

ANÁLISE MORFOMÉTRICA COM SUPORTE DE GEOTECNOLOGIA APLICADA NA BACIA DO RIO MADEIRA

Vinicius Alexandre Sikora de Souza¹, Otto Corrêa Rotunno Filho², Daniel Medeiros Moreira³,
Anderson Paulo Rudke⁴ e Claudia Daza Andrade⁵

¹Doutorando em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, vass1000@gmail.com; ²Professor do Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, otto@coc.ufrj.br; ³ Engenheiro do Departamento de Hidrologia da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM, daniel.moreira@cprm.gov.br; ⁴Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, rudke@alunos.uftpr.edu.br; ⁵Professora de Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, dazaclau@gmail.com

RESUMO

O trabalho visa realizar a caracterização morfométrica de unidades drenantes da bacia hidrográfica do rio Madeira com apoio de sistema de informação geográfica (SIG) e da tecnologia de sensoriamento remoto. Mais especificamente, empregou-se a base de dados de imagens HydroSHEDS para estimar informações físicas associadas com a bacia de estudo, como fator de forma, coeficiente de compacidade, índice de circularidade, elevação, declividade da bacia, declividade do curso de água principal e densidade de drenagem. Constatou-se que a bacia hidrográfica, em função do formato retangular e alongado, apresenta, em condições normais, pouca propensão a enchentes, mas seus canais podem ser altamente impactados pelo transporte de sedimentos. Nesse sentido, evidencia-se que ações antrópicas devem ser avaliadas com maior rigor tendo em vista a potencial geração de processos erosivos que podem comprometer a qualidade da água produzida nessa bacia, o que requer especial atenção às modificações na cobertura e uso do solo da região.

Palavras-chave — Morfometria, Drenagem fluvial, Escoamento em bacia hidrográfica, Bacia do Rio Madeira, Amazônia.

ABSTRACT

The aim of this work is to perform the morphometric characterization of drainage units of the Madeira River basin with support of geographic information system (GIS) and remote sensing technology. More specifically, the HydroSHEDS image database was used to estimate the physical information associated with the study basin, such as form factor, compactness coefficient, circularity index, elevation, basin slope, slope of the main watercourse and drainage density of. It was observed that the watershed, due to the rectangular and elongated shape, presents, under normal conditions, little propensity to flood, but its channels can be highly impacted by sediment transport. In this sense, it is evident that anthropic actions must be evaluated with greater rigor in view of the potential generation of erosive

processes that can compromise the quality of the water produced in this basin, which requires special attention to the modifications in the coverage and land use of the region.

Key words — Morphometry, River drainage, River basin flow, Madeira River watershed, Amazônia.

1. INTRODUÇÃO

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características geomorfológicas, como, por exemplo, forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem e solo, e do tipo da cobertura vegetal. Desse modo, as características físicas e bióticas de uma bacia possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, dentre outros processos, a infiltração, a quantidade de água produzida como deflúvio, a evapotranspiração e os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo [1].

Assim, a análise morfométrica de bacias hidrográficas é definida como um conjunto de procedimentos que tem, como orientação, a investigação e a compreensão científica dos componentes naturais de uma bacia hidrográfica. Os estudos relacionados aos cursos fluviais, por meio de métodos sistêmicos e racionais como parâmetros quantitativos, podem levar ao esclarecimento de várias questões acerca da morfogênese e da morfodinâmica da paisagem, tendo em vista que a rede de drenagem assume papel de destaque na compartimentação do relevo.

As análises dos aspectos relacionados à drenagem, ao relevo e à geologia facilitam a compreensão de diversas indagações associadas à dinâmica ambiental local, sendo as informações obtidas, nesses estudos, fundamentais para a elaboração de projetos de engenharia, uma vez que a tomada de decisão é facilitada, e os parâmetros de planejamento podem ser modificados mediante os resultados obtidos [2].

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi realizar a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Madeira a partir do levantamento de algumas informações fisiográficas, a saber: área, perímetro, fator de forma, coeficiente de compacidade, índice de circularidade, elevação, declividade da bacia, declividade do curso de água

principal, densidade de drenagem e ordem dos cursos de água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia do rio Madeira (Figura 1) é a segunda maior sub-bacia da bacia Amazônica, com uma área aproximada de 1.370.000 km², representando 23% do total da bacia Amazônica.

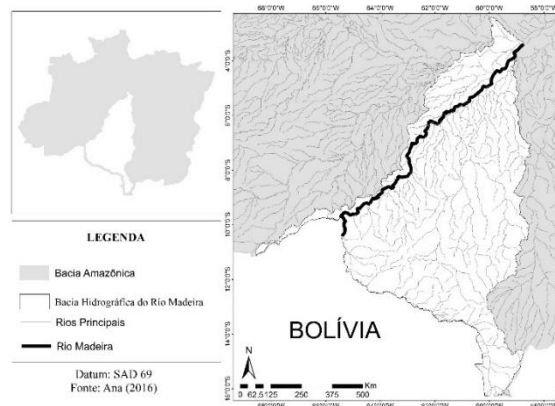


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Madeira.

O rio principal dessa bacia é o rio Madeira, o maior afluente meridional do rio Amazonas e o único rio Amazônico que drena, ao mesmo tempo, a cordilheira dos Andes, o escudo brasileiro e a planície Amazônica. A largura do rio Madeira varia de 440 a 9.900 metros, e sua profundidade, em alguns trechos, ultrapassa 13 metros.

2.2 Análise Morfométrica

A morfometria da bacia hidrográfica do rio Madeira foi aferida para visualizar comportamentos típicos que tal unidade pode apresentar dado seu formato e conformação de seus rios. Essa ação também possibilitou os pressupostos vislumbrados nos estudos de [3] e [4] onde destacam que, por essa análise, é possível elucidar as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional, além de revelar indicadores físicos específicos para uma determinada porção da região, de forma a melhor qualificar as alterações ambientais.

Para a aplicação das fórmulas, tornou-se necessário delimitar a bacia e a hidrografia, utilizando, para tanto, o modelo digital do terreno obtido através de imagens HydroSHEDS (*Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales*) com resolução de 30 metros, disponíveis no sítio da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), devido a essa base de dados corresponder melhor ao relevo da bacia do rio Madeira. Posteriormente, por meio dessas mesmas imagens, aferiu-se a declividade da região ao realizar o

processamento de sua superfície na função declividade (*slope*) do código computacional ArcGIS 9.3.

Na discriminação das sub-bacias, em nível 6 de *ottobacias*, utilizou-se a extensão *jgrassstools-pfafstetter* do código computacional QGis, que subdivide e delimita bacias hidrográficas segundo o método de Otto Pfafstetter. Nesse módulo, foram fornecidos, como entradas, o modelo do terreno e os mapas de direção de fluxo e acumulação de fluxo.

Os índices morfométricos estimados foram:

- densidade de drenagem (Dd), Equação 1, definida como a relação entre o comprimento dos canais (Lb) e a área da bacia hidrográfica (A)

$$Dd = Lb/A \quad (1)$$

- densidade hidrográfica (Dh), Equação 2, definida como o número de canais (N) por unidade de área (A)

$$Dh = N/A \quad (2)$$

- coeficiente de manutenção (Cm), Equação 3, que é o inverso da densidade de drenagem (Dd)

$$Cm = 1000/Dd \quad (3)$$

- relação de relevo (Rr), Equação 4, que estabelece a relação entre a diferença de altitudes máxima e mínima na bacia (Δa) e o comprimento total do canal principal (Lt)

$$Rr = \Delta a/Lt \quad (4)$$

- gradiente do canal principal (Gc), Equação 5, que consiste na relação entre a cota máxima (amax) e o comprimento do canal principal (L) expresso em porcentagem

$$Gc = amax/L \quad (5)$$

- índice de sinuosidade (Is), Equação 6, que relaciona o comprimento verdadeiro do canal (projeção ortogonal) (Lt) com a distância vetorial (comprimento em linha reta) (dv) entre os dois pontos extremos do canal principal

$$Is = Lt/dv \quad (6)$$

- índice de compactidade (Kc), Equação 7, que é a relação entre o perímetro da bacia (Pe) e a circunferência de área (A) igual à da bacia

$$Kc = 0,28(Pe/\sqrt{A}) \quad (7)$$

- fator de forma (Ff), Equação 8, que é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia hidrográfica

$$Ff = A/Lt^2 \quad (8)$$

- extensão do percurso superficial (Eps), Equação 9, que revela a evolução dos sistemas de drenagem

$$Eps = 1/(2.Dd) \quad (9)$$

3. RESULTADOS

A região do Madeira apresenta também relevo variado (Figura 2) com elevadas altitudes na região Andina (Bolívia) acima dos 6000 metros, até profundos vales atingindo a planície amazônica com quase 500 metros; assim, relatam-se vastas zonas de inundação na planície e a presença de cachoeiras no escudo brasileiro, principalmente próximo a Porto Velho [5].

O relevo da bacia variou, em sua grande maioria, de plano (36,21%) para suave-ondulado (40,50%) e ondulado (19,22%), constando, assim, que o relevo da região varia de

plano a suavemente ondulado em cerca de 89,30% da área da bacia.

Os valores mais baixos encontram-se nas vertentes próximas aos cursos de água. Verificou-se que o valor máximo de declividade observado na bacia foi de 255%, enquanto o valor médio foi de 6,62%. Portanto, observa-se que, na área de estudo, há o predomínio de declividades baixas típicas de planícies.

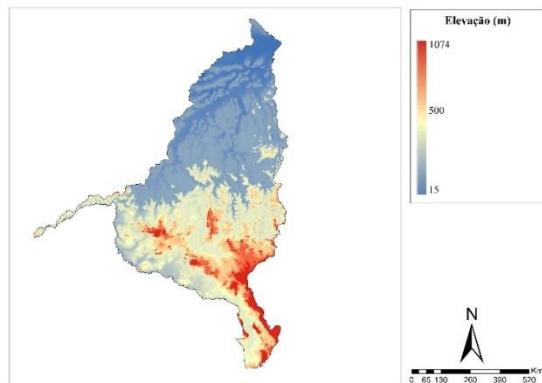


Figura 2. Mapa de elevação da bacia do rio Madeira.

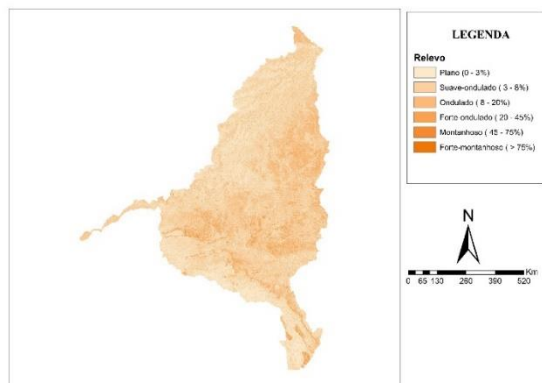


Figura 3. Mapa de declividade da bacia do rio Madeira.

Analisando o valor do fator de forma das bacias, observa-se que se apresentaram, em maior frequência, entre os intervalos de 1 a 4 e acima de 4. Esse fato indica que grande parte da bacia possui as unidades drenantes variando entre formatos quadrados a retangulares de baixo comprimento, identificando regiões com uma menor propensão a enchentes. Percebe-se, ainda, a existência de áreas no intervalo que caracterizam um aspecto de circularidade, que podem apresentar, como característica, hidrograma com picos mais acentuados, com alto risco de cheias e um pequeno tempo de concentração.

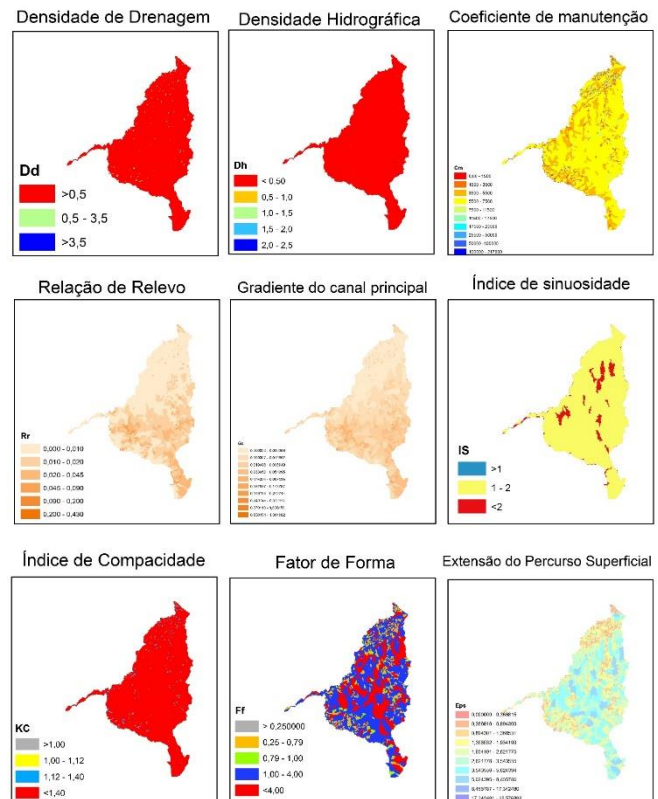


Figura 4. Principais índices físicos da bacia do rio Madeira.

Os índices físicos ou morfométricos das sub-bacias do rio Madeira são apresentados na Figura 4.

O parâmetro densidade hidrográfica considera a média da quantidade de canais por quilômetro quadrado de uma bacia, evidenciando sua capacidade hídrica e competência na formação de novos canais fluviais; dessa forma, o valor encontrado para a maior parte da bacia de $<0,5$ canal.km⁻² revela que, em função de seus atributos físicos, como geológicos, topográficos, a área tem grande dificuldade para formação de novos canais fluviais [6].

A maior frequência de valores de relação de relevo encontrada na bacia foi abaixo de 0,020, indicando que a bacia tem uma baixa relação de relevo entre os componentes horizontais (alongamento) e verticais (baixa amplitude altimétrica).

Complementando as constatações anteriores, o índice de compacidade obtido foi, na maioria das bacias, acima de 1,4, indicando novamente que a bacia possui formato próximo ao retangular, denotando, assim, uma menor potencialidade de enchentes [7].

Como o índice de sinuosidade mostrou-se no intervalo de 1 a 2 e com algumas áreas acima de 2,0, o sistema drenante caracteriza-se por apresentar por redes de drenagem sinuosas, podendo haver acúmulos de sedimentos, o que pode ser agravado pela ação antrópica [8].

O gradiente de inclinação do canal principal da bacia situou-se, em grande parte, abaixo de 0,1%, mostrando, assim, segundo [8], que a área drenada por esse sistema fluvial naturalmente não sofre uma grande pressão pela erosão fluvial.

Os valores de densidade de drenagem calculados para as bacias foram abaixo de $0,5 \text{ km.km}^{-2}$; esse fator qualifica a bacia em fracamente drenada, conforme os padrões de classificação adotados por [9]. Assim, as unidades da bacia do rio Madeira não possuem uma grande eficiência em seus sistemas de drenagem, indicando que têm fluxos mais lentos no escoamento superficial, originado da chuva, para a sua chegada na saída da bacia [2].

O intervalo de valores típicos encontrados para os coeficientes de manutenção de $5500 \text{ a } 7500 \text{ m}^2.\text{m}^{-1}$ revela que cada canal da bacia possui essa magnitude em média para sua manutenção (área de recarga) e evolução da drenagem, denotando ter uma boa área de distribuição da rede hidrográfica. No entanto, o parâmetro densidade hidrográfica, que considera a média da quantidade de canais por quilômetro quadrado de uma bacia, conforme destacado previamente, contrasta com essa interpretação, uma vez que o valor de $0,50 \text{ canal.km}^{-2}$ revela grande dificuldade para formação de novos canais fluviais.

A extensão do percurso superficial para a bacia em estudo ficou abaixo de 0,60; assim, esse é o valor que representa a distância média percorrida pelas enxurradas na mesma entre o interflúvio e o canal permanente [2].

Ao analisar conjuntamente os índices físicos, depreende-se que as unidades drenantes dentro da bacia do Madeira possuem formato retangular e alongado e, como posto anteriormente, em condições normais, apresenta pouca propensão a enchentes, mas seus canais podem ser altamente impactados pelo transporte de sedimentos. Logo, ações antrópicas que provoquem processos erosivos podem comprometer a qualidade de água desse corpo hídrico.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou a possibilidade de lançar mão de geotecnologias na perspectiva de integrar geoprocessamento e imagens de satélite com a determinação e avaliação de um sistema complexo como a bacia hidrográfica por meio de diversos índices, muitos deles construídos e expostos em uma literatura relativamente recente.

Adicionalmente, o emprego de imagens de satélite permite o processo de monitoramento em bacias pouco ou não monitoradas, oferecendo condições de realizar diversos estudos de diagnóstico sobre o comportamento hidrológico-hidráulico de uma bacia hidrográfica.

Em especial, a morfometria das unidades drenantes da bacia do rio Madeira pôde ser caracterizada como variando entre formatos quadrados a retangulares de baixo comprimento. No entanto, como foi destacado anteriormente, o diagnóstico é de que há potenciais condições para produção de sedimentos e impactos na qualidade de água em especial decorrentes da evolução da cobertura e uso do solo na região. Nesse sentido, recomendam-se oportunos estudos de avaliação e

acompanhamento das modificações na cobertura e uso do solo na bacia de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PEC-COPPE/UFRJ, à CPRM e à ANA. Gratidão é estendida às agências de fomento CNPq, FAPERJ, FINEP e CAPES (Código de Financiamento 001) e aos órgãos provedores de dados empregados na pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Smith, A.B.; Jones, C.D. e Roberts, E.F., "Título do Artigo", *Periódico*, volume (v.), número (n.), páginas (pp.), data.
- [2] Jones, C.D.; Smith, A.B. e Roberts, E.F., "Título", Editora, Local, páginas (pp.), data.
- [1] Tonello, K. C. et al. "Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG". *Rev. Árvore*, Viçosa, v. 30, n. 5, pp. 849-857, 2006.
- [2] Silva, R. C. "Análises morfométricas e hidrológicas das bacias hidrográficas do córrego Teixeira, ribeirão das Rosas e ribeirão Yung, afluentes do rio Paraíba, município de Juiz de Fora/MG", Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Análise Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- [3] Teodoro, V. L. I.; Texeira, D.; Costa, D. J. L.; Fuller, B. B. "O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local", *Revista Uniara*, n. 20, 2007.
- [4] Collares, E.G. "Avaliação de alterações em redes de drenagem de sub-bacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari-SP". Tese de Doutorado em Geotecnologia, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2000.
- [5] Ribeiro Neto, A. et al. "Caracterização da formação de cheias na bacia do rio UMA em Pernambuco: Simulação hidrológica – hidrodinâmica". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos: RBRH*, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p.394-403, abr. 2015.
- [6] Santos, D. A. R.; Morais, F. "Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de lagoa da Confusão – TO". *Revista Geonorte*, v. 3, n. 4, pp. 617-629, 2012.
- [7] Porto, R. L. "Bacias hidrográficas". Escola politécnica da USP. 1999.
- [8] Stipp, N. A. F.; Campos, R. A.; Caviglione, J. H. "Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Taquara – Uma contribuição para o estudo das ciências ambientais", *Portal da Cartografia*, Londrina, v. 3, n. 1, 2010.
- [9] Beltrame, A. V. "Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação". Florianópolis, UFSC, 1994.