáticas. Esta irregularidade das precipitações, associada à ocorrência de chuvas intensas e concentradas em curtos períodos, favorece o desencadeamento de processos erosivos e intensifica a fragilidade ambiental, comprometendo o uso dos recursos naturais, especialmente para abastecimento humano e atividades agrícolas (Ferreira *et al.* 2020; Santos, Silva e Montenegro, 2010).

Diante desse cenário, a compreensão dos processos hidrológicos e geomorfológicos em bacias hidrográficas é essencial para subsidiar estratégias de manejo e conservação. Nesse sentido, ferramentas de modelagem hidrológica, como o Soil and Water Assessment Tool (SWAT+), têm sido amplamente utilizadas para simular os impactos das mudanças no uso e cobertura do solo sobre a produção de água, sedimentos e nutrientes, permitindo avaliar diferentes cenários ambientais (Arnold e Allen, 1996; Gassman *et al.* 2007; Neitsch *et al.* 2011). De acordo com Chagas *et al.* (2022), o uso desta ferramenta possibilita uma análise detalhada da dinâmica hidrológica, contribuindo significativamente para a compreensão dos processos ambientais em regiões semiáridas.

Complementarmente, a análise morfométrica de bacias hidrográficas constitui um importante instrumento para a caracterização física do terreno, fornecendo parâmetros quantitativos relacionados à geometria, rede de drenagem e dinâmica fluvial. Esses indicadores são fundamentais para compreender o comportamento hidrológico das bacias e sua suscetibilidade à degradação ambiental (Shekar *et al.* 2024). O avanço das geotecnologias, especialmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto (SR), tem ampliado a precisão dessas análises, possibilitando a integração de diferentes variáveis espaciais e contribuindo para o planejamento e a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo realizar a caracterização morfométrica de uma sub-bacia hidrográfica localizada no semiárido brasileiro, utilizando técnicas de

geoprocessamento e modelagem hidrológica por meio do modelo SWAT+, visando compreender a dinâmica hidrológica e a suscetibilidade à degradação ambiental. Essa abordagem combinada permite não apenas mensurar a geometria do relevo em ambiente SIG, mas também subsidiar informações para simular, futuramente, de forma integrada, como esses parâmetros morfométricos influenciam a dinâmica hidrológica e a suscetibilidade à degradação ambiental.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Área de estudo*

A área de estudo é compreendida por uma sub-bacia hidrográfica com extensão territorial de 293,85 km², localizada na região do Médio Jaguaribe, entre os municípios de Jaguaribe, Pereiro e Icó, no semiárido brasileiro, no estado do Ceará (Figura 1). A região é caracterizada por um regime hidroclimático marcado por severa vulnerabilidade, com precipitações médias anuais em torno de 230 mm concentradas em poucos meses (janeiro a maio). Os solos da região são tipicamente rasos, como Luvissolos e Neossolos, que correspondem a 68% da bacia. Esses fatores condicionam a intermitência da rede de drenagem e a sensibilidade a chuvas intensas.

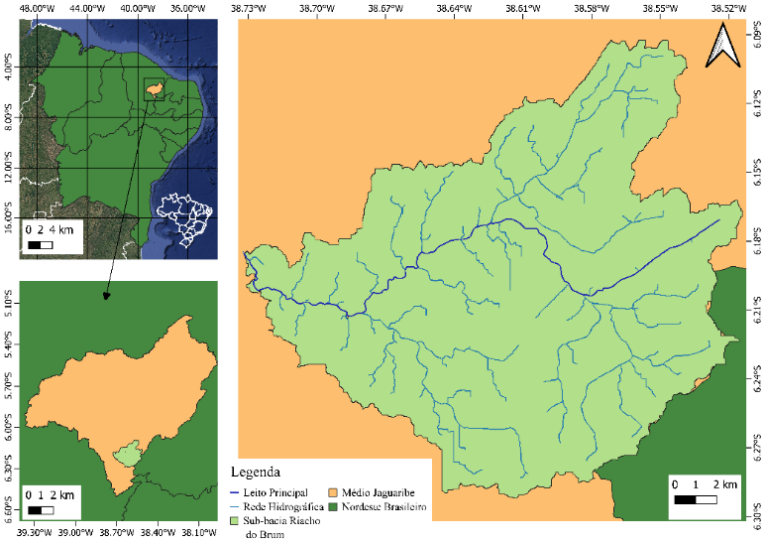



Figura 1 – Mapa de localização da área de estudos, no estado do Ceará.

### *Delimitação automática e discretização da bacia via QGIS e SWAT+*

A extração das variáveis fisiográficas e o mapeamento estrutural da bacia foram realizados por meio de um ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), por meio do software QGIS (versão 3.36) com a interface do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+). O processo de delimitação automática do exutório principal e da quebra das sub-bacias foi realizado por meio do fluxo computacional baseado nas propriedades numéricas de escoamento superficial por

meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil TOPODATA/INPE com precisão espacial de 30 metros.

Os limites críticos de contribuição de área (*threshold*) foram estabelecidos para uma área de 1,01 km² e, para os canais o limite foi de 0,099 km². Esse limiar define a extensão mínima necessária para desencadear o início de um canal de escoamento permanente ou temporário. O baixo valor de 0,099 km² é justificado pelas características fisiográficas de ambientes semiáridos, onde a predominância de solos rasos favorece o escoamento superficial imediato, gerando uma rede de drenagem ramificada e densa com canais efêmeros. Por outro lado, o limiar de fluxo em 1,01 km² para a subdivisão das sub-bacias permitiu uma divisão espacial equilibrada, evitando fragmentação excessiva do relevo.

***Parâmetros morfométricos***

Os parâmetros morfométricos foram categorizados em três grupos principais: geometria da bacia, características da rede de drenagem e dinâmica do canal principal. Esses parâmetros foram fundamentados nas formulações clássicas de Horton (1945), Miller (1953) e Christofoletti (1969, 1980).

***Índice geométricos e de forma***

A área – A (km²) e o perímetro – P (km) da bacia foram obtidos por meio de cálculos no software em ambiente SIG.

- *Fator de forma ($K_f$):* Relaciona a área da bacia com o quadrado do seu comprimento axial de maneira que <0,50 = Alongada; 0,5 a 0,75 = Moderada; >0,75 = Arredondada, sendo expresso pela equação 1 (Horton (1945)):

$$K_f = \frac{A}{(L_g)^2} \quad (1)$$

Em que A é a área total da bacia (km²) e $L_g$ representa a distância em linha reta entre a cabeceira mais distante e o exutório (km).

- *Índice de Circularidade ($I_c$):* Índice adimensional que funciona como um indicador do formato da bacia onde <0,51 = Alongada; 0,51 a 0,75 = Moderada; >0,75 = Arredondada, sendo calculado por meio da equação 2 (Miller (1953)):

$$I_c = \frac{12{,}57 \cdot A}{P^2} \quad (2)$$

Em que A é a área total da bacia (km²) e P corresponde ao perímetro total da bacia (km).

• *Coeficiente de Compacidade ($K_c$):* Índice adimensional que funciona como um indicador do formato da bacia onde 1,00 a 1,25 = Alta tendência a enchentes; 1,25 a 1,50 = Tendência média; >1,50: Baixa tendência a enchentes, sendo calculado por meio da equação 3 (Christofoletti (1969, 1980)):

$$K_c = 0{,}28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Em que A é a área total da bacia (km²) e P corresponde ao perímetro total da bacia (km).

***Parâmetros da rede de drenagem***

• *Densidade de Drenagem ($D_d$):* Funciona como um excelente indicador do nível de fragmentação do relevo por canais fluviais. Esse parâmetro estabelece a eficiência da bacia em escoar o excedente hídrico, sendo <0,50 km/km² = Drenagem Baixa; 0,50 a 2,00 km/km² = Drenagem Média; 2,00 a 3,50 km/km² = Alta; >3,50 km/km² = Muito Alta, sendo calculado por meio da equação 4 (Villela e Matos (1975)):

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (4)$$

Em que, $L_t$ é o comprimento total de todos os canais somados (km) e A corresponde a área total da bacia (km²).

• *Densidade Hidrográfica ($D_h$):* Atua como um indicador quantitativo da capacidade de geração de novos cursos d'água na bacia, expressando o grau de ramificação e a capacidade de resposta do sistema frente aos eventos de precipitação, sendo calculada por meio da equação 5 (Horton (1945)):

$$D_h = \frac{N}{A} \quad (5)$$

Em que N é o número total de segmentos de canais na bacia e A corresponde à área total da bacia (km²).

• *Ordenação de Canais:* É um indicador de estrutura da bacia hidrográfica, sendo seguida pelo critério de Strahler (1952), apontando o grau de ramificação do sistema fluvial da bacia, em que os canais de nascentes são considerados de primeira ordem (u = 1) e a junção de dois canais da mesma ordem resulta em um canal de ordem u+1.

***Parâmetros do leito principal***

• *Índice de Sinuosidade do Canal ($I_s$):* É um indicador do comportamento do leito em ajuste às formações geológicas do terreno onde ≈1,0 = Canal Retilíneo; 1,0 a 1,5 = Canal Sinuoso; >1,5 = Canal Meândrico, sendo calculado por meio da equação 6 (Christofoletti (1969, 1980)):

$$I_s = \frac{L_{rio}}{L_g} \quad (6)$$

Em que $L_{rio}$ é o comprimento real sinuoso do rio principal e $L_g$ corresponde à distância vetorial em linha reta.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo hidrológico SWAT+ por meio do modelo digital de elevação apresentou uma variação hipsométrica da bacia de 134 a 806 m de altitude, representando um elevado gradiente altimétrico de 672 m entre montante e jusante. O modelo também subdividiu a área em 140 sub-bacias menores com área maior que 1,01 km² (Figura 2).

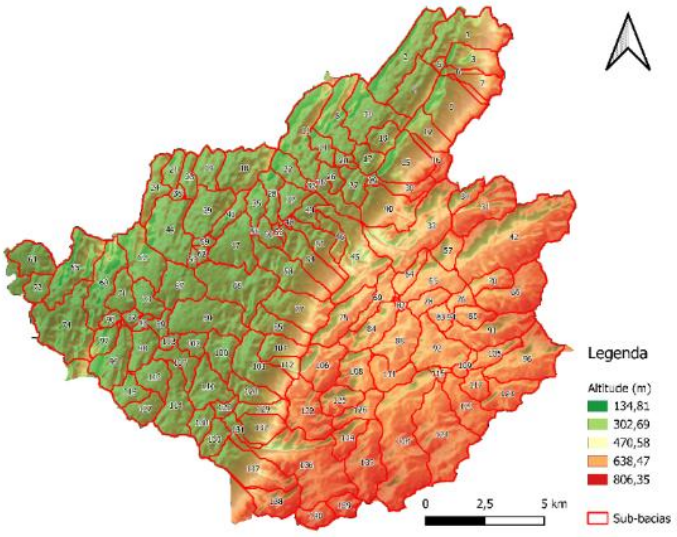



Figura 2 – Processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) pelo SWAT e divisão de sub-bacias.

Os valores morfométricos obtidos (Tabela 1) indicam uma rede de drenagem com base no critério hierárquico proposto por Strahler (1952), classificando o canal principal como um curso d'água de 5ª ordem e contando com um comprimento total da rede de drenagem de 486,14 km, sendo o seu leito principal com tamanho de 35,34 km.

Os índices Kf = 0,401; Ic = 0,342; Kc = 1,69; Dd = 1,65 km/km²; u = 5; Is = 1,31 indicam uma bacia alongada, de drenagem baixa a média e canal principal moderadamente sinuoso, respeitando as condições geológicas da bacia, valores encontrados em outros estudos em ambiente semiárido (Chagas *et al.* 2022). Fator de forma baixo e índice/circularidade reduzidos caracterizam bacias alongadas, com picos de cheia menores e mais distribuídos no tempo, em contraste com bacias mais circulares, que concentram escoamento e elevam o risco de cheias rápidas (Singh e Singh 2022; Dimple *et al.* 2022). Embora a caracterização morfométrica indique uma bacia hidrográfica alongada e com baixa tendência a enchentes e suscetibilidade a inundações, as condições de solo e uso da terra

podem reverter essa vantagem morfométrica, tornando a bacia vulnerável à degradação ambiental (Nonglait, 2025; Silva *et al.* 2022).

Tabela 1 – Parâmetros morfométricos e classificação dos valores na sub-bacia hidrográfica do Riacho do Brum

| Parâmetro Analisado | Valor Calculado | Unidade |
|---|---|---|
| Parâmetros Geométricos e de Forma | | |
| Área de Drenagem (A) | 293,85 | km² |
| Perímetro de Borda (P) | 103,96 | km |
| Fator de Forma de Horton (Kf) | 0,401 | Adimensional |
| Índice de Circularidade (Ic) | 0,342 | Adimensional |
| Coeficiente de Compacidade (Kc) | 1,69 | Adimensional |
| Parâmetros da Rede de Drenagem | | |
| Densidade de Drenagem (Dd) | 1,65 | km/km² |
| Densidade Hidrográfica (Dh) | 5,32 | canais/km² |
| Parâmetros do Leito Principal | | |
| Ordem de Drenagem (u) | 5 | - |
| Índice de Sinuosidade (Is) | 1,31 | Adimensional |

Valores de Densidade de Drenagem (Dd) entre 0,5 e 2 km/km² estão associados a uma drenagem moderada, em que os processos de infiltração no solo exercem um papel significativo no balanço hídrico, proporcionando recarga de aquíferos, diferentemente dos resultados obtidos por Roy e Chowdhury (2024), que indicam a importância dos processos de infiltração quando existem desafios em bacias com baixas densidades de drenagem.

A bacia apresenta uma classificação de 5ª ordem, possuindo 1564 canais mapeados pelo modelo SWAT destes, 778 são de 1ª ordem, representando 49,74% dos canais da bacia. De acordo com trabalhos executados por Sonawane et al. (2025), temos a indicação de planalto montanhoso, padrão de drenagem dendrítica e maior armazenamento hidrológico durante inundações dentro da bacia. Áreas de desmatamento e encostas íngremes podem ampliar o risco de erosão. Na avaliação do uso e ocupação num intervalo de 30 anos, observa-se, por meio de dados do MapBiomas, uma recuperação importante nas áreas de nascente (Figura 3), onde se concentram os trechos de 1ª ordem da bacia estudada.

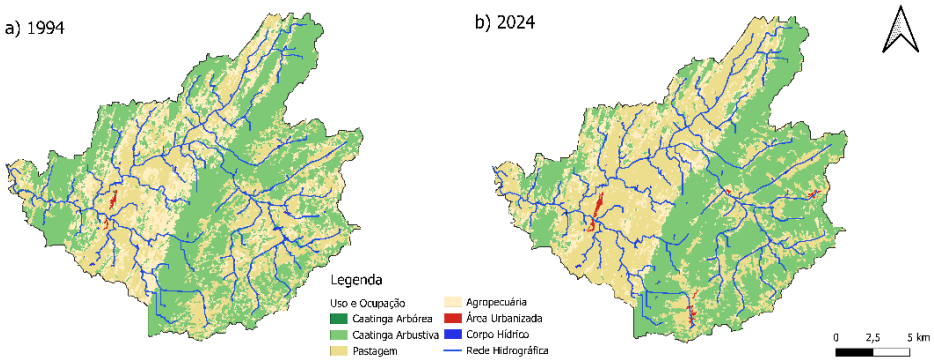



Figura 3 – Variação do uso e ocupação do solo em um período de 30 anos. a) uso e ocupação avaliados no ano de 1994; b) uso e ocupação avaliados no ano de 2024

## CONCLUSÃO

Este trabalho mostra que a caracterização morfométrica da sub-bacia hidrográfica do Riacho do Brum, realizada com o auxílio de técnicas de geoprocessamento e do modelo hidrológico SWAT+, permitiu compreender de forma integrada sua configuração física e seu comportamento hidrológico. Os resultados evidenciaram uma bacia de formato alongado, com baixa tendência à ocorrência de enchentes rápidas, drenagem moderada, canal principal de 5ª ordem e sinuosidade compatível com as características geológicas locais, indicando uma resposta hidrológica mais distribuída no tempo e favorável aos processos de infiltração. Contudo, apesar das condições morfométricas sugerirem relativa estabilidade hidrológica, a combinação entre solos rasos, elevada variabilidade pluviométrica e possíveis alterações no uso e cobertura da terra pode aumentar a suscetibilidade aos processos erosivos e à degradação ambiental.

Dessa forma, a integração entre análise morfométrica e modelagem hidrológica com o uso do SWAT+ mostrou-se uma abordagem eficiente para o diagnóstico ambiental da bacia, fornecendo informações relevantes para o planejamento territorial, a conservação dos recursos hídricos e o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável em regiões semiáridas.

**AGRADECIMENTOS -** Agradecemos à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização dos dados.

## REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. (1996). *"Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds"*. Journal of Hydrology, 176, pp. 55–57.

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, 34(1), pp. 73–89.

BADAPALLI, P. K.; NAKKALA, A. B.; KOTTALA, R. B.; *et al.* (2026). *"Aeolian sand migration induced land degradation and desertification hotspots identification in the semi-arid rain shadow regions of Anantapur, India"*. Scientific Reports, 16, 1875.

BRESSIANI, D. 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, 8(3), pp. 9–35.

CHAGAS, A. M. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; LINS, F. A. C.; FARIAS, C. W. L. A. (2022). *"Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT"*. Agrometeoros, 30.

CHAGAS, A. M. S.; *et al.* (2022). *"Use of geotechnologies for morphometric analysis of experimental basin in the semiarid region to support hydrological simulation"*. Revista Engenharia na Agricultura – REVENG, 30, pp. 19–35.

CHRISTOFOLETTI, A. (1969). *"Análise morfométrica das bacias hidrográficas"*. Notícia Geomorfológica, 9(18), pp. 35–64.

CHRISTOFOLETTI, A. (1980). *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo – SP, Blucher.

DIMPLE; *et al.* (2022). *"Determining the Hydrological Behaviour of Catchment Based on Quantitative Morphometric Analysis in the Hard Rock Area of Nand Samand Catchment, Rajasthan, India"*. Hydrology, 9(2), 31.

FERREIRA, P. S.; SOUZA, W. M. (2020*). "Modelagem hidroclimática e demográfica para estimativa da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Brígida"*. Revista Brasileira de Climatologia, 27.

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"*. Transactions of the ASABE, 50(4), pp. 1211–1250.

HORTON, R. (1945). *"Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology"*. Geological Society of America Bulletin, 56, pp. 275–370.

MILLER, V. C. (1953). *A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Mountainous Areas of Virginia and Tennessee*. Technical Report 3. New York, Columbia University, Department of Geology.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2009*. Texas, Agricultural Research Service Blackland Research Center; Texas AgriLife Research; Texas A&M University System.

NONGLAIT, J. L. (2025). *"Morphometric Analysis of Umtung River Basin using GIS and Remote Sensing"*. Current World Environment, 20(1), pp. 488–500.

ROY, S. K.; CHOWDHURY, M. A. (2024). *"Morphometric Analysis and Watershed Delineation of the Karnaphuli River Basin: A Comparative Study Using Different DEMs in Chittagong, Bangladesh"*. River, 3(4), pp. 426–437.

SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; MONTENEGRO, A. A. A. (2010). *"Temporal Variability of Soil Water Content under Different Surface Conditions in the Semiarid Region of Pernambuco State"*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34(5), pp. 1733–1741.

SHEKAR, P. R.; MATHEW, A. (2024). *"Morphometric Analysis of Watersheds: A Comprehensive Review of Data Sources, Quality, and Geospatial Techniques"*. Watershed Ecology and the Environment, 6, pp. 13–25.

SILVA, J. R. I.; *et al.* (2022). *"Morphometric Characterization and Land Use of the Pajeú River Basin in the Brazilian Semi-Arid Region"*. Journal of South American Earth Sciences, 118, 103939.

SINGH, V. G.; SINGH, S. K. (2024). *"Analysis of Geo-Morphometric and Topo-Hydrological Indices Using COP-DEM: A Case Study of Betwa River Basin, Central India"*. Geology, Ecology, and Landscapes, 8(2), pp. 101–128.

SONAWANE, U. R.; *et al.* (2025). *"Analysis of Geo-Morphometric Indices of Kal River Basin Using Quantum GIS"*. Journal of Agriculture and Ecology Research International, 26(4), pp. 222–234.

SOUSA, W. S.; VIANA, J. F. S.; SILVA, R. R.; IRMÃO, R. A. (2018). *"Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o modelo SWAT"*. Journal of Environmental Analysis and Progress, 3(1), pp. 146–154.

STRAHLER, A. N. (1952). *"Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography"*. Geological Society of America Bulletin, 63(11), pp. 1117–1142.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. (1975). *Hidrologia Aplicada.* São Paulo – SP, McGraw-Hill do Brasil.