



Análise das Características Morfométricas na Dinâmica Sedimentar da Bacia Hidrográfica do Rio Incomáti Durante Eventos Extremos de Cheias e Inundações

Morphometric Analysis of Sediment Dynamics in the Incomati River Basin under Extreme Flood and Inundation Events

Article Record

Dr. Zulfa da Maica Venancio^{§§*}

Estudante de Engenharia Hidráulica, Agrícola e Água Rural
*Corresponding Author



Luís Joaquim Maloa^{§§}

Doutorado em Geologia, Docente
ORCID 0000-0001-5519-746X



Lateiro Salvador de Sousa^{§§}

Doutorado em Engenharia Agrícola, Docente
ORCID 0000-0001-9375-3826



§ Divisão de Agricultura, Instituto Superior Politécnico de Gaza, Chokwé, Mozambique (OA)

RECEIVED

2026-04-28

ACCEPTED

2026-05-08

ONLINE PUBLISHED

2026-07-03

PUBLISHED

2026-07-28

PEER REVIEW

Double Blind

Abstract

A watershed is considered a natural catchment area for precipitation, whose waters flow through a drainage network to an outlet. In this context, the analysis of morphometric parameters allows the characterization of its geometry, drainage network, and relief, contributing to the understanding of hydrological behavior, erosive processes, and vulnerability to floods. This analysis contributes to hydrological planning and flood management, especially in developing countries, such as Mozambique, where in some cases there is a scarcity of hydrometeorological data. Watersheds are delineated using the Digital Elevation Model (DEM) from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), and geometric, hydrographic, and relief parameters are extracted using geographic information systems (GIS) tools, QGIS and ArcGIS. The morphometry of the watershed directly influences the production, retention, and transport of sediments, which in turn reduce the flow capacity and alter the hydrological behavior of the watershed, contributing to the occurrence of regular floods. Studies on soil and water loss due to erosion utilize hydrosedimentological models, such as SWAT (Soil and Water Assessment Tool), a tool that integrates spatial and temporal data, allowing simultaneous simulation of runoff, soil erosion, and sediment transport on a large scale. Sediment production and transport in watersheds and average annual soil erosion are determined using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), respectively. Given the importance of conducting hydrological and geomorphological studies, and observing the scarcity of research portraying sedimentology and morphometry in Mozambique and the Incomáti River, this article reviews the literature on morphometry and sediment transport in watersheds, analyzing their impacts during floods.

Floods

Incomáti

Morphometry

sediment transport

Soil Erosion

Watersheds

AI USE STATEMENT

No generative AI was used for analysis or results.

FUNDING

No external funding was declared for this work.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

DATA AVAILABILITY

Not applicable for this article.

ETHICS

No ethics committee approval was required for this article type.

CONSENT

Not applicable for this article.

TRIAL REG.

Not applicable.

Crossref DOI: 10.34257/GJHSSB256775

How to Cite: Venancio et al. (2026). Análise das Características Morfométricas na Dinâmica Sedimentar da Bacia Hidrográfica do Rio Incomáti Durante Eventos Extremos de Cheias e Inundações. Global Journal of Human-Social Science, 26(1), 45-52. DOI: 10.34257/GJHSSB256775

LICENSE

© 2026 Global Journals. Open-access article under CC BY-NC-ND 4.0 International License.

AR Experience Web Page

DOI



Print ISSN 0975-587X



Online ISSN 2249-460X



Under the strict compliance and defined process of



METADATA CONTINUATION

AUTHOR CONTACT QR LEDGER

Dr. Zulfa da Maica Venancio§0*		Luís Joaquim Maloa§ξ		Lateiro Salvador de Sousa§0	
-----------------------------------	---	----------------------	---	-----------------------------	---

ARCHIVAL RECORD

Análise das Características Morfométricas na Dinâmica Sedimentar da Bacia Hidrográfica do Rio Incomáti Durante Eventos Extremos de Cheias e Inundações

Dr. Zulfa da Maica Venancio^{§*}, Luís Joaquim Maloa^{§ξ} , and Lateiro Salvador de Sousa^{§θ} 

Affiliations

§ Divisão de Agricultura, Instituto Superior Politécnico de Gaza, Chokwé, Mozambique (OA)

Qualifications / Designations

θ Estudante de Engenharia Hidráulica, Agrícola e Água Rural

ξ Doutorado em Geologia, Docente

θ Doutorado em Engenharia Agrícola, Docente

Abstract

Considera-se bacia hidrográfica uma área de captação natural de precipitação, cujas águas escoam através de uma rede drenagem até a um exutório. Neste contexto, a análise dos parâmetros morfométricos permite caracterizar a sua geometria, rede de drenagem e relevo, contribuindo para a compreensão do comportamento hidrológico, dos processos erosivos e da vulnerabilidade à ocorrência de cheias e inundações. Esta análise contribui para o planeamento hidrológico e gestão de cheias principalmente em países em vias de desenvolvimento, como é o caso de Moçambique onde em alguns casos há escassez de dados hidrometeorológicos. As bacias hidrográficas são delimitadas utilizando o Modelo Digital De Elevação (MDE), da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM), e os parâmetros geométricos, hidrográficos e de relevo são extraídos por meio de ferramentas de informação geográfica (SIG), o QGIS e o ArcGIS. A morfometria da bacia hidrográfica influencia directamente na produção, retenção e transporte de sedimentos, os quais por sua vez, reduzem a capacidade de escoamento e alteram o comportamento hidrológico da bacia, contribuindo para a ocorrência de cheias e inundações regulares. Estudos sobre perdas do solo e da água por erosão utilizam modelos hidrossedimentológicos, como o SWAT (Soil and Water Assessment Tool), uma ferramenta que integra dados espaciais e temporais, permitindo simular simultaneamente o escoamento, a erosão do solo e o transporte de sedimentos em grande escala. A produção e o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas e a erosão média anual do solo são determinados por meio da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) e da Equação Revista da Perda de Solo (EURPS), respectivamente. Diante da importância de realizar estudos hidrológicos e geomorfológicos, e observando escassas pesquisas que retratam a sedimentologia e morfometria em Moçambique e no rio Incomáti, este artigo revisa a literatura sobre a morfometria e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, analisando os seus impactos durante as cheias e inundações.

Keywords: *Floods, Incomáti, Morphometry, Sediment Transport, Soil Erosion, Watersheds*

* Corresponding Author

Dr. Zulfa da Maica Venancio

DOI

10.34257/GJHSSB256775

1. Introdução

Conforme definido por (Domingues et al., 2023), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural de precipitação que escoar por caminhos de drenagem para um caminho principal de água, até ao ponto de saída da bacia, que geralmente drena no oceano ou lago maior. As características físicas, hidrológicas e de relevo desempenham um papel importante na dinâmica dos rios, pois condicionam o regime de escoamento, produção, retenção e transporte de sedimentos e na resposta da bacia face a eventos de precipitação.

Neste contexto, (Rodrigues et al., 2020) considera que a caracterização morfométrica consiste na estimativa de parâmetros físicos que influenciam no seu regime hidrológico tais como o factor de forma, coeficiente de compactidade, índice de circularidade, densidade de drenagem. Entretanto, para (Raiol et al., 2022) a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas consiste na estimativa de parâmetros físicos, hidrológicos e de relevo que influenciam no

seu regime hidrológico. Deste modo, a análise morfométrica de bacias hidrográficas constitui um requisito básico para o desenvolvimento de estudos hidrológicos, tais como a avaliação do sistema de drenagem, risco de inundações, perda do solo e transporte de sedimentos (Melo et al., 2020).

A integração de Sistemas de Informação Geográfica com informações provenientes de dados cartográficos, hidrológicos e imagens de satélite permite a delimitação de bacias hidrográficas. Esta delimitação utiliza informações de uma estrutura numérica de dados chamada Modelo Digital de Elevação (MDE), alguns dos quais são da missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) que apresentam modelos altamente precisos com cobertura global e NIMA (National Imaging and Mapping Agency) para obter o modelo digital tridimensional da superfície terrestre, embora (Melo et al., 2020) tenha relatado eficácia na caracterização morfométrica de bacias hidrográficas com o uso do Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM) e do MDE ALOS.

Quanto ao emprego de geotecnologias para a delimitação de bacias hidrográficas e a extração de parâmetros morfométricos, percebe-se, na literatura, a busca pela utilização de programas livres, como o Quantum GIS (QGIS), o qual permite a automação dos processos de extração das características do meio físico com elevada eficiência, proporcionando economia de tempo (Souza et al., 2021).

O transporte de sedimentos constitui um dos principais processos responsáveis pelas alterações geomorfológicas das bacias hidrográficas e pela redução da capacidade de armazenamento e escoamento dos rios, podendo provocar assoreamento, instabilidade nas margens, aumento do risco de inundações, e carreamento de poluentes e patógenos. Para (Paz et al., 2022), a produção de sedimentos dá-se por diferentes factores como a intensidade da chuva, tipo de solo, uso e cobertura do solo, topografia, entre outros. Esta produção refere-se ao processo de erosão, transporte, deposição e ressuspensão dos sedimentos, oportunamente exportados da bacia durante um certo período temporal. Em contrapartida, (Baldotto et al., 2021), considera que o processo erosivo seja constituído por três fases: desagregação, transporte e deposição, etapas essenciais para entender a dinâmica sedimentológica nas bacias hidrográficas.

Para a estimativa de perda de solos em bacias hidrográficas, utiliza-se variações do modelo empírico da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), como a Equação de Perda de Solo Universal Modificada (EUPSM) e a Equação de Perda de Solo Universal Revista (EURPS). Contudo, para classificar a perda de solos em bacias hidrográficas recorre-se ao modelo SWAT, pois simula em simultâneo a erosão, o transporte de sedimentos e o escoamento ao longo do tempo, considerando vários factores físicos e climáticos da bacia (Kelnier et al., 2026).

No entanto, a obtenção de dados *in situ* para estimar perdas de solo em grandes áreas torna o trabalho demorado e com altos custos. Frente a isso, o uso de geotecnologias e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) viabiliza não só a colecta, tratamento, análise e produção de informações inerentes à erosividade, mas também permite o estudo da dinâmica espaço-temporal dos factores que afectam a geração e o transporte de sedimentos (Baldotto et al., 2021).

Neste sentido, o presente artigo tem como objectivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre a relação entre as características morfométricas das bacias hidrográficas e os processos de produção, transporte e retenção de sedimentos, destacando a sua influência na ocorrência de cheias e inundações.

2. Metodologia

2.1. Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Incomáti está localizada na região leste da África Austral. É uma bacia transfronteiriça que se estende por territórios da África do Sul, de Moçambique e do Reino Eswatini. A área total da bacia é de aproximadamente 46.748 km², dos quais 2.561 km² (5,5%), 15.506 km² (33,2%) e 28.681 km² (61,3%) estão localizados na Suazilândia, Moçambique e África do Sul, respectivamente. Possui uma área de drenagem de 46.800 km² e as suas nascentes situam-se na área do planalto ocidental do Transvaal, na província de Mpumalanga, a cerca de 2000 m acima do nível médio das águas do mar (Saraiva Okello, 2019).

A bacia do Incomáti inclui os rios Komati, Crocodile, Sabié, Massintoto, Uanetze e Mazimechopes. Os rios Komati, Crocodile e Sabié são as principais sub-bacias, contribuindo com cerca de 94% da descarga natural, com uma área correspondente a 61% da bacia.

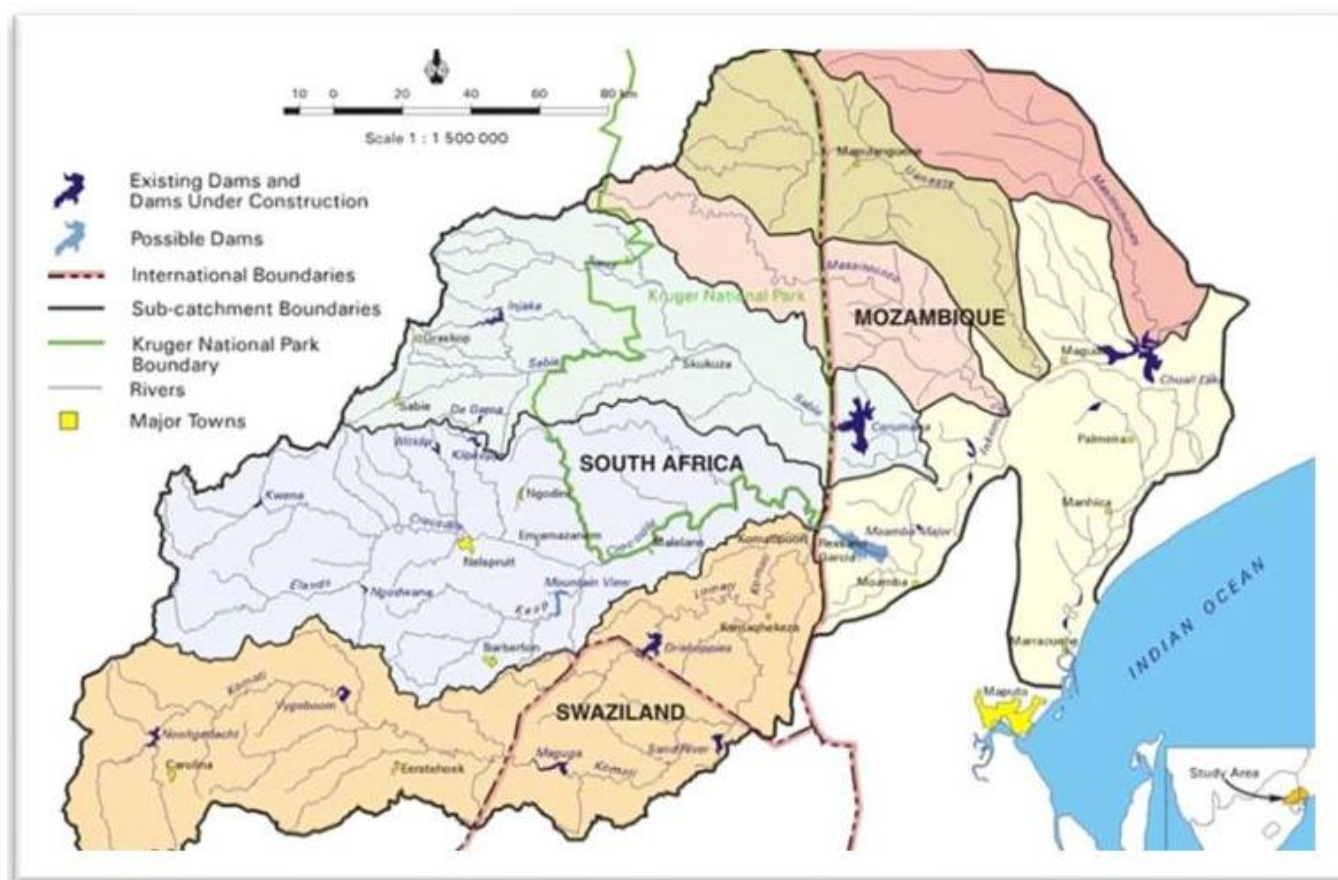


Figure 1. Mapa de localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Incomáti.

Fonte: Saraiva Okello (2019)

Table 1. Sub-bacias hidrográficas do rio Incomáti, respectivas áreas e vazão natural.

Sub-bacia hidrográfica	Área de captação (10^6 m^2)	Descarga natural ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)	mm a^{-1}
Komati	11200	1420	127
Crocodile	10470	1226	117
Sabié	7050	750	106
Massintoto	3430	22	6
Uanetze	3930	14	4
Mazimchope	3970	21	5
Renda	6698	134	20
Bacia total do rio Incomáti	46748	3587	77

Fonte: Adaptado de Saraiva Okello (2019)

3. Caracterização físico-natural da área de estudo

A bacia hidrográfica do Incomáti situa-se na região subtropical, como um todo, apresenta uma precipitação média anual de 740mm que aumenta de leste para oeste e uma evaporação potencial média anual para a bacia como um todo é de cerca de 1900 mm/ano, que geralmente diminui de leste para oeste. Entretanto, na região oeste de alta altitude, a precipitação média anual que varia de 800–1000 mm. A maior precipitação ocorre na bacia superior do rio Sabié, cerca de 1200mm/ano.

As temperaturas variam entre verões quentes e húmidos e os invernos amenos, com uma média anual de 17°C, enquanto o mês mais quente (Janeiro) tem uma média de 21°C e o mais frio (Junho), tem uma média de 11.5 °C. A topografia da bacia compreende as planícies costeiras planas a leste. O rio Incomáti nasce no planalto

do Transvaal, a cerca de 2000m de altitude, na parte oeste da bacia, e desagua nas planícies costeiras perto de Maputo, em Moçambique.

Os solos da bacia são altamente variáveis. Na parte da bacia do Komati (na África do Sul) ocorrem solos franco-argilosos, enquanto que na grande parte sul-africana do rio Incomáti ocorrem solos franco-argilosos pouco profundos, com relevo acentuado. As partes orientais da bacia são constituídas principalmente por solos argilosos de profundidade moderada, com relevo ondulado.

Em relação à cobertura do solo, a bacia é caracterizada por uma grande variedade de vegetação natural que variam entre praias, dunas recentes, arbustos e florestas tropicais, como também a presença de diferentes tipos de savana e pastagens.

4. Delimitação de bacias hidrográficas

No âmbito de um estudo morfométrico desenvolvido por (Raiol et al., 2022), a delimitação de bacias hidrográficas foi feita através da aquisição de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de resolução 30x30m, no qual foram utilizados os Sistemas de Informação Geográfica, o QGIS e o ArcGIS, para a delimitação

de bacias hidrográficas utilizando o UTM (Sistema de Projecção Transversa de Mercator), com o auxílio de imagens do Google Earth para a identificação de rios, de modo a gerar mapas hipsométricos, declividade, orientação do terreno e ordem dos rios.

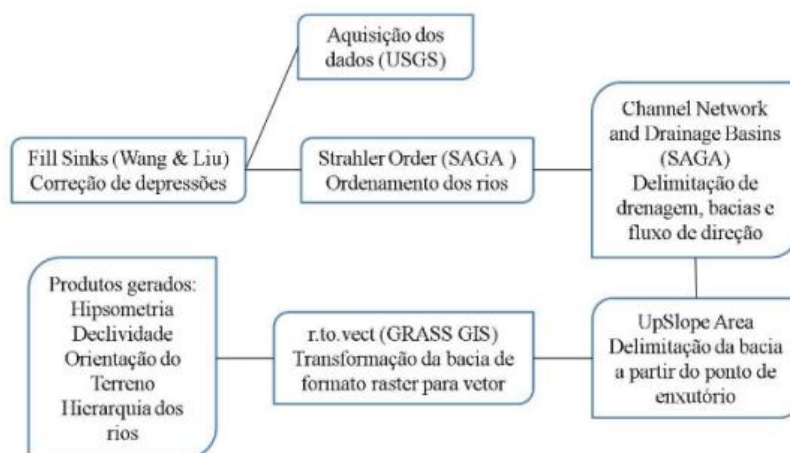


Figure 2. Fluxograma esquemático dos procedimentos adoptados.

Fonte: Raiol et al. (2022)

A classificação da ordem dos rios foi realizada segundo o método de Strahler, enquanto a declividade e o mapa de orientação do terreno foram elaborados conforme os procedimentos propostos por Lombardi Neto e Jonathan Reades, respectivamente.

Após a delimitação de bacia hidrográfica e a elaboração de mapas, foram calculados os parâmetros morfométricos relacionados à geometria, rede de drenagem e relevo da bacia. O perfil longitudinal foi obtido com base em pontos distribuídos ao longo do rio principal, permitindo estimar a declividade média e a declividade relativa. O tempo de concentração também foi determinado, este parâmetro é essencial para compreender o escoamento na bacia e apoiar na previsão de cheias e projectos de drenagem.

De acordo com (Domingues et al., 2023) as características morfométricas de bacias hidrográficas se dividem em três grupos: ge-

ométricos, rede de drenagem e relevo. Estes servem para avaliar a forma e o potencial hidrológico da bacia; compreender a organização da rede hidrográfica e o comportamento do escoamento; e, os que influenciam diretamente os processos de erosão, transporte de sedimentos e resposta hidrológica da bacia, respectivamente.

No entanto, (Melo et al., 2020) analisou as características morfométricas do rio Real, no Brasil, na qual a delimitação foi realizada por meio de processamento de dados SRTM cuja resolução é 90x90 m onde um pixel corresponde a 8100 m² no GrassGIS7.6.1. Foram utilizadas cartas topográficas no formato raster, georreferenciadas pelo sistema Datum WGS 84, que depois foi alterado para o sistema de coordenadas plano, pois o GrassGIS trabalha apenas com coordenadas UTM.

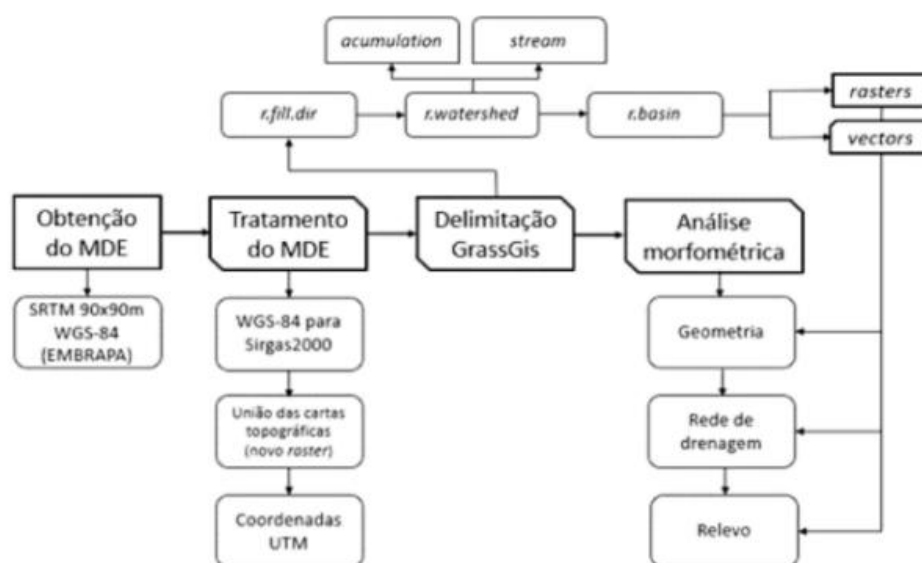


Figure 3. Fluxograma dos procedimentos para a análise morfométrica de bacias hidrográficas.

Fonte: Melo et al. (2020)

Table 2. Parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas.

Parâmetro	Equação	Definição
Geométricos		
Área da bacia (A)	A	A = Área da bacia (km^2)
Perímetro da bacia (P)	P	P = Perímetro da bacia (km)
Comprimento axial da bacia (L_a)	L_a	L_a = Comprimento axial da bacia (km)
Coeficiente de compacidade (K_c)	$K_c = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$	K_c = Coeficiente de compacidade
Factor de forma (K_f)	$K_f = \frac{A}{L_a^2}$	K_f = Factor de forma
Índice de circularidade (I_c)	$I_c = 12.57 \times \frac{A}{P^2}$	I_c = Índice de circularidade
Rede de Drenagem		
Ordem dos cursos d'água	—	—
Comprimento do curso d'água principal (L)	L	L = Comprimento do curso d'água principal (km)
Comprimento total dos cursos d'água (L_t)	L_t	L_t = Comprimento total dos cursos d'água (km)
Sinuosidade do curso d'água principal (SIN)	$SIN = \frac{L}{L_a}$	SIN = Sinuosidade do curso d'água principal
Densidade de drenagem (D_d)	$D_d = \frac{L_t}{A}$	D_d = Densidade de drenagem (km/km^2)
Densidade de rios (D_r)	$D_r = \frac{n}{A}$	D_r = Densidade de rios
Coeficiente de manutenção (C_m)	$C_m = \frac{1}{D_d}$	C_m = Coeficiente de manutenção
Extensão do percurso superficial (E_{ps})	$E_{ps} = \frac{1}{2 \times D_d}$	E_{ps} = Extensão do percurso superficial
Relevo		
Altitude mínima ($H_{\min}$)	$H_{\min}$	$H_{\min}$ = Altitude mínima (m)
Altitude máxima ($H_{\max}$)	$H_{\max}$	$H_{\max}$ = Altitude máxima (m)
Amplitude altimétrica (H_m)	$H_m = H_{\max} - H_{\min}$	H_m = Amplitude altimétrica (m)
Declividade mínima ($D_{\min}$)	$D_{\min}$	$D_{\min}$ = Declividade mínima (%)
Declividade máxima ($D_{\max}$)	$D_{\max}$	$D_{\max}$ = Declividade máxima (%)
Declividade média (D_m)	$D_m = \frac{\sum x}{n}$	D_m = Declividade média (%)
Índice de rugosidade (I_r)	$I_r = H_m \times D_d$	I_r = Índice de rugosidade
Relação de relevo (R_r)	$R_r = \frac{H_m}{L_a}$	R_r = Relação de relevo

Fonte: Adaptado de Raiol et al (2022).

5. Análise morfométrica

Durante este processo, as bacias são subdivididas por subdivisores internos, de modo a tornar mais compreensível o detalhamento da bacia e a identificação de focos de degradação dos recursos naturais. As principais características físicas das subbacias e da bacia principal extraídas pelos atributos associados aos vectores são: área, perímetro, comprimento axial da bacia, comprimento do rio principal, comprimento do talvegue e número total de segmentos de drenagem (Souza et al., 2021).

Para (Rodrigues et al., 2020), o tempo de concentração representa o tempo de resposta a bacia, sendo comumente utilizados em cálculos de precipitações e na elaboração de hidrogramas de projecto, analisa-se para cada sub-bacia por três métodos de cálculo, que são: Dooge, Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos da América e Kirpich, cujas equações são descritas a seguir:

$$T_c = 21.88 \times A^{0.41} \times S^{-0.17} \quad (1)$$

$$T_c = 11.46 \times L^{0.76} \times S^{-0.19} \quad (2)$$

$$T_c = 3.99 \times \left(\sqrt{\frac{L}{S}} \right)^{0.77} \quad (3)$$

6. Coleta de dados de campo e análise laboratorial

Durante um estudo desenvolvido por (Kelnar et al., 2026), foram realizadas campanhas de campo, entre as quais quatro para a colecta de sedimentos e dez para medições de vazão, durante um ano e meio de testes, no estação seca e chuvosa. Os sedimentos foram colectados utilizando uma draga Petersen e armazenados em plásticos identificados e posteriormente transportados para o laboratório. A vazão do rio foi medida utilizando um correntómetro fluiométrico da HIDROMEC e um velocímetro acústico Doppler SONTEK FlowTracker. As amostras de água foram colectadas em simultâneo com as medições de vazão, para a análise dos sólidos totais em suspensão, utilizando um amostrador de sedimentos integrador, DH48.

7. Estimativa na produção de sedimentos e a Equação Universal de Perda de Solos (USLE)

A análise de sedimentos em bacias hidrográficas é conduzida por meio de diferentes métodos. A perda directa do solo foi estimada com base na Equação Universal de perda de solos (USLE). A conectividade dos sedimentos foi avaliada a partir do Índice de Conectividade (IC), determina-se a taxa de entrega de sedimentos (SDR), cuja integração desses parâmetros (IC e SDR), estima-se o índice de produção de sedimentos (de Oliveira et al., 2023).

A Equação Universal de Perda de Solos (USLE) é utilizada para estimar a erosão laminar potencial na área de estudo. A USLE permite calcular a perda média anual de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) com base em fatores climáticos, topográficos, pedológicos e de manejo:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4)$$

Onde:

- A = Perda anual de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);
- R = Fator erosividade da chuva ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);
- K = Fator erodibilidade do solo ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$);
- L = Fator comprimento de encosta (adimensional);
- S = Fator declividade (adimensional);
- C = Fator cobertura e manejo do solo (adimensional);
- P = Fator práticas conservacionistas (adimensional).

8. Erosividade da chuva (Factor R) e erosivo das chuvas, Índice de Conectividade da chuva (IC)

O factor R representa o potencial erosivo das chuvas, integrando a intensidade e duração. Este factor é calculado com base na equação de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), que utiliza dados mensais e anuais de precipitação:

$$EI = 68.73 \times \left(\frac{p^2}{P} \right)^{0.841} \quad (5)$$

Onde:

- p é a precipitação média mensal (mm);
- P a precipitação média anual (mm).

O índice de conectividade mede a facilidade com que a água e os sedimentos se deslocam de um ponto da bacia hidrográfica até o curso de água principal, ou seja, estima a eficiência de transferência de sedimentos nas encostas para canais de drenagem:

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \quad (6)$$

Onde:

- D_{up} (potencial de aporte) é relacionado à área de contribuição e declividade média da encosta;
- D_{dn} (resistência distância ao canal) é o caminho mais curto até a drenagem, ponderado pela declividade e uso/cobertura do solo.

Para o cálculo do potencial de aporte (D_{up}) foi utilizada a equação:

$$D_{up} = \sum (A_i \tan \theta_i) \quad (7)$$

Onde:

- A_i = área de contribuição acumulada na célula;
- θ_i = declividade da célula.

9. Taxa de Entrega de Sedimentos (SDR) e Índice Efectivo de Produção de Sedimentos (Eefetivo)

O transporte efectivo de sedimentos na bacia hidrográfica é estimada pela integração da Equação Universal de Perda de Solo (USLE/RUSLE/EUPS) com a taxa de entrega de sedimentos (SDR), que representa uma porção de solo erodido que atinge efectivamente a rede de drenagem. Para estimar o SDR, o Índice de Conectividade atua como uma variável explicativa: $SDR = 1 - e^{-(a+b+IC)}$, onde:

- a corresponde ao intercepto da função logística ($a \approx 0,56$);
- b ao coeficiente angular que controla a inclinação da curva ($b \approx 0,17$).

A exportação efectiva de sedimentos ($E_{efetivo}$) corresponde ao volume de material que é transferido da vertente para o sistema de drenagem. Para sua estimativa, considera-se o produto entre a perda potencial de solo, calculada pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE), e o fator de entrega de sedimentos (SDR): $E_{efetivo} = USLE \times SDR$.

9.1. Calibração, testes e análise de sensibilidade do modelo SWAT

De acordo com (Lelis et al., 2012), a calibração do SWAT é essencial devido à incerteza dos dados de entrada, que pode ser feita de forma manual ou automática. Este processo aumenta a fiabilidade das simulações, ainda que dependa da qualidade e quantidade de dados disponíveis, recomenda-se a sua utilização para séries longas. Após a calibração procede-se à sua validação com dados independentes para verificar o seu desempenho, pelo que, a calibração e validação permitem a aplicação confiável do modelo e a extrapolação dos resultados para bacias com características similares.

De acordo com (Pontes et al., 2021), o SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias conectadas por uma rede de drenagem, e em cada uma cria Unidades Hidrológicas de Resposta (URHs), correspondentes a combinações únicas no uso e tipo do solo, declividade, permitindo simular de forma detalhada o escoamento, a erosão e o transporte de sedimentos. O SWAT estima o escoamento superficial com a abordagem do número de curva SCS, e o pico de escoamento é obtido:

$$Q_{pico} = \frac{YTC \times Q_{surf} \times A}{3.6 \times T_{conc}} \quad (8)$$

Onde:

- Q_{pico} é a taxa de escoamento máximo;
- Y_{tc} é a fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração.

10. Resultados e discussão

Segundo (Domingues et al., 2023), as geotecnologias desempenham múltiplas funções na colecta, processamento, análise, representação e disponibilização de informações que subsidiam a tomada de decisões para a gestão dos recursos hídricos. Neste contexto, a integração de dados geoespaciais com técnicas de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica, permite caracterizar a morfometria e a dinâmica de sedimentos, identificando áreas de maior risco de erosão.

- Q_{surf} é o escoamento superficial (mm);
- Área é a área da sub-bacia (km^2);
- t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (hora);

- 3,6 é um fator de conversão de unidades.

O escoamento máximo é calculado a partir do escoamento superficial e do tempo de concentração, enquanto que a erosão e o transporte de sedimentos são simulados utilizando a equação de MUSLE, os coeficientes linear e exponencial, a equação de Bagnold e a concentração máxima de sedimentos, permitindo estimar de forma detalhada o assoreamento, o impacto hidrológico e a gestão integrada da bacia.

O radar SRTM desempenha um papel importante na delimitação de bacias hidrográficas, pois fornece os MDE, a partir do qual são obtidas as informações sobre o relevo, rede de drenagem e a direção do escoamento. Nesse sentido, se percebe a importância das geotecnologias na caracterização morfométrica uma vez que contribuem para a avaliação de impactos decorrentes das ações naturais e antrópicas em bacias hidrográficas.

A diferença entre o valor obtido em alguns estudos e os valores presentes em literatura pode ser justificada pelo desempenho dos softwares para delimitar regiões com altitudes baixas próximas ao nível do mar. Apesar dos obstáculos apresentados, demonstra-se a eficácia do uso do MDE SRTM 90m para delimitação de grandes bacias hidrográficas (Melo et al., 2020).

A análise da geometria da bacia auxilia na identificação de áreas vulneráveis a cheias ou inundações, enquanto que, o coeficiente de compactidade (Kc), fator de forma (Kf) e o índice de circularidade (Ic) demonstram a tendência em ocorrer esses eventos face a ocorrência de precipitações normais. Quando essas variáveis se aproximam de 1, a probabilidade da ocorrência de desastres hidrológicos aumenta significativamente, esse valor indica que a bacia apresenta um formato mais achatado. Em contrapartida, quando essas variáveis tiverem valores menores que 1, indicam menor vulnerabilidade à ocorrência de cheias e inundações, devido à sua forma mais alongada (Domingues et al., 2023).

As características do relevo colaboram diretamente na velocidade do escoamento superficial ou subterrâneo. Essas variações nas altitudes influenciam a distribuição espacial e/ou temporal do transporte e deposição de sedimentos e a capacidade de infiltração do solo (Ogarekpe et al., 2020). Para além disso, o relevo também influencia nas características da rede de drenagem, os vales profundos e os rios íngremes são mais propensos à erosão resultante da topografia acidentada.

Além disso, os estudos de Marinho et al. (2020) demonstram a relação existente entre a densidade de drenagem e a rede de rios, tendo em vista que áreas com elevada densidade de drenagem frequentemente apresentam uma rede de rios densa. Isso tem implicações significativas na resposta da bacia a eventos climatológicos extremos, configurando-se como elemento crítico para a gestão de riscos. Diante do exposto, os estudos morfométricos de bacias hidrográficas são fundamentais para a gestão adequada dos recursos hídricos e a prevenção de desastres naturais.

A ausência de cobertura vegetal, intensidade de chuvas e o alto grau de declividade, contribuem para o aumento da velocidade de escoamento e menor infiltração de água pelo solo, tendo como resultado a degradação do solo por processos de erosão (de Domingues et al., 2023).

Para (Ogarekpe et al., 2020), a densidade de drenagem (Dd) mede a proximidade, em termos de proximidade, dos canais fluviais dentro de uma bacia. Os valores de Dd são normalmente altos nas regiões de material subsuperficial impermeável e relevo montanhoso, implicando altos volumes de inundação e vice-versa. Quanto maiores os seus valores, maior o escoamento. Portanto, os fatores compostos

foram por meio de alta permeabilidade e capacidade de infiltração com menor escoamento superficial.

No estudo desenvolvido por (Pontes et al. 2021), o modelo SWAT demonstrou desempenho satisfatório na estimativa mensal de vazão, embora tenha superestimado os valores devido à seca severa, com precipitação anual 28% inferior à média histórica, evidenciando limitações na representação de padrões climáticos não contemplados na calibração. Apesar da elevada incerteza, as cargas de sedimentos simuladas foram consideradas adequadas, sendo a maior incerteza comum em bacias pequenas e quando o intervalo de simulação excede o tempo de concentração. Apesar de não representar plenamente a interação entre cobertura do solo e erosão de encostas, o SWAT fornece estimativas confiáveis do aporte de sedimentos a jusante e da sedimentação em reservatórios, sendo adequado para pequenas bacias com relevo complexo.

11. Conclusão

A análise morfométrica constitui uma abordagem essencial para compreender a dinâmica hidrológica e sedimentar das bacias hidrográficas. Os parâmetros morfométricos influenciam diretamente a produção, retenção e transporte de sedimentos, especialmente durante eventos hidrológicos extremos, como cheias e inundações.

Os sedimentos gerados pela chuva variam conforme o tipo de solo. Solos mais argilosos e ricos em matéria orgânica produzem partículas maiores, enquanto solos menos argilosos geram partículas mais pequenas. O tamanho dos sedimentos depende da textura e da estabilidade dos agregados do solo. O modelo RUSLE integrado a um SIG se configura como uma ferramenta possível de ser aplicada em local com precariedade de monitoramento sedimentométrico, ressaltando a economia de custos e tempo para execução de análises, embora medidas de conservação sejam essenciais para controlar a erosão e gerir eficazmente os recursos hídricos.

A aplicação de SIG e sensoriamento remoto se mostra eficaz na avaliação dos atributos morfométricos de tais áreas. Os parâmetros podem ser aprimorados em estudos futuros, dados adicionais de alta resolução podem ser utilizados para revelar mais detalhes. Neste contexto, a integração de estudos morfométricos na gestão de bacias hidrográficas revela-se fundamental para promover o uso sustentável dos recursos hídricos, reduzir riscos de inundações, conflito de uso do solo e vulnerabilidade hídrica os quais servirão para tomada de decisão do poder público na implantação de políticas de uso do solo e das bacias hidrográficas.

■ REFERENCES

- [1] Águila, S. del, Mejia, A., Águila, S. del, & Mejia, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 538-562. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2021-02-12>
- [2] Baldotto, J. B., Buarque, D. C., & de Oliveira, E. M. (2021). Levantamento da perda de solo e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce (Espírito Santo) por modelagem matemática. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 9(3). <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/831>
- [3] Bhattacharya, R. K., Chatterjee, N. D., Acharya, P., & Das, K. (2021). Morphometric analysis to characterize the soil erosion susceptibility in the western part of lower Gangetic River basin, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(6), 501. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06819-8>

- [4] De Matos Domingues, E., Soares, K. V. L., Clemente, C. M. S., & de Lima Silva, N. (2023). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio das Rs/BA, Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 11(3). <https://www.revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1494>
- [5] De Oliveira, J. G., Santos, L. J. C., de Souza, R. M., Neto, I. de O. B., de Paula, E. V., & Dittrich, J. (sem data). Produção de sedimentos em bacias hidrográficas tropicais: Uma integração da USLE com o Índice de Conectividade em Antonina, PR. Obtido 13 de março de 2026, de <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/download/80061/42993/382561>
- [6] De Oliveira, M. K. T., da Silva Macedo, R. C. B., de Oliveira Rebouças, C. K., & Silva, K. C. N. (2023). Ação antrópica na erosão de solo em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro. *HOLOS*, 8(39). <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16838>
- [7] De Souza, C. F., Pertille, C. T., Corrêa, B. J. S., & Vieira, F. S. (2017). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Ivaí-Paraná. *Geoambiente On-Line*, (29). <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/50602>
- [8] Joy, M. A. R., Upaul, S., Fatema, K., & Amin, F. R. (2023). Application of GIS and remote sensing in morphometric analysis of river basin at the southwestern part of great Ganges delta, Bangladesh. *Hydrology Research*, 54(6), 739-755.
- [9] Kelnar, A. R., Gusmo, L. K., Kreutz, C., Poletto, C., & Arantes, E. J. (2026). Modeling and analysis of sediment discharge in three tributaries of the Mourão River basin, Brazil. *Revista Ambiente & Água*, 21, e3106. <https://doi.org/10.4136/ambiagua.3106>
- [10] Melo, D. O. S., Santos, L. S., Barbosa, A. G., & Mendes, L. A. (2020). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Real pelo uso de dados SRTM e tecnologias SIG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(07), 3553-3570.
- [11] Mussama, I. T. T., Ubissee, H. G., Hilario, R. F., Magaia, G. C. M., & Andicene, T. (2025). Análise da morfometria da bacia hidrográfica do rio Lúrio, Moçambique: Uma ferramenta para a gestão sustentável dos recursos hídricos. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, 6, e025009.
- [12] Ogarekpe, N. M., Obio, E. A., Tenebe, I. T., Emenike, P. C., & Nnaji, C. C. (2020). Flood vulnerability assessment of the upper Cross River basin using morphometric analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1378-1403. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1785954>
- [13] Oliveira, J. F. D. de, Coelho, G., & Carvalho, R. N. (2024). Determination of suspended sediment rating curve and models to estimate the suspended solids concentration in the Pandeiros river, Brazil. *RBRH*, 29, e16. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230138>
- [14] Oliveira, P. T. de, Alves Sobrinho, T., Steffen, J. L., & Rodrigues, D. B. (2010). Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(8), 819-825.
- [15] Paz, Y. M., da SILVA, J. F., de HOLANDA, R. M., & Galvinctio, J. D. (2022). Avaliação espacial da produção de sedimentos e estratégias para redução dos processos erosivos em bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. *Derbyana*, 43, e753.
- [16] Pontes, L. M., Batista, P. V. G., Silva, B. P. C., Viola, M. R., Rocha, H. R. da, & Silva, M. L. N. (2021). Assessing sediment yield and streamflow with SWAT model in a small sub-basin of the Cantareira System. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 45, e0200140. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200140>
- [17] Raiol, L. L., Ferreira, M. T., Santos, D. C. R., & Hayashi, S. N. (2022). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio caripi, zona costeira amazônica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(5), 2354-2370.
- [18] Rodrigues, A. de C. F., da Silva, C. W. G., da Silva Rodrigues, E., da Silva Galvão, S. R., & Caldas, A. M. (2020). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Terra Nova-PE. *Revista Semiárido De Visu*, 8(1), 2-14.
- [19] Rodrigues, S. C., & Silva, R. E. (2020). Avaliação do impacto da criação de canais artificiais sobre a dinâmica das vazões e sedimentos em suspensão em bacia hidrográfica. *Boletim Goiano de Geografia*, 40(01), 1-34.
- [20] Saraiva Okello, A. M. L., Masih, I., Uhlenbrook, S., Jewitt, G. P. W., Van der Zaag, P., & Riddell, E. (2019). Drivers of spatial and temporal variability of streamflow in the Incomati River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 657-673.
- [21] Souza, E. G. F., Nascimento, A. H. C., Cruz, E. A., Pereira, D. de F., Silva, R. S., Silva, T. P., & Freire, W. A. (2021). Delimitação e caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho do Navio, Pernambuco, a partir de dados SRTM processados no QGIS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(03), 1530-1540.