



CPRM

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE BELÉM

GERÊNCIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL

Caracterização Fisiográfica da Bacia do Ribeirão das Cruzes, Araraquara – SP

Nota Técnica

Autora

Andressa Macêdo Silva de Azambuja
andressa.azambuja@cprm.gov.br

Colaboração

Raimundo Almir Costa da Conceição
raimundo.conceicao@cprm.gov.br

Vitória Ribeiro Pereira
vitoria.pereira@cprm.gov.br

Belém, 2021

Sumário

Introdução	3
Coeficiente de compacidade (Kc)	3
Fator de Forma (Kf)	3
Índice de Circularidade (IC)	4
Índice de Rugosidade (Ir)	4
Ordem dos Cursos de Água	4
Densidade de Drenagem (Dd)	4
Sinuosidade (Sin)	5
Tempo de Concentração (tc)	5
Análise dos Índices morfométricos da bacia do Ribeirão Xambiozinho, Araraquara, TO	6
Localização	6
Materiais e Métodos	6
Resultados	8
Discussões	9
Referências Bibliográficas	11

Introdução

O objetivo deste estudo é complementar as análises do Projeto Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações através da obtenção de índices morfométricos quantitativos que auxiliarão nos estudos hidrológicos e ambientais relacionados à gestão territorial. Com isso, a interpretação preliminar aliada à validação de campo permitirá a otimização da tomada de decisão quanto aos potenciais uso e ocupação do solo e melhor gestão quanto à possível suscetibilidade a enchentes e erosões.

Os índices são calculados a partir de fórmulas e conceitos propostos por Villela e Mattos (1975) e tem como vantagem o conhecimento da dinâmica hídrica e vulnerabilidade ambiental pré-campo em tempo hábil e baixo custo, pois utilizando dados de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e seus derivados é possível inferir o comportamento das sub-bacias de uma área, no que diz respeito ao seu potencial para inundações e para processos erosivos.

As sub-bacias selecionadas para análise são selecionadas de acordo com a sua proximidade da área urbana municipal e considerando que sua área tem potencial para abrigar futuramente vetores de expansão, os quais podem ser afetados por desastres naturais.

A caracterização é realizada a partir das características geométricas, do relevo e da rede de drenagem. Cada aspecto revela dados que são inseridos em equações matemáticas vastamente conhecidas na bibliografia e seus resultados descrevem o comportamento hidrológico da bacia. Os índices morfométricos analisados são apresentados a seguir.

Coefficiente de compacidade (Kc)

É a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. Esse coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia independente do seu tamanho, assim quanto mais irregular ela for, maior será o coeficiente de compacidade, ou seja, quanto mais próxima da unidade, mais circular será a bacia e será mais sujeita a enchentes (Villela & Mattos, 1975). É dado por:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Onde: P é o perímetro em km e A é a área da bacia em km².

Fator de Forma (Kf)

É a relação entre a largura média e o comprimento axial da Bacia. Em bacias de forma mais alongada e estreita, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas ao mesmo tempo em toda sua extensão, afastando assim, a condição ideal para ocorrência de cheias. É dado pela equação:

$$Kf = \frac{A}{C^2}$$

Onde: A é a área da bacia em km^2 e C é o comprimento axial da bacia em km

Índice de Circularidade (IC)

Ele tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma se torna alongada. Segundo SCHUMM (1956) apud EMBRAPA (2012), valores maiores que 0,51 mostram que a bacia tende a ser mais circular favorecendo os processos de inundação (picos de cheias). Os valores menores que 0,51 sugerem que a bacia tende a ser mais alongada, o que contribui para o processo de escoamento. A equação é dada por:

$$IC = \frac{12,57 \times A}{P^2}$$

Onde: A é a área da bacia em km^2 e P é perímetro da bacia em km

Índice de Rugosidade (Ir)

É um relevante índice que associa a disponibilidade do escoamento hídrico superficial com seu potencial erosivo, expresso pela declividade média. Quanto maior for esse índice, maior será o risco de degradação da bacia. O coeficiente de rugosidade tem uma relação importante com os parâmetros hidrológicos, tais como: infiltração, umidade do solo, regulação do tempo do escoamento superficial e concentração da água das chuvas no canal principal. É dado por:

$$Ir = HDd$$

Onde: H é a diferença entre as cotas máxima e mínima (km) e Dd é a densidade de drenagem (km/km^2)

Ordem dos Cursos de Água

A ordem do rio principal definirá a extensão de ramificação na bacia e quanto maior o grau de ramificação da rede de drenagem maior a tendência para o pico de cheia. Este índice será obtido segundo Strahler (1957).

Densidade de Drenagem (Dd)

Indica a eficiência da drenagem na bacia, o que significa dizer que quanto maior a densidade de drenagem mais rapidamente a água do escoamento superficial originada pela chuva chegará à saída da bacia gerando hidrogramas com picos maiores e em menos tempo. É um dos parâmetros mais importantes pois funciona como índice demonstrativo do trabalho fluvial de erosão da superfície e, dessa forma, adquire importância como instrumento de análise da paisagem, sobretudo para a identificação de possíveis focos de suscetibilidade geomorfológica (SOARES et al., 2016 apud SILVA et

al., 2018). Além disso, é utilizado também para pré-avaliação em estudos de regionalização ou transposição de dados hidrológicos entre bacias de uma região, pois permite avaliar a semelhanças de escoamento entre bacias hidrográficas de tamanhos diferentes (mas com mesma escala do mapa). É calculada através da equação:

$$Dd = \frac{Li}{A}$$

Onde: Li é a somatória da extensão dos cursos d'água (efêmeros, intermitentes e perenes), em km e A é a área da bacia, em km².

Sinuosidade (Sin)

Está relacionada à velocidade do escoamento nos canais de drenagem e, em síntese, sua relação com o solo em produzir erosão. Quanto maior a sinuosidade, maior será a dificuldade de se atingir o exutório do canal, portanto, a velocidade de escoamento será menor. Valores próximos a 1 indicam canais retilíneos, valores superiores a 2 indicam canais sinuosos e os valores intermediários indicam formas transicionais. É dada pela relação:

$$Sin = \frac{C}{Ct}$$

Onde: C é o comprimento do rio, Ct comprimento do rio medido em linha reta.

Tempo de Concentração (tc)

É uma característica de extrema importância para o conhecimento do comportamento hidrológico da bacia, sobretudo, da chuva crítica e da vazão máxima do escoamento superficial, também denominada vazão de pico. Ele é função das características físicas da bacia e a sua magnitude influencia o pico e a forma do hidrograma do escoamento, sendo, por conseguinte, uma grandeza imprescindível para uma avaliação hidrológica eficaz.

O tempo de concentração (tc) é o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial na seção de saída. Ou seja, o tempo de concentração é o tempo que leva para que a água que choveu no ponto da bacia hidrográfica mais distante da foz possa chegar lá. Então, quando chove sobre uma bacia hidrográfica por um período maior que o tempo de concentração, toda a bacia contribui para o exutório, sendo alcançada a vazão máxima para essa chuva.

Para obter tc existem na literatura várias equações empíricas. Dentre estas, foi usada aqui a de Kirpich (California Culverts Practice), que é dada por:

$$tc = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Onde: L é o comprimento do rio, em km, e H é diferença de elevação entre o ponto mais remoto da bacia e o nível d'água na seção considerada, em m.

É preciso ressaltar que as fórmulas foram desenvolvidas para bacias específicas. Por isso é importante que a partir das primeiras medições o tc seja estimado hidrologicamente, a fim de confirmar ou não o valor obtido pela análise morfométrica.

Análise dos Índices morfométricos da bacia do Ribeirão das Cruzes, Araraquara, SP

Localização

A bacia hidrográfica estudada foi a do Ribeirão das Cruzes. Este rio nasce ao Norte da área urbana de Araraquara e tem como afluentes vários cursos d'água na área urbana do município, indicando assim sua importância na configuração do relevo, drenagem e ocupação urbana (Figura 1). Esta bacia foi escolhida e delimitada a partir de critérios como o tamanho (grau de ramificação equivalente a uma bacia de, no máximo, 5ª ordem), tipo e, sobretudo, futuro potencial como **área de expansão da cidade**, com intuito, portanto de que os parâmetros calculados oferecessem respostas mais representativas da realidade da região do município em análise.

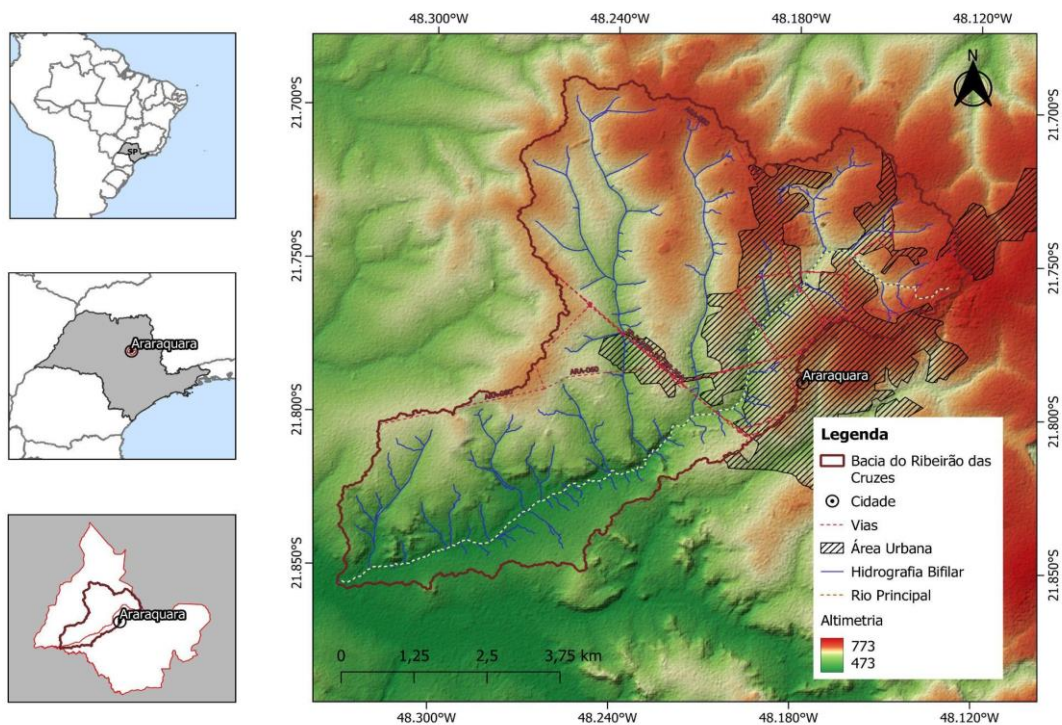


Figura 1. Mapa de localização da bacia em estudo

Materiais e Métodos

A análise foi realizada em ambiente SIG, por meio do QGIS 3.16 e a extensão WhiteboxTools¹. O dado de entrada principal foi o MDE/STRM reamostrado para 12,5 m, provenientes da ortoretificação de imagens ALOS/PALSAR (ASF, 2015). Este modelo, foi pré-processado e corrigido para análises hidrológicas.

Também foram utilizadas imagens *Google Earth*, a partir do *Quick Map Service*.

A partir do MDE pré-processado, foram extraídos os seguintes parâmetros para a bacia:

- Área (A);
- Perímetro (P);
- Amplitude (H);
- Cursos d'água;
- Curso d'água principal;
- Comprimento axial;
- Ordem de drenagem.

Foram também elaborados mapas de declividade (**Figura 2**) e mapa hipsométrico (**Figura 3**) para análise visual.

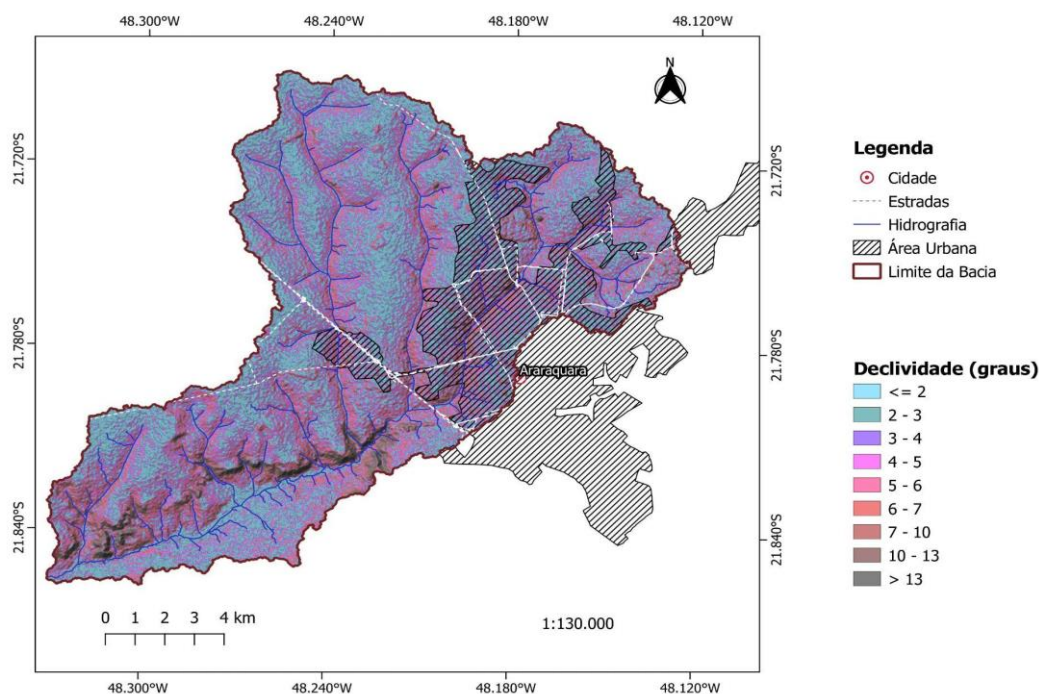


Figura 2. Espacialização da declividade da bacia

¹ https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/intro.html

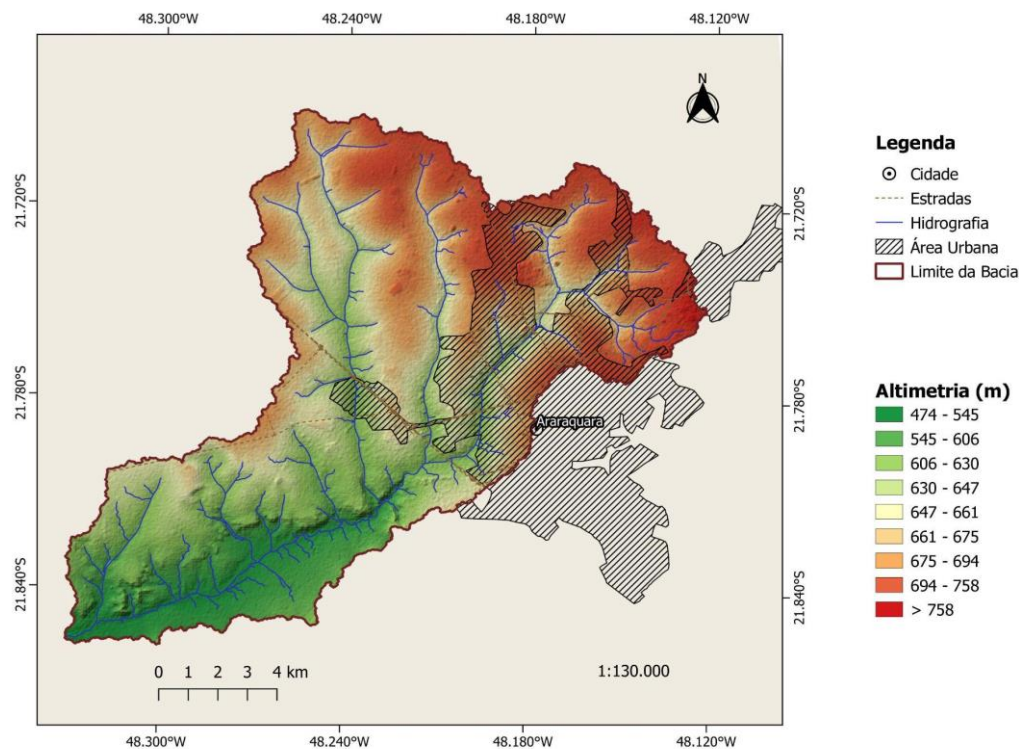


Figura 3. Espacialização da altitude da bacia

Resultados

Os resultados das análises são apresentados na **Tabela 1**:

Tabela 1. Parâmetros da bacia

Parâmetros	Resultado	Unidade
Área (A)	190,3	km ²
Perímetro (P)	114,3	km
Amplitude (H)	284	m
Comprimento total dos cursos de água (Li)	190,1	km
Comprimento do curso de água principal (C)	31,8	km
Comprimento axial da bacia (Ct)	23,5	km

Usando as equações de cada índice morfométrico com os parâmetros obtidos, a bacia pode ser caracterizada:

Tabela 2. Índices morfométricos da bacia

Índice	Resultado	Unid.	Característica	Suscetibilidade
Coefficiente de Compacidade	2,32	-	Alongada	Não sujeita a enchente
Fator de Forma	0,35	-	Alongada	Não sujeita a enchente
Índice de Circularidade	0,18	-	Alongada	Não sujeita a enchente

<i>Densidade de Drenagem</i>	1	Km/km ²	Média	Eficiência mediana. Suscetibilidade a processos erosivos.
<i>Índice de Rugosidade</i>	0,28	-	Média	Médio risco de degradação por erosão ocasionada por escoamentos superficiais.
<i>Ordem da bacia</i>	4	-	Boa ramificação.	Média tendência para picos de cheia
<i>Sinuosidade</i>	1,35	-	Transicional	Menos sinuoso, podendo haver melhor transporte de sedimentos e maior declividade do terreno.
<i>Tempo de Concentração</i>	376	min	Médio	Boa resposta à precipitação. Possibilidade de inundações bruscas.

Discussões

A bacia do Ribeirão das Cruzes foi selecionada pela sua proximidade com a sede municipal, tamanho e escala e por ser uma área potencial para expansão, tendo em vista que sua análise pode também auxiliar e complementar as informações contidas na Carta de Suscetibilidade de Araraquara, SP.

Quando consideradas algumas das principais características físicas da bacia, como as relacionadas à sua forma, o coeficiente de compacidade (2,32), o fator de forma (0,35), o índice de circularidade (0,18) faz pressupor uma bacia com formato mais alongado e, portanto, não sujeita à enchentes bruscas.

O índice de rugosidade (0,28), mostra uma tendência moderada a processos erosivos por escoamentos superficiais, o que, inclusive, demonstra que pode ser desfavorável à algumas práticas agrícolas, mas sim é indicado práticas conservacionistas do solo nessas áreas, sobretudo, na porção **sul-sudoeste** da bacia.

A densidade de drenagem se constitui como um dos mais importantes índices a ser considerado na análise quantitativa da bacia, pois, representa o grau de dissecação do relevo e funciona como índice demonstrativo do trabalho fluvial de erosão da superfície.

No caso da bacia do Ribeirão das Cruzes, uma densidade de drenagem de 1 km/km², medianamente eficiente, mostra certa suscetibilidade a processos erosivos. Importante lembrar que como a densidade de drenagem depende do comportamento hidrológico dos solos e rochas e da declividade média da bacia pode, portanto, variar espacialmente mostrando que alguns pontos são mais suscetíveis a enchentes e ou processos erosivos. Importante no caso desta bacia analisar a capacidade de fazer escoamentos rápidos no exutório onde a declividade é maior.

O índice de sinuosidade está relacionado à velocidade do escoamento e, em

síntese, sua relação com o solo em produzir erosão. O índice encontrado (1,35) sugere que o canal teria uma forma transicional, pouco sinuoso, podendo haver pouco acúmulo de sedimentos, isso significa, dentre outras coisas, que a área é favorável à conservação e preservação da bacia que tem pouca ou nenhuma influência geológica. Por ser transicional, é importante ratificar em viagem de campo, qual porção do rio (se mais à montante ou mais à jusante) ele é menos e mais sinuoso, e assim identificar possíveis pontos mais propensos à erosão e indicar o melhor uso desse solo quanto a cobertura para urbanização e/ou agricultura.

Sobre o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é fundamental saber seu valor já que para chuvas que duram menos que o tempo de concentração o volume de água que caiu na região mais distante vai chegar à foz depois do volume que caiu na região mais próxima à foz já tenha escoado. Já para chuvas com durações iguais ou maiores que o tempo de concentração da bacia, quando o volume que caiu na região mais distante chegar à foz, ele vai se somar com o volume que acabou de cair nas regiões mais próximas, causando uma cheia maior do que a de uma chuva mais curta. O valor encontrado para a bacia foi de aproximadamente 376min (ou seja, não é uma bacia muito lenta em resposta à uma precipitação mais intensa!).

Em bacias não-urbanas, o tempo de concentração depende, essencialmente, do escoamento sobre o terreno. Ou seja, nem toda bacia considerada pequena tem uma resposta rápida (menor de 6 horas) à precipitação.

“Há uma grande dificuldade em estabelecer um limiar, ou seja, um tempo limite que diferencie as inundações bruscas das graduais. De acordo com o NWS/NOAA (2005), este tempo pode ser de 6 horas. A WMO (1994) também sugere que as inundações bruscas são caracterizadas por um tempo de concentração curto, de aproximadamente 6 horas.” (Goerl e Kobiyama, 2014). Em outras palavras, a determinação do tempo de concentração, além de auxiliar na definição da vazão máxima a que está sujeita, também contribuirá para a formulação de ações preventivas de processos de inundação e erosão.

Com isso, mesmo considerando isoladamente e em condições normais de precipitação estes parâmetros, a bacia do Ribeirão das Cruzes apresenta tendência mediana a enchentes e suscetibilidade à erosão fluvial, possivelmente na região mais à sul-sudoeste da bacia. Desta forma, é importante ressaltar que a sede do município de Araraquara está localizada à leste da bacia de estudo e próxima a áreas supostamente de expansão, mas mais vulneráveis. Fica o alerta para a importância de investimento em controle dos processos erosivos e de compactação do solo que podem afetar o ciclo hidrológico local ao modificar as etapas de infiltração e escoamento superficial.

Por fim, este estudo é uma análise pré-campo e servirá, inclusive, como direcionamento estratégico para as equipes em viagem. Ressalta-se que estas visitas são necessárias para validação dos dados de vegetação, relevo e a rede de drenagem mas, sobretudo, é de extrema relevância a caracterização do solo e da precipitação com a máxima precisão possível para maior eficácia do diagnóstico da região e, por conseguinte, das propostas de medidas não-estruturais² essenciais e dos potenciais uso

² As medidas não-estruturais procuram disciplinar a ocupação territorial. Considerando aquelas mais adotadas, essas ações podem ser agrupadas em: ações de regulamentação do uso e ocupação do solo; educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa, erosão e lixo; zoneamento/mapeamento; sistemas de monitoramento, alerta e

e ocupação do solo para os quais a região estaria mais apta.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, N. V. et al. Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Riacho Desterro no Cariri e Alto Sertão Paraibano. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg>>. Acesso em 21 de nov. de 2020.

ASF - Alaska Satellite Facility. (2015). Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products. Product Guide, revision 1.2. Fairbanks, Alaska: [s.n.]. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf>.

BELTRAME, A. V. Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação. Florianópolis: UFSC, 1994. 112 p. Apud Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.945>) Agenor Micaeli dos Santos¹; Marcelo dos Santos Targa¹; Getulio Teixeira Batista¹; Nelson Wellhausen Dias

SANTOS, I. et al. Hidrometria aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 312 p.

EMBRAPA. Análise Morfométrica de Bacia Hidrográfica – Subsídio à Gestão Territorial Estudo de caso no Alto e Médio Mamanguape, Campinas - SP, 2012.

CARDOSO, C.A. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo-RJ. *Árvore*, Viçosa, v.30, n.2, p.241-248, 2006.

CÉSAR, E.G.M. et al. Características fisiográficas da bacia do Riozinho do Rola. Belém, SUDAM, 1990.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo: Blucher, 1980. CORDEIRO et al. Análise morfométrica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Candidópolis, Itabira (MG). Disponível em: <<https://rsd.unifei.edu.br/index.php/rsd/article/view/529/381>>. Acesso em 15 de ago de 2018.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.

KOBIYAMA, MASATO. Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais. 3ª edição – Florianópolis: UFSC/CTC/ENS/LabHidro, 2011. 242p.

PORTO, M. F. A.; PORTO R. La L. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avançados* 22 (63), 2008.

ROSA, L. A. S. A Bacia Hidrográfica como Unidade Territorial de Gestão Ambiental no Programa de Revitalização do rio São Francisco (Monografia de Especialização). Brasília: Universidade de Brasília/ Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2011. 91p. STRAHLER, A. N. Statistical Analysis in Geomorphic Research. *Journal of Geology*, v. 62, p. 1–25, 1954.

SILVA, A.M.; LIMA, L. C. Caracterização fisiográfica da bacia do Rio Peixe-Boi. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil). Belém: Universidade da Amazônia/ Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, 2000. 54f.

SILVA, G. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho Rangel-Piauí, Brasil. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n.28; p. 2018

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, v. 5, n. 1, p. 81–100, 1991. TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. *REVISTA UNIARA*, n.20, 2007

TRAJANO, S. et al. Análise morfométrica de bacia hidrográfica: subsídio à gestão territorial, estudo de caso no alto e médio Mamanguape. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Gestão Territorial*.

Campinas, SP, 2012. 33 p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. Editora Mc Graw Hill, São Paulo, 1975. 245p