

Artigo de Pesquisa

## Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim

*Compartmented spatial correlation of drainage patterns with morphometric characteristics of the Pirajibu-Mirim river watershed*

Vanessa Cezar Simonetti<sup>1</sup>, Darllan Collins da Cunha e Silva<sup>2</sup> e André Henrique Rosa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Sorocaba, Brasil. E-mail: [va\\_simonetti@hotmail.com](mailto:va_simonetti@hotmail.com)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6845-4875>

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Departamento de Engenharia Ambiental, Sorocaba, Brasil. E-mail: [darllan.collins@unesp.br](mailto:darllan.collins@unesp.br)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3280-0478>

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Departamento de Engenharia Ambiental, Sorocaba, Brasil. E-mail: [andre.rosa@unesp.br](mailto:andre.rosa@unesp.br)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2042-018X>

Recebido: 26/09/2020; Aceito: 19/02/2021; Publicado: 15/01/2022

**Resumo:** O conhecimento dos aspectos físicos da paisagem na escala da bacia hidrográfica, como relevo, morfometria, e as inter-relações com a dinâmica hidrológica possibilitam compreender os padrões de drenagem e inferir sobre as áreas mais vulneráveis ambientalmente. Diante disso, o estudo objetivou correlacionar espacialmente os padrões de drenagem com as características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim e identificar quais os compartimentos são mais vulneráveis à intervenção antrópica. O processamento dos dados foi realizado a partir de geoprocessamento, sendo utilizados o índice de concentração de rugosidade, curvatura horizontal e vertical das vertentes, altitude e declividade. Os parâmetros morfométricos contemplaram os índices de circularidade, coeficiente de compacidade, fator de forma, densidade de drenagem, coeficiente de manutenção e extensão do percurso superficial da água de enxurrada. As correlações foram realizadas a partir de análise multivariada de Componentes Principais e Análise de Conglomerados Hierárquicos. Os resultados evidenciaram que as sub-bacias se diferem em relação à área e perímetro, forma e drenagem, e morfografia (altitudes, declividades e curvaturas) e que esses aspectos estão relacionados aos padrões de drenagem. O estudo permitiu identificar os compartimentos que necessitam de atenção quanto às ações de gestão e manejo devido às suas características físicas intrínsecas.

**Palavras-chave:** Análise Multivariada; Morfografia; Sistema de Informação Geográfica.

**Abstract:** The knowledge of the physical aspects of the landscape at the hydrographic basin scale, such as relief, morphometry, and the interrelationships with the hydrological dynamics, make it possible to understand the drainage patterns and infer about the most environmentally vulnerable areas. Therefore, the study aimed to spatial correlation drainage patterns with the morphometric characteristics of the Pirajibu-Mirim river watershed and to identify which compartments are most vulnerable to anthropic intervention. Data processing was performed using geoprocessing using the roughness concentration index, horizontal and vertical curvature of the slopes. The morphometric parameters included the circularity ratio, compactness coefficient, form factor, drainage density, maintenance coefficient, and extension of the runoff surface. The morphophysiological relationships between the sub-basins were performed based on a multivariate analysis of Principal Components and Analysis of Hierarchical Conglomerates. Results demonstrated that the sub-basins differ concerning the area

and perimeter, form and drainage, and morphography (slopes and curvatures), and these aspects are related to drainage patterns. From the study, it was possible to obtain knowledge of the compartments of the Pirajibu-Mirim river watershed that need attention as to management actions and management because of their intrinsic physical characteristics.

**Keywords:** Multivariate Analysis; Morphography; Geographic Information System.

## 1. Introdução

A busca por bens naturais e a apropriação expressiva do homem ao espaço que o rodeia interfere significativamente na qualidade ambiental, principalmente no tocante aos recursos hídricos, que vêm sofrendo uma constante deterioração em razão dos diferentes usos que o impactam negativamente, reduzindo a quantidade e qualidade de água (MELO et al., 2019; SIMONETTI et al., 2019). Nesse sentido, qualquer ação ou intervenção antrópica culminará em possíveis desequilíbrios no meio físico e biótico e, por essa razão, torna-se imprescindível a realização de estudos que abranjam diferentes escalas, principalmente a escala da bacia hidrográfica (BORAH; DEKA, 2020).

A bacia hidrográfica consiste em um grupo de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, servindo como unidade de planejamento ambiental devido aos seus sistemas ecológicos e recursos naturais operarem de forma interligada e dependente (SILVA et al., 2020; SOARES et al., 2019).

Os processos que regem o equilíbrio em bacias hidrográficas são complexos e inter-relacionados e, por essa razão, conhecer as características físicas da bacia provém informações importantes sobre as características que permeiam sua dinâmica e que podem acarretar o declínio de sua qualidade ambiental. Assim, indicadores morfométricos são eficazes, sendo amplamente empregados na caracterização física dessas áreas, uma vez que fornecem uma estreita relação com o comportamento hidrológico (BOURAMTANE et al., 2020; GAJBHIYE; MISHRA; PANDEY, 2014).

O conhecimento das unidades homogêneas do relevo e suas inter-relações com a dinâmica hidrológica possibilitam o entendimento de padrões de drenagem. Somado a isso, a análise morfométrica pode fornecer informações preciosas no tocante às ações necessárias para o manejo e conservação dos recursos hídricos (SILVA et al., 2016).

A partir da correlação de parâmetros morfométricos, diversos estudos estimaram, de forma indireta, propriedades físicas e biológicas de bacias hidrográficas, como as unidades homogêneas do relevo (SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014), identificação de formas de vertentes (SOPCHAKI; SAMPAIO, 2013), análises macrogeomorfológicas (CARVALHO; LATRUBESSE, 2004), além de fatores associados a outras características, tais como as influências de atributos fisiográficos e morfométricos como suporte às avaliações da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa (CERRI et al., 2018).

De acordo com Valeriano e Carvalho Júnior (2003), as diferentes variáveis sujeitas à extração automática em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) podem fornecer suporte à classificação multivariada do relevo. Na escala da bacia hidrográfica, o geoprocessamento com apoio do SR fornece informações a partir da geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), permitindo realizar inferências em diferentes âmbitos (COLIADO; SIMONETTI; SILVA, 2020; GAJBHIYE; MISHRA; PANDEY, 2014).

Estudos realizados por Borah e Deka (2020) utilizaram indicadores morfométricos para avaliar o grau de priorização quanto à conservação e gestão de recursos hídricos e terrestres baseados em aspectos lineares, morfométricos e de relevo de sub-bacias hidrográficas do rio Jamuna, na Índia, utilizando SIG como apoio na avaliação; enquanto os estudos de Gajbhiye, Mishra e Pandey (2014) analisaram as sub-bacias do rio Manot, no Distrito de Madhya Pradesh, mais propensas à erosão do solo e que podem contribuir no aporte de sedimentos utilizando índices morfométricos. Já os estudos de Coliado, Simonetti e Silva (2020) analisaram a morfometria da bacia hidrográfica do rio Pariquera-Açu no Baixo Ribeira de Iguape (SP), com vistas ao fornecimento de informações relacionadas aos padrões de drenagem e as classes de aptidão quanto ao potencial uso do solo da bacia.

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo analisar as correlações espaciais compartimentada dos padrões de drenagem com as características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim e identificar quais os compartimentos são mais vulneráveis à intervenção antrópica.

## 2. Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Sorocaba, interior do Estado de São Paulo, o qual apresenta uma extensão territorial de aproximadamente 450,382 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 687.357 habitantes (IBGE, 2020). O município pertence à Região Metropolitana de Sorocaba, que se destaca em âmbito nacional devido a intensa e diversificada atividade econômica, caracterizada pela produção industrial altamente desenvolvida (EMPLASA, 2019). A bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim se localiza a sudeste do município, com uma extensão aproximada de 55,35 km<sup>2</sup> (Figura 1), pertencendo à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 10 do Sorocaba e Médio Tietê.

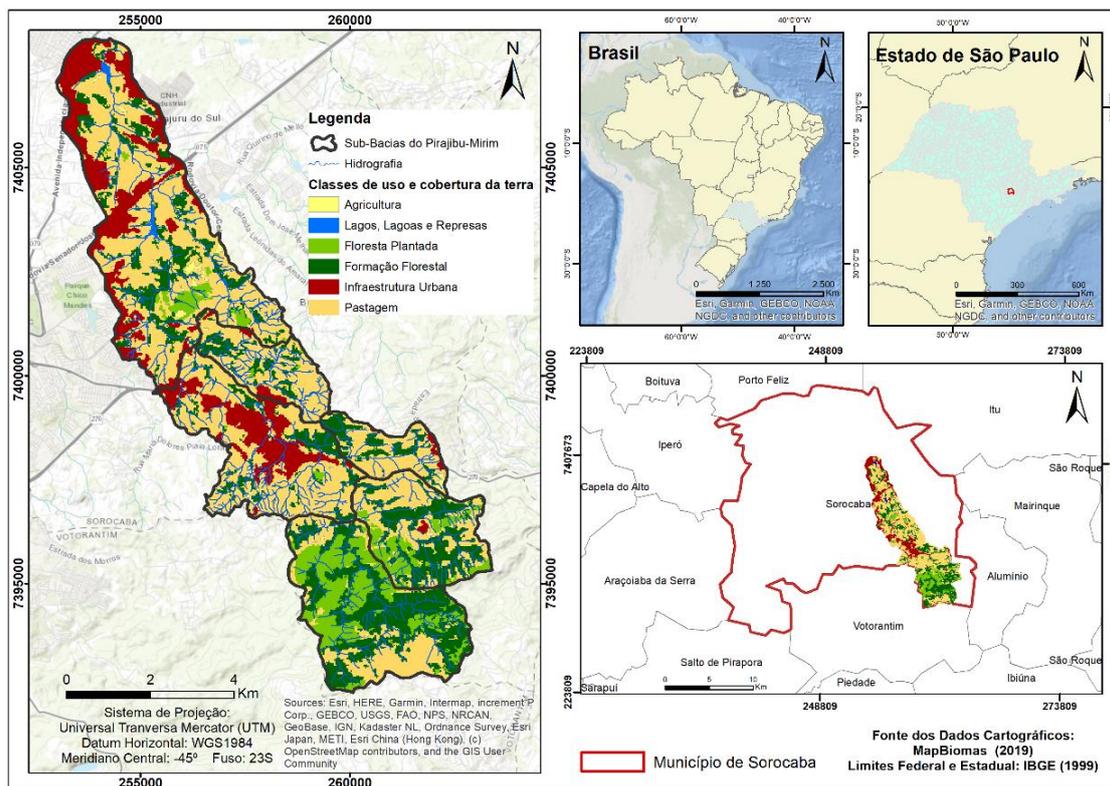


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, município de Sorocaba (SP).

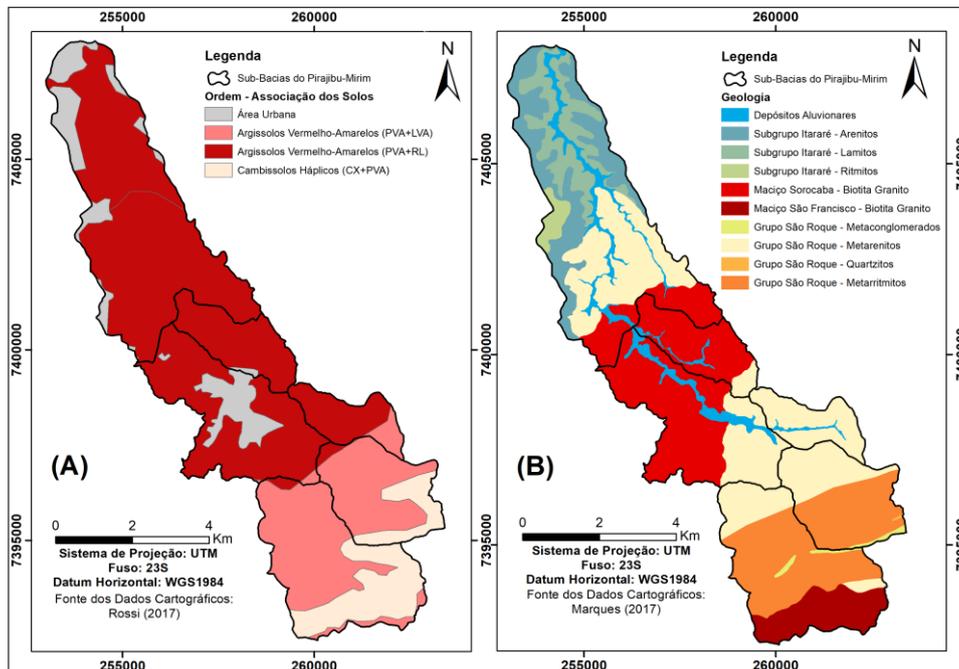
Quanto aos usos da terra, a bacia hidrográfica possui classes predominantes de pastagens distribuídas por toda a bacia, classes de cultivos agrícolas com pouca representatividade e infraestrutura urbana predominantes nas porções centrais e margem esquerda da bacia com sentido ao Norte. A formação florestal pertence a uma zona de tensão ecológica (ecótono), de domínio de Mata Atlântica, com Floresta Ombrófila Densa e Cerrado caracterizado por Savanas distribuídas em menores porções, com predominância ao Sul da bacia, onde há uma considerável fração de floresta plantada.

O clima predominante da região, segundo a classificação de Köppen é Cwa, com o clima caracterizado por chuvas no período do verão e invernos secos, e uma precipitação média anual de 1.311 mm (CORRÊA; TONELLO; FRANCO, 2016).

Segundo o Macrozoneamento Ambiental do município de Sorocaba, a bacia do Pirajibu-Mirim pertence à macrozona com grandes restrições à ocupação e macrozona de conservação ambiental devido suas várzeas planícies aluviais, possuindo base geológica cristalina. A bacia hidrográfica contempla a represa do Ferraz, que é um importante manancial de abastecimento de água, e que corresponde a cerca de 10% da captação superficial do município, com outorga para captação de até 900 m<sup>3</sup>/h durante 24 horas/dia (SAAE, 2016).

Os solos do trecho inferior e médio da bacia hidrográfica (Figura 2A) se caracterizam em Argissolos Vermelho-Amarelo com associação PVA+RL, sendo pouco profundo e raso e textura média; enquanto no trecho superior são encontrados Argissolos Vermelho-Amarelo (PVA+LVA), profundo e muito profundo, com textura argilosa, e

Cambissos Háplicos (CX+PVA), pouco profundo e profundo, textura média/argilosa. A geologia da bacia hidrográfica é apresentada na Figura 2 (B).



**Figura 2.** A) Ordem e associação dos solos presentes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. B) Geologia da bacia hidrográfica.

A geologia é caracterizada por uma significativa variação litológica, com rochas cristalinas Pré-cambrianas tanto metamórficas quanto magmáticas e metassedimentares no médio e trecho superior da bacia, as quais se alteram para rochas sedimentares do Cenozoico na região inferior, com ocorrência de sedimentos Quaternários aluvionares nos fundos de vales que vão do trecho médio do curso do rio Pirajibu-Mirim até a sua foz (MARQUES, 2017).

### 3. Materiais e Métodos

As bases de dados utilizadas na composição deste estudo foram apoiadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo processadas nos *softwares* ArcGis 10.5.1 (ESRI, 2016) e Google Earth Pro. Para tanto, foram utilizados arquivos digitais do Plano Diretor Ambiental da Prefeitura de Sorocaba em formato *shapefile* na escala 1:1.800 referentes à hidrografia e cotas altimétricas.

A análise da hierarquia fluvial foi definida de acordo com Strahler (1952), enquanto a definição das sub-bacias seguiu os critérios utilizados por Silva et al. (2016), que consistem na identificação da ordem do curso de água principal da bacia hidrográfica e, a partir desse critério, as sub-bacias são estabelecidas de acordo com o curso de água de ordem inferior ao curso de água principal. No caso das sub-bacias que apresentavam a mesma ordem do curso de água principal ou que possuíam uma confluência entre o curso de água principal e o curso de água com uma ordem imediatamente inferior, levou-se em consideração os seus divisores topográficos internos, desprezando os critérios hierárquicos fluviais.

O estudo englobou a análise geométrica da bacia hidrográfica, contemplando parâmetros dimensionais, como a área (A - km<sup>2</sup>) e perímetro (P - Km). Também foi analisado o comprimento do rio principal (C<sub>p</sub>) e o comprimento total da rede de drenagem (C<sub>d</sub>). Tais parâmetros ampararam a elaboração dos indicadores morfométricos.

O índice de circularidade (IC) avalia a forma da bacia hidrográfica, cujo valor se aproxima de 1 à medida que a bacia assume a forma circular e diminui à medida que a forma se alonga (Eq. 1).

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{1}$$

Sendo:

A é a área em km<sup>2</sup>;

P é o perímetro em Km.

O coeficiente de compacidade (Kc) relativiza o perímetro (P) de uma bacia hidrográfica à circunferência de um círculo cuja área (A) é igual ao da bacia. Assim, quanto mais próximo o valor do Kc se aproximar de 1, maior será a aproximação de um círculo, indicando maior suscetibilidade a enchentes (Eq. 2).

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

O fator de forma (Kf) é um índice que relaciona a largura média da bacia e o comprimento do seu eixo axial (L). Valores compreendidos ente 0,75 e 1 correspondem a alta propensão de grandes enchentes, enquanto valores abaixo de 0,50 indicam uma baixa propensão a enchente e maior indicativo de conservação (SILVA et al., 2016) (Eq. 3).

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

Sendo:

A é a área de drenagem da sub-bacia em km<sup>2</sup>;

L é o comprimento axial da sub-bacia hidrográfica correspondendo à distância do exutório ao ponto mais longínquo do divisor topográfico em km.

A densidade de drenagem (Dd) infere sobre a relação entre o comprimento total de rios (Lt) e a área, em km<sup>2</sup>, da bacia hidrográfica (A) (Eq. 4). De acordo com Sthraler (1952), as bacias podem ser classificadas como de baixa drenagem, até 5,0 km/km<sup>2</sup>; média (5,0 a 13,5 km/km<sup>2</sup>); alta (13,5 a 155,5 km/km<sup>2</sup>) e muito alta (acima de 155 km/km<sup>2</sup>).

$$Dd = \frac{Lt}{A_{sub}} \quad (4)$$

Sendo:

Lt é o comprimento total dos cursos de água fluviais da sub-bacia hidrográfica em km;

Asub é a área de drenagem das sub-bacias em km<sup>2</sup>.

O coeficiente de manutenção dos canais (Cm) proposto por Schumm (1956), refere-se ao inverso da densidade de drenagem (Dd), sendo uma constante cuja dimensão aumenta em termos de magnitude conforme a área de contribuição aumenta. Assim, esse coeficiente demonstra a área de drenagem (em km<sup>2</sup>) necessária para sustentar um quilômetro linear de canal (Eq. 5).

$$Cm = \frac{1}{Dd} \quad (5)$$

A extensão do percurso superficial da água de enxurrada (Eps) infere sobre a distância média que é percorrida pelas enxurradas antes de encontrar um canal permanente (CHRISTOFOLETTI, 1969) (Eq. 6).

$$Eps = 0,5 \times Dd \quad (6)$$

Sendo:

Eps é a extensão do percurso superficial da água de enxurrada (km);

Dd é a densidade de drenagem.

Quanto às características relacionadas ao relevo, foram determinadas a altitude; declividade; forma das vertentes (curvatura horizontal e vertical) e índice de concentração de rugosidade (ICR). O MDE da bacia hidrográfica foi gerado a partir da interpolação de 1.995 pontos cotados (pontos de elevação conhecidos e de maior acurácia) e das curvas de nível na escala 1:1.800. Após, foi elaborado o PI contendo a altimetria da bacia hidrográfica, com resolução espacial do *raster* de saída de 10 m x 10 m. Com o PI respectivo à altitude da bacia foi obtida a declividade.

A geometria das vertentes foi avaliada a partir do MDE. A inclinação da vertente afeta a taxa geral de movimento descendente, já a curvatura vertical afeta a aceleração e desaceleração do fluxo, influenciando nos processos de erosão e deposição, enquanto a forma da curvatura do plano horizontal influencia na convergência e divergência de fluxo (VALERIANO, 2003; VALERIANO; CARVALHO JÚNIOR, 2003). Assim, valores positivos (+) de curvatura horizontal indicam que a superfície é divergente, já valores negativos (-) indicam uma superfície convergente, enquanto valores nulos (0) indicam uma superfície plana. No entanto, estudos realizados por Valeriano (2003) e Valeriano e Carvalho Júnior (2003) relatam que valores nulos são raros na natureza, por essa razão, foram utilizados os limiares sugeridos pelos autores, sendo adotados os valores de -0,038 a 0,050 para

classificar a vertente como retilínea. As curvaturas em perfil vertical apresentam sinal positivo (+) para vertentes côncavas, negativos (-) para convexas e limiares entre -0,04 e 0,04 para retilíneas.

Como análise complementar das unidades de relevo foi realizada análise do índice de concentração de rugosidade (ICR), que utiliza o MDE e técnicas de geoprocessamento que possibilitam a inferência de unidades homogêneas do relevo a partir de padrões morfométricos de dissecação do relevo, se diferenciando do método pixel a pixel, pois possibilita analisar a recorrência espacial dos valores de declividade (SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014). A obtenção do ICR Local por sub-bacia se deu por meio da conversão dos valores de PI de declividade (%) do formato *raster* para um arquivo de pontos (vetorial), sendo então aplicado o estimador de Kernel com raio de 1 km<sup>2</sup>. Os valores obtidos foram discretizados em cinco classes utilizando-se os quantis, e os intervalos foram nomeados quanto ao índice de concentração de rugosidade (ICR), sendo: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto.

### 3.1 Análise multivariada dos atributos morfométricos das sub-bacias hidrográficas

A análise multivariada foi realizada por meio da análise de componentes principais buscando identificar diferentes padrões de drenagem entre as sub-bacias e que possam estar associados às suas características fisiográficas. Assim, a padronização dos dados foi realizada de acordo com a média e o desvio padrão (DP), eliminando o viés decorrente de diferentes escalas uma vez que são atribuídos os mesmos pesos para cada variável (SIMONETTI et al., 2019). Para tanto, foram utilizadas as variáveis: IC, Kc e Kf, Dd, Eps e Cm, além das variáveis Perímetro; Área; Altitude; Declividade (Decliv); Curvatura Horizontal (Curv\_Horizontal) e Curvatura Vertical (Curv\_Vertical).

Como análise complementar foi realizada a Análise de Conglomerados Hierárquicos (ACH), sendo o tipo mais comum de *clustering* hierárquico utilizado na aglutinação de dados com base em sua similaridade (BOURAMTANE et al., 2020). Neste estudo foi utilizado o método *Ward*, que proporciona agregados com o mesmo número de observações, agrupando as variáveis que apresentam a menor soma dos quadrados da distância euclidiana entre dois agrupamentos, sendo o resultado expresso por meio de um dendrograma.

## 4. Resultados e Discussão

De acordo com a metodologia utilizada, a área de estudo foi subdividida em seis sub-bacias, preservando os limites internos dos divisores topográficos e a análise hierárquica fluvial (Figura 3).

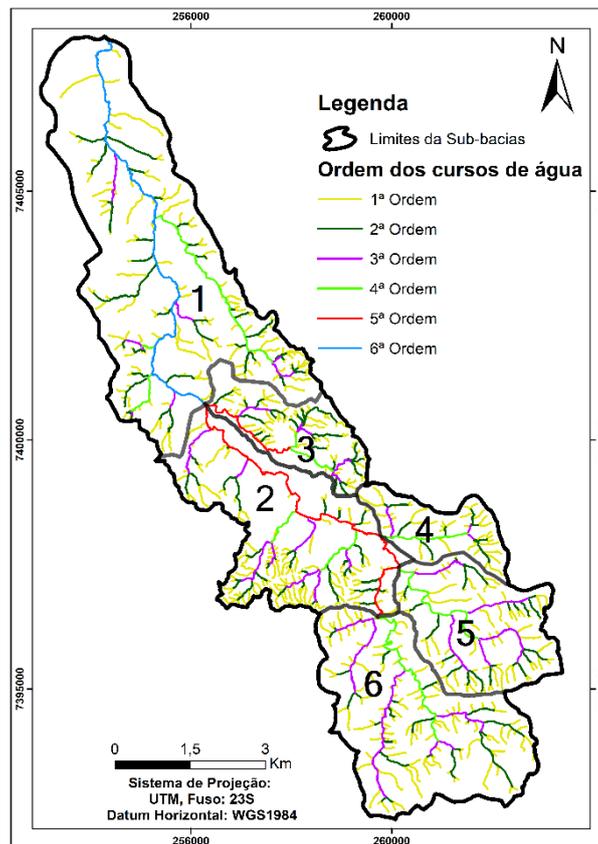


Figura 3. Análise hierárquica fluvial das sub-bacias hidrográficas.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados quantitativos por sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim.

Tabela 1. Dados quantitativos das sub-bacias hidrográficas.

| Sub-Bacias | Extensão (em km) por Ordem dos cursos de água |       |      |      |      |       | Área (km <sup>2</sup> ) | Perímetro (km) |
|------------|---|-------|------|------|------|-------|-------------------------|----------------|
|            | 1   | 2     | 3    | 4    | 5    | 6     |                         |                |
| 1          | 33,07   | 15,22 | 3,45 | 5,87 | 0,00 | 10,16 | 19,94                   | 26,24          |
| 2          | 25,96   | 9,36  | 6,16 | 2,20 | 8,20 | 0,00  | 10,39                   | 18,48          |
| 3          | 12,15   | 7,88  | 2,12 | 1,49 | 2,55 | 0,00  | 4,08                    | 10,51          |
| 4          | 9,20  | 3,05  | 1,02 | 1,83 | 0,00 | 0,00  | 2,97                    | 9,03           |
| 5          | 17,76   | 7,15  | 5,83 | 3,22 | 0,00 | 0,00  | 6,60                    | 11,19          |
| 6          | 28,87   | 8,05  | 7,62 | 4,15 | 0,00 | 0,00  | 11,38                   | 16,29          |

A sub-bacia 1 apresentou a maior extensão em todas as ordens hierárquicas fluviais analisadas, sendo a de 1ª ordem com o maior valor, com 33,07 km de extensão, seguido pelo rio de 2ª ordem, com 15,22 km e o rio de 6ª ordem, apresentou uma extensão de 10,16 km dentro da sub-bacia. A segunda maior extensão de rios de 1ª ordem foi a sub-bacia 6, com 28,87 km, enquanto a menor extensão foi encontrada para os rios de 4ª ordem (4,15 km). Dentre as sub-bacias analisadas, destaca-se a sub-bacia 4 como a de menor extensão em todas as ordens, sendo 9,20 km para rios de 1ª ordem, 3,05 para rios de 2ª ordem e 1,02 e 1,83 km para os rios de 3ª e 4ª ordem, respectivamente. É importante salientar que grande parte dos tributários de 1ª e 2ª ordem são efêmeros ou mesmo intermitentes, fato que também foi observado por Marques (2017). Tal característica é sugestiva de serem locais de nascentes e, por não possuírem tributários anteriores e apresentarem as menores extensões, estão mais sujeitos à sazonalidade e, conseqüentemente, não apresentam grandes volumes de água, principalmente nos períodos de estiagem.

Quanto aos tipos de drenagem, destaca-se a sub-bacia 1 por apresentar predominância do padrão subparalelo, com um grau médio de integração entre os canais e sinuosidade mista. A angularidade dos canais é média, tornando-se baixa próximo ao exutório da sub-bacia, com ângulos de junção preponderantemente obtusos. Também apresenta padrões de treliça, principalmente na porção Norte da bacia, com um curso de água marcante representado pelo rio Pirajibu-Mirim, e tributários em lados opostos dispostos em ângulos obtusos.

As sub-bacias 2 e 3, localizadas no curso médio e inseridas predominantemente no Maciço Sorocaba, apresentam um padrão subdendrítico com densidade média a alta, principalmente nas porções Sul e Oeste da sub-bacia 2, e em toda extensão da sub-bacia 3.

A sub-bacia 4 encontra-se inserida predominantemente nos Metarenitos, enquanto as sub-bacias do curso superior (5 e 6) apresentam-se em transição entre os grupos Metarenitos, Metarritmitos do Grupo São Roque e Biotita Granito do Maciço São Francisco.

De modo geral, as sub-bacias da cabeceira apresentam padrão de drenagem treliça, com destaque para a sub-bacia 5 que possui uma modificação, com aspectos de treliça recurvada que se difere do padrão básico pela presença de drenagem curva, enquanto a sub-bacia 6 apresenta modificação para o padrão subtreliça, que se difere do padrão básico apenas em relação ao grau de continuidade, nesse sentido, é possível identificar segmentos de curso de água com essas características na sub-bacia.

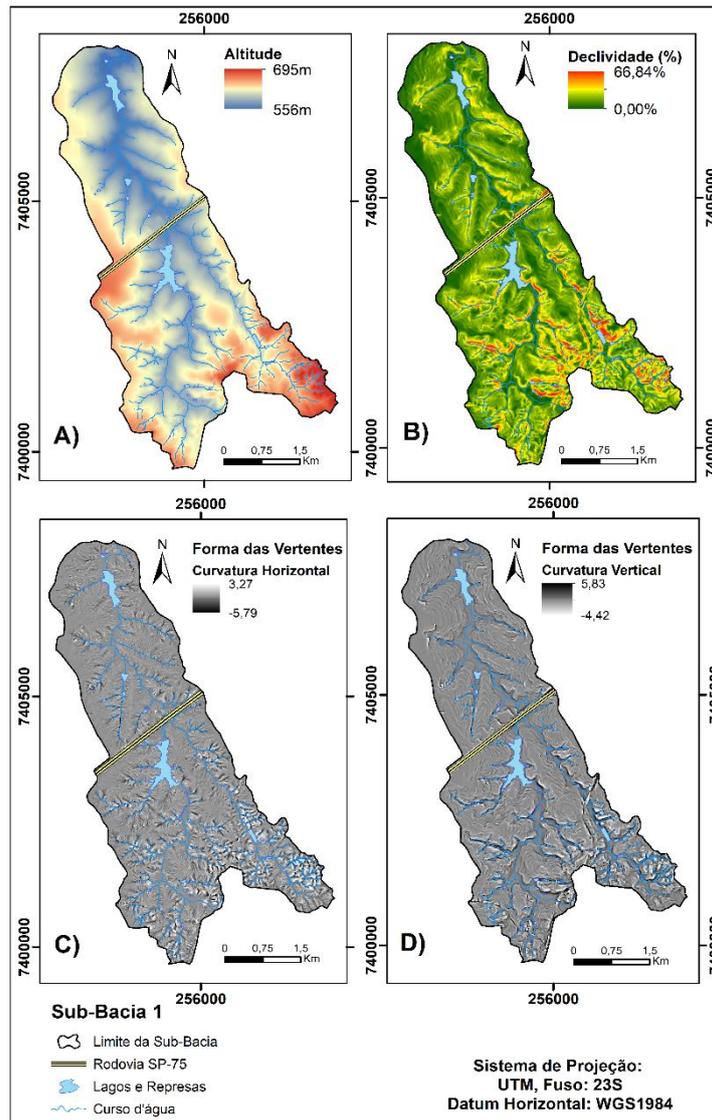
O padrão treliça é representativo de uma drenagem de direção dominante e outra tributária perpendicular a ela. Esse padrão ocorre principalmente quando o substrato rochoso se alterna entre rochas, o que pode ser verificado nos diferentes substratos presentes na sub-bacia, que apresenta uma transição do Grupo São Roque formado pelos Metarenitos (ao Sul da sub-bacia), enquanto na porção central apresenta-se o Subgrupo Itararé, com Arenitos, Lamitos e Ritmitos, e na calha do rio Pirajibu-Mirim predominam-se os Depósitos Aluvionares. De acordo com Baptista e Von Sperling (2007), a morfologia dos leitos e canais possui uma íntima relação com o substrato, sendo os rios aluviais aqueles localizados em planícies ou vales aluviais, formados por materiais sedimentares.

Resultados semelhantes foram encontrados por Marques (2017), destacando que o padrão treliça identificado na bacia se destaca na área dos metassedimentos do Grupo São Roque. De modo geral, a rede de drenagem não se apresenta uniforme, sendo que as sub-bacias possuem ordens hierárquicas distintas, onde os canais de primeira ordem possuem as mais significativas diferenças quanto à simetria, grau de integração, densidade, sinuosidade, angularidades, bem como ângulos de junção. De acordo com Silva et al. (2016), o estudo das diferentes ordens fluviais torna-se importante para a compreensão do efeito da variação da escala na aglutinação das informações.

Os resultados acerca dos atributos do relevo são apresentados de forma compartimentada, revelando os principais aspectos das sub-bacias. Os menores valores de declividade localizam-se ao Norte da bacia, no sentido da foz do rio Pirajibu-Mirim, onde são predominantes os sedimentos do Subgrupo Itararé, sendo possível verificar uma suave transição e aumento da declividade e altitude na intersecção com os Metarenitos do Grupo São Roque e no Maciço Sorocaba, nas porções centrais da bacia, ficando ainda mais expressiva à medida que se aproxima do Sul, à montante da bacia, nas áreas que tangenciam os Metarritmitos, Metaconglomerados, bem como o substrato granítico do Maciço São Francisco, sendo as maiores declividades (acima de 100%) predominantes nas bordas do Planalto, atingindo os valores máximos nos conjuntos de morros da Serra de São Francisco e Inhaíba.

No entanto, exceções são constatadas nas proximidades dos sedimentos Aluvionares, nas bordas dos cursos de água e nos fundos de vales, que obtiveram os menores valores de declividade e altitude, por compreenderem as regiões mais baixas da bacia.

Na Figura 4 (A) a altitude apresentou valores entre 556 m e 695 m, com amplitude de 139 m, e um valor médio de 605 m. A declividade (B) variou entre 0,00% e 66,84%, com valor médio de 11,24%.

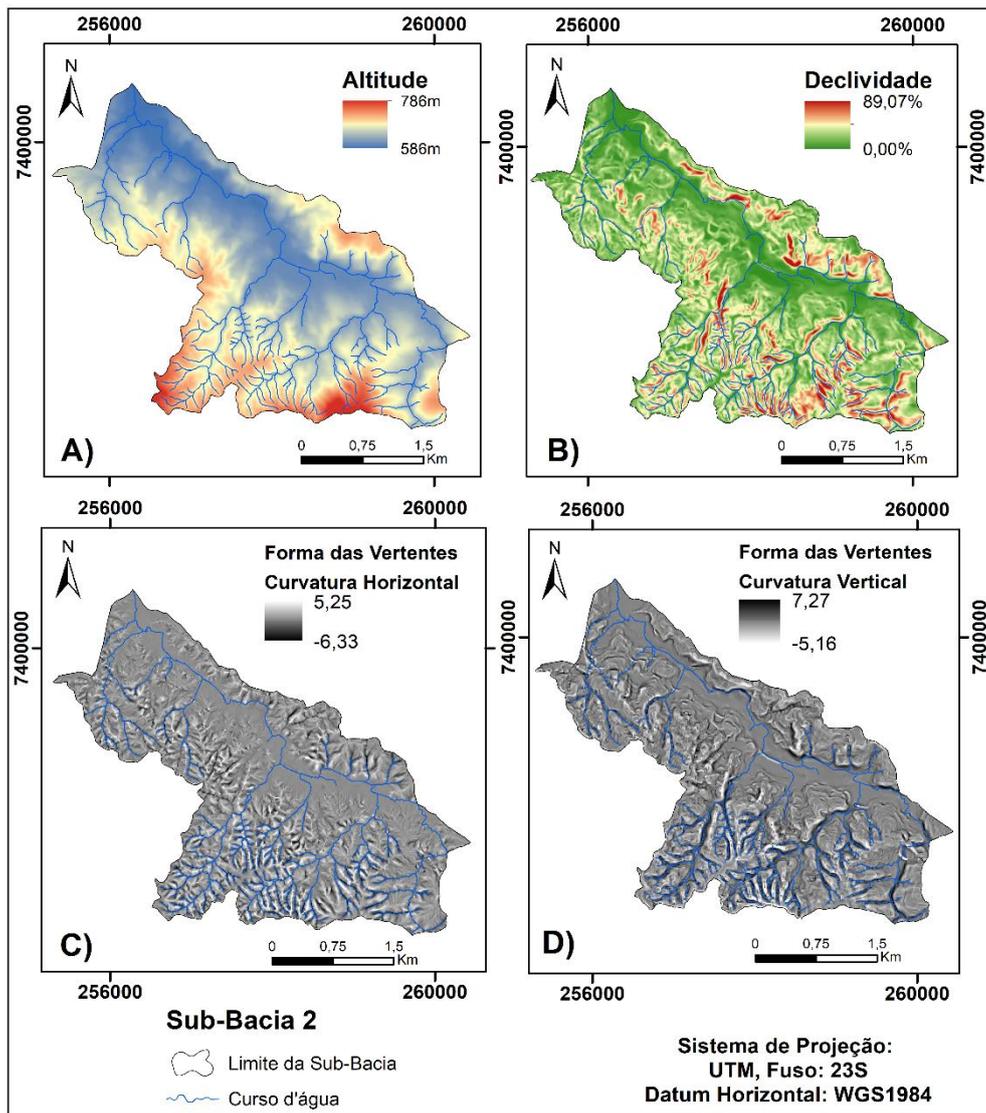


**Figura 4.** Dados espaciais do relevo da sub-bacia 1. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

Os valores da curvatura horizontal 4 (C) obtidos variaram entre -5,79 e 3,27, com desvio padrão (DP) de 0,35. As formas horizontais predominantes na sub-bacia foram divergentes, com uma área de 9,23 km<sup>2</sup>, convergentes, com 6,93 km<sup>2</sup> e retilíneas abrangendo 3,75 km<sup>2</sup>. As vertentes com curvaturas verticais (D) obtiveram valores entre -4,42 e 5,83, e DP de 0,42.

A vertentes convexas apresentaram a maior área, com 8,14 km<sup>2</sup>, enquanto as côncavas computaram 7,51 km<sup>2</sup>, e as retilíneas 4,26 km<sup>2</sup>.

Na Figura 5 são apresentados os resultados da sub-bacia 2.



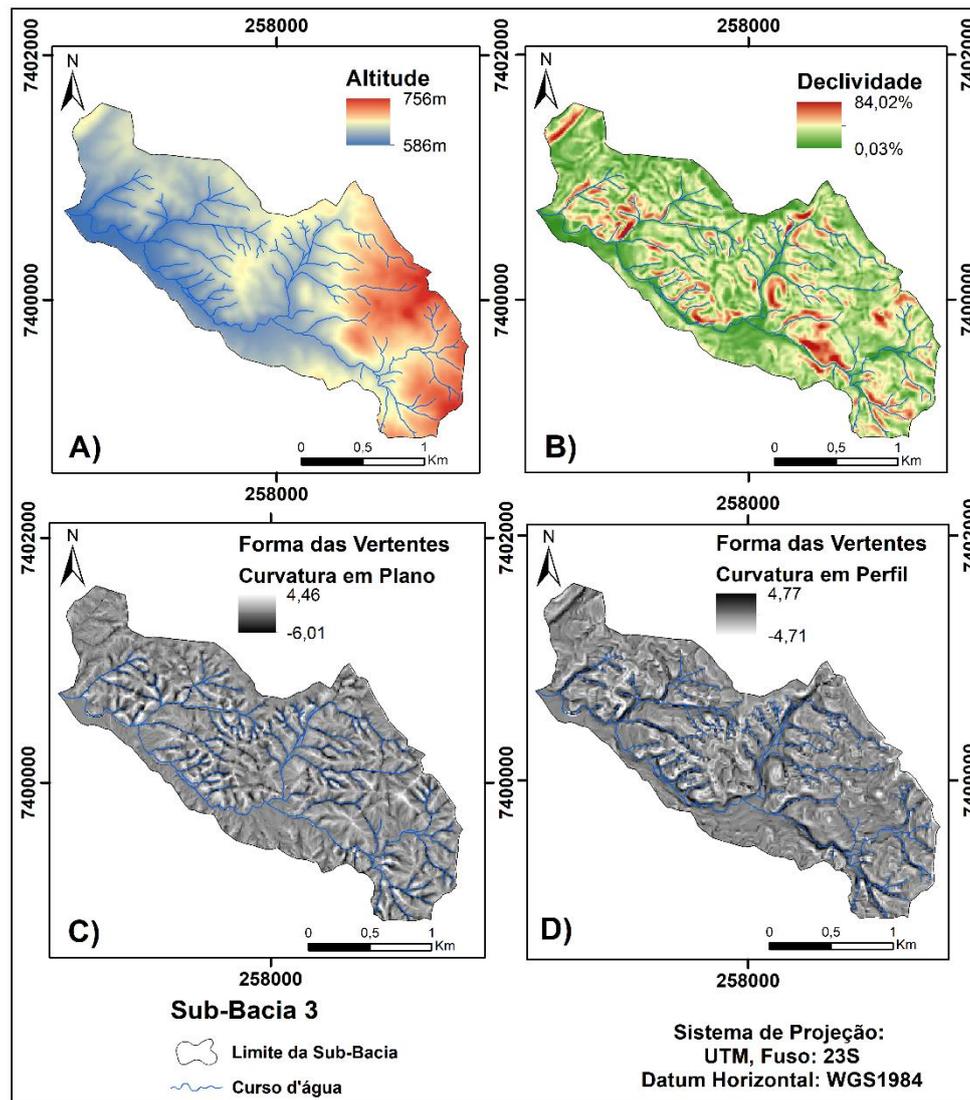
**Figura 5.** Dados espaciais do relevo da sub-bacia 2. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

A altitude da sub-bacia 2 (A) apresentou valores entre 586 m e 786 m, com valor médio de 647 m, e valores mais elevados nas porções Sul no sentido Noroeste da sub-bacia. A declividade compreendeu valores entre 0,00% e 89,07% (B), com valores elevados dispersos ao longo da sub-bacia, enquanto nas porções que compreendem o curso de água principal foram encontrados os menores valores de altitude e declividade.

A geometria das vertentes no plano horizontal apresentou um valor mínimo de -6,33 e máximo de 5,25, com um DP de 0,67, revelando que a sub-bacia possui vertentes horizontais (em plano) com predomínio de formas divergentes, com área equivalente a 5,10 km<sup>2</sup>, seguido por formas convergentes, com 4,27 km<sup>2</sup>; enquanto as formas retilíneas apresentaram uma área de 1,00 km<sup>2</sup>.

A curvatura vertical apresentou valores entre -5,16 e 7,27, com uma ligeira prevalência de vertentes côncavas, com área de 4,89 km<sup>2</sup>, em comparação às convexas, com 4,40 km<sup>2</sup>, enquanto as formas retilíneas corresponderam a 1,09 km<sup>2</sup>.

A Figura 6 ilustra os aspectos do relevo da sub-bacia 3.



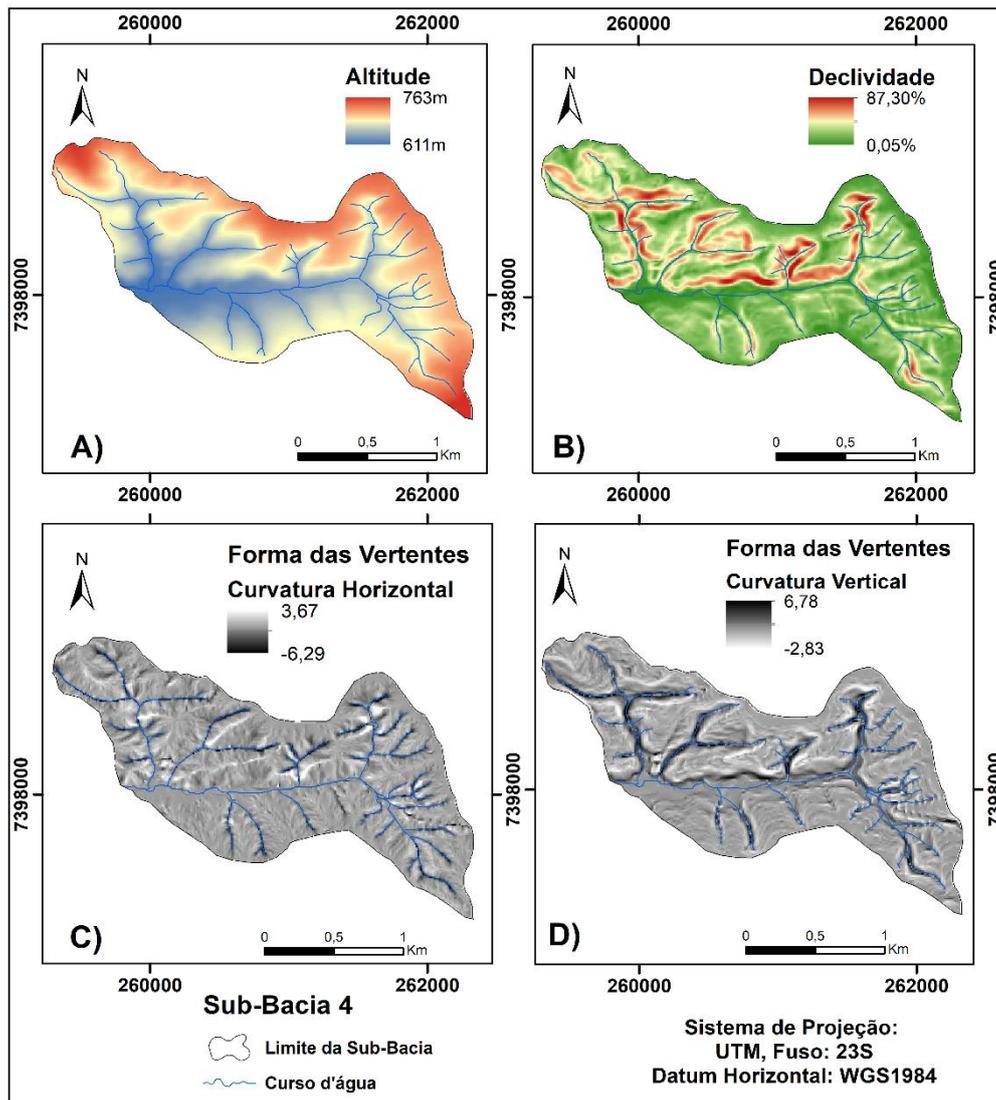
**Figura 6.** Dados espaciais do relevo da sub-bacia 3. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

A sub-bacia 3 apresentou valores de altitude (A) e declividade média (B) de 652 m e 20,38%, respectivamente. Os menores valores de ambas as variáveis foram encontrados na faixa que permeia o curso de água principal.

Os valores de curvatura horizontal (C) encontrados variaram entre -6,01 e 4,46, com um DP de 0,68. As formas predominantes foram divergentes, com 2,14 km<sup>2</sup>, enquanto as formas convergentes representaram 1,71 km<sup>2</sup>. A fração retilínea demonstrou os menores valores, com apenas 0,22 km<sup>2</sup>.

A curvatura vertical (D) apresentou valores mínimos de -4,71 e máximo de 4,77, com DP de 0,69. As formas côncavas predominaram, com 1,96 km<sup>2</sup>, enquanto as convexas apresentaram 1,83 km<sup>2</sup>, e as retilíneas apresentaram a menor porção, com 0,28 km<sup>2</sup>.

Na Figura 7 são apresentados os resultados da sub-bacia 4.



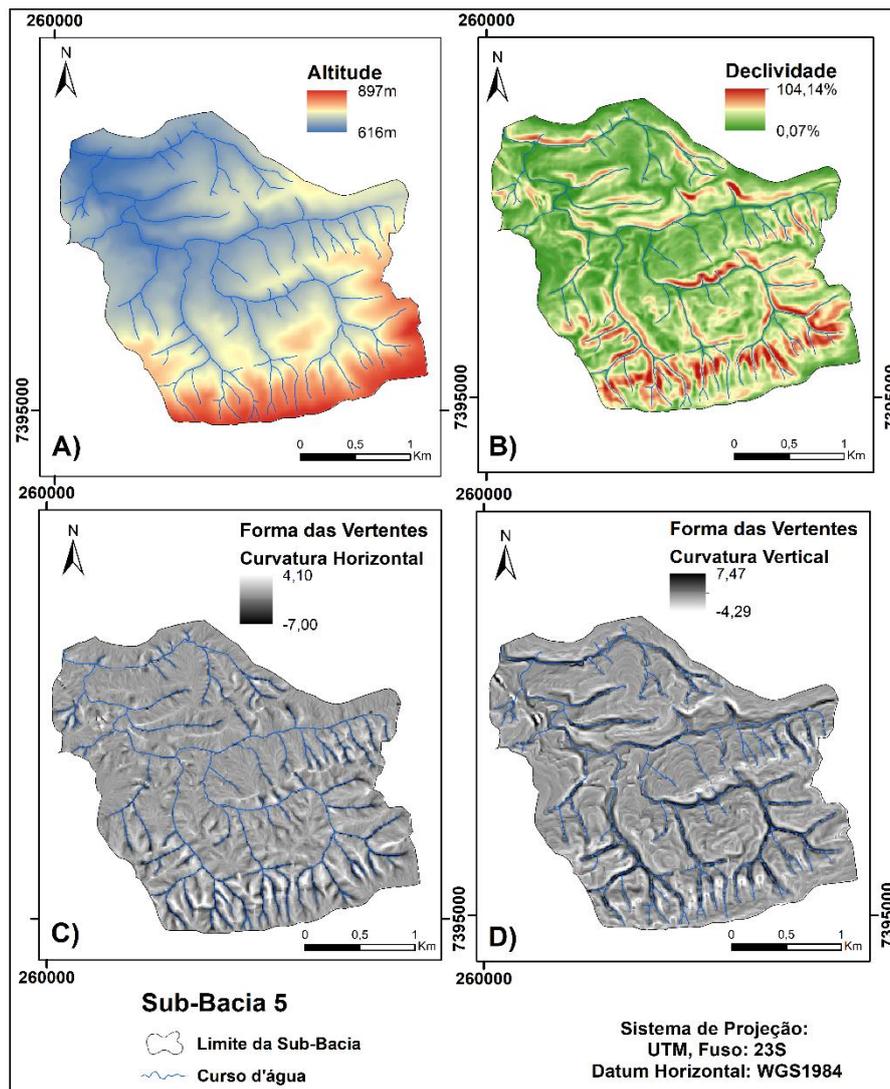
**Figura 7.** Dados espaciais do relevo da sub-bacia 4. A) Altitude. B) Declividade). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

A sub-bacia 4 obteve uma altitude média de 676 m (A), e declividade média de 22,78% (B), com valor mínimo de 0,05% e máximo de 87,27%.

A curvatura horizontal (C) obteve um valor mínimo de -6,29 e máximo de 3,67, e um DP de 0,57. As formas predominantes foram divergentes, com uma área de 1,59 km<sup>2</sup>, seguido das formas convergentes (1,12 km<sup>2</sup>). Já as porções retilíneas apresentaram uma área de 0,25 km<sup>2</sup>.

A curvatura em perfil (D) apresentou valor mínimo de -2,83 e máximo de 6,78, com DP igual a 0,70, com predomínio de vertentes convexas (1,63 km<sup>2</sup>), enquanto as côncavas computaram uma área de 1,09 km<sup>2</sup>, e as retilíneas 0,24 km<sup>2</sup>.

Na Figura 8 são apresentados os resultados da sub-bacia 5.

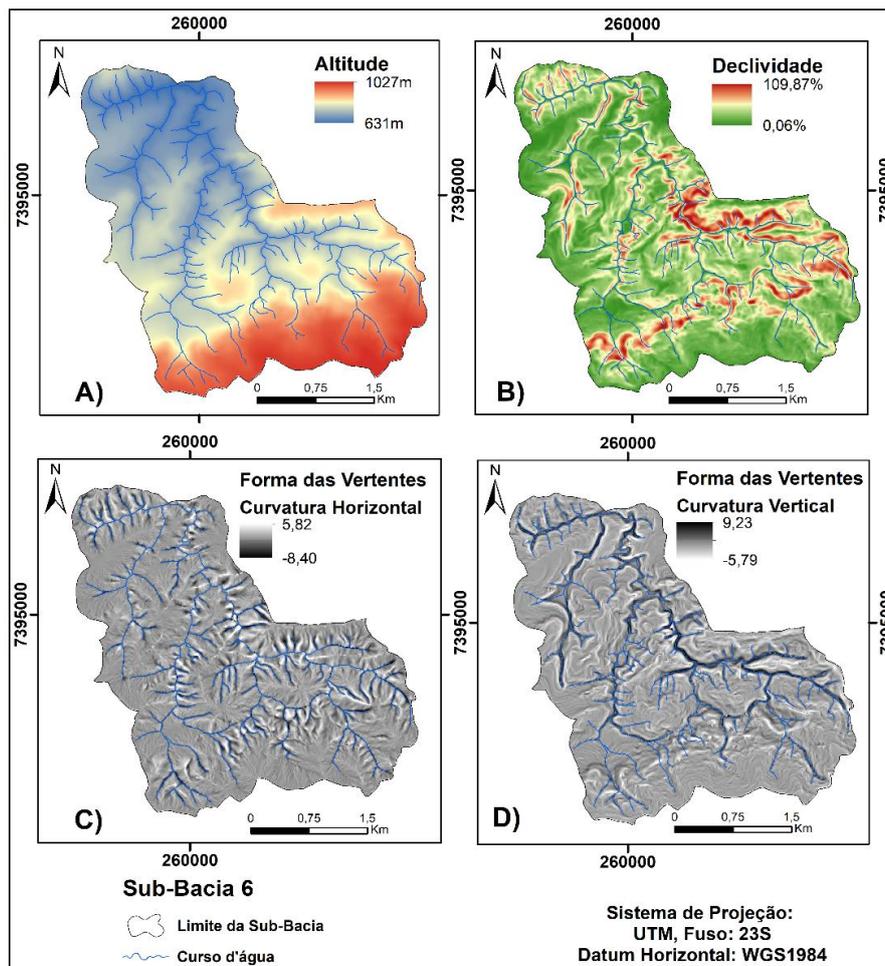


**Figura 8.** Dados espaciais do relevo da sub-bacia 5. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

A altitude média da sub-bacia 5 foi de 681 m, com valores menos expressivos na porção Oeste, no sentido do exutório da sub-bacia. Os valores de declividade variaram entre 0,07% e 104,14%, com um valor médio de 28,26%.

A curvatura horizontal variou entre -7,00 e 4,10, com um DP de 0,71, e predomínio de vertentes divergentes (3,62 km<sup>2</sup>), seguida pelas formas convergentes, com 2,57 km<sup>2</sup>, enquanto a forma retilínea apresentou uma área de 0,39 km<sup>2</sup>. Já a curvatura vertical demonstrou valor mínimo de -4,29 e máximo de 7,47, e um DP de 0,78, com vertentes convexas constituindo uma área de 3,50 km<sup>2</sup>, e côncavas com 2,67 km<sup>2</sup>.

Na Figura 9 são apresentados os resultados da sub-bacia 6.



**Figura 9.** Dados espaciais do relevo da sub-bacia 6. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

A porção Norte da sub-bacia 6 obteve os valores mais elevados de altitude (A), próximos a 1027 m na porção Sul, e declividade (B), com uma significativa faixa elevada ao Norte, variando entre 0,06 e 109,87%. A curvatura horizontal (C) variou entre -8,40 para as vertentes convergentes e 5,82 para as divergentes, com DP de 0,66. As formas divergentes apresentaram uma área de 6,03 km<sup>2</sup> e 4,48 km<sup>2</sup> para as convergentes, enquanto a área retilínea obteve uma extensão de 0,85 km<sup>2</sup>. A curvatura vertical (D) apresentou um valor mínimo de -5,79 para as formas convexas e máximo de 9,23 para as vertentes côncavas, com um DP de 0,75. A maior área correspondeu às vertentes convexas, com área equivalente a 5,85 km<sup>2</sup>, enquanto a área das vertentes côncavas totalizou 4,53 km<sup>2</sup>, e as retilíneas 0,98 km<sup>2</sup>.

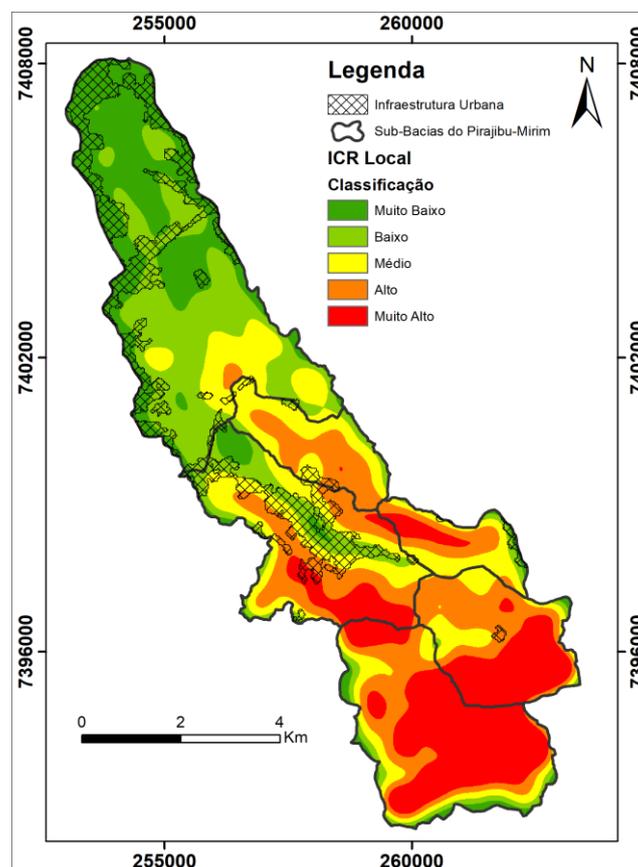
O conhecimento dos parâmetros relacionados à altitude é de extrema relevância, pois influencia no regime hídrico da bacia hidrográfica devido os processos de evapotranspiração que são interdependentes da radiação solar recebida (SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2019). A altitude também exerce uma influência direta no clima e na temperatura. De acordo com Rosenberg (1974), a cada 100 m de altitude ocorre uma diminuição adiabática de -1 °C na temperatura. Embora a área de estudo não apresente uma grande extensão, é possível verificar uma tênue diferenciação climática na bacia à medida que a altitude se eleva, principalmente nas regiões mais próximas do Maciço São Francisco (sub-bacias 5 e 6), que compreendem as Serras de São Francisco e Inhaíba, sendo constatada uma amplitude altimétrica de 475 m para a bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

Quanto aos parâmetros de declividade, são importantes para auxiliar na gestão e planejamento de bacias hidrográficas, pois estão diretamente associados ao tempo de duração do escoamento superficial e de concentração da precipitação nos leitos dos cursos de água (SABINO et al., 2020). Segundo Silva et al. (2016), a relação entre a declividade com a morfologia da bacia é um dos fatores que condicionam os usos do solo, a capacidade de infiltração da água, bem como o escoamento superficial, sendo importantes para a definição de áreas protegidas

por lei. Silva et al. (2020) relatam que relevos acentuados são impróprios para a ocupação urbana e agricultura, enquanto Coliado, Simonetti e Silva (2020), salientam que a declividade influi na relação entre a precipitação em uma bacia hidrográfica e o deflúvio, pois o aumento da velocidade do escoamento superficial reduz a infiltração da água no solo. Nesse sentido, a presente bacia hidrográfica não possui uma extensão significativa de áreas agrícolas, conforme demonstrado na Figura 1, no entanto, possui classe predominante de pastagens, carecendo de atenção especial quanto aos possíveis impactos negativos provenientes da degradação do solo e erosão. Dentre as sub-bacias analisadas, os maiores percentuais de declividade foram encontrados para as sub-bacias 5 e 6, o que confere uma atenção especial quanto ao potencial erosivo que apresentam.

A compartimentação pormenorizada do relevo evidenciou que a concavidade das vertentes está associada à rede de drenagem. Já a curvatura horizontal evidenciou um relevo bastante movimentado, com as menores porções representadas pelas classes retilíneas; portanto, essas características se compatibilizam com os resultados do relevo relacionados à declividade e altitude observados no estudo, sendo mais acentuados nas sub-bacias 5 e 6, enquanto a sub-bacia 1 apresenta um relevo mais plano e maiores porções retilíneas, e às demais sub-bacias (sub-bacia 2, 3 e 4) sofrem influências de transição à montante e jusante. De acordo com Valeriano e Carvalho Júnior (2003), a convexidade do relevo consiste em atributo importante no que concerne a distinção de sítios geomorfológicos, estando associado aos processos de pedogênese e balanço hídrico.

A análise do ICR Local permitiu a identificação de feições morfológicas locais do relevo por compartimento da bacia hidrográfica (Figura 10).



**Figura 10.** Espacialização do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR).

O ICR revelou que a bacia hidrográfica apresenta classes relativamente homogêneas distribuídas espacialmente, sendo o ICR classificado como Muito Baixo o de menor valor obtido para a bacia, com uma área de 10,40 km<sup>2</sup>, representando um percentual de 18,79%, enquanto a classe classificada com ICR Baixo obteve uma área de 11,26 km<sup>2</sup>, com um percentual de 21,14%. As classificações Média, Alto e Muito Alto somaram 11,01 km<sup>2</sup> (19,90%); 11,26 km<sup>2</sup> (20,34%) e 10,97 (19,82%), respectivamente. A compartimentação do ICR por sub-bacia é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Índice de Concentração de Rugosidade Local por sub-bacias hidrográficas.

| Sub-Bacias | Classificação | Área (km <sup>2</sup> ) | %     | Sub-Bacias | Classificação | Área (km <sup>2</sup> ) | %     |
|------------|---------------|-------------------------|-------|------------|---------------|-------------------------|-------|
| 1          | Muito Baixo   | 9,01                    | 45,23 | 4          | Muito Baixo   | 0,10                    | 3,37  |
|            | Baixo         | 8,26                    | 41,47 |            | Baixo         | 0,23                    | 7,75  |
|            | Médio         | 2,50                    | 12,54 |            | Médio         | 1,17                    | 39,39 |
|            | Alto          | 0,15                    | 0,76  |            | Alto          | 0,98                    | 33,04 |
|            | Muito Alto    | 0,00                    | 0,00  |            | Muito Alto    | 0,49                    | 16,46 |
| 2          | Muito Baixo   | 0,72                    | 6,91  | 5          | Muito Baixo   | 0,04                    | 0,56  |
|            | Baixo         | 2,10                    | 20,26 |            | Baixo         | 0,08                    | 1,26  |
|            | Médio         | 3,04                    | 29,24 |            | Médio         | 1,08                    | 16,31 |
|            | Alto          | 3,07                    | 29,61 |            | Alto          | 2,56                    | 38,76 |
|            | Muito Alto    | 1,45                    | 13,98 |            | Muito Alto    | 2,84                    | 43,10 |
| 3          | Muito Baixo   | 0,03                    | 0,77  | 6          | Muito Baixo   | 0,48                    | 4,20  |
|            | Baixo         | 0,31                    | 7,70  |            | Baixo         | 0,70                    | 6,18  |
|            | Médio         | 1,84                    | 45,06 |            | Médio         | 1,39                    | 12,25 |
|            | Alto          | 1,89                    | 46,36 |            | Alto          | 2,61                    | 22,95 |
|            | Muito Alto    | 0,00                    | 0,11  |            | Muito Alto    | 6,19                    | 54,41 |

Observa-se uma predominância do ICR Muito Baixo e Baixo na sub-bacia 1, totalizando 86,7%. Esses valores são justificáveis por se tratar de uma sub-bacia situada no curso inferior da bacia do Pirajibu-Mirim, onde também foram encontrados os menores valores de altitude e declividade.

Na sub-bacia 2, os valores mais expressivos foram relacionados ao ICR Baixo, Médio e Alto, que totalizaram 79,11%, enquanto os menores valores de ICR foi para a categoria Muito Baixo, com 6,91%.

A sub-bacia 3 deteve 91,42% das classes de ICR nas categorias Médio e Alto, enquanto as categorias Muito Baixo e Baixo computaram 8,47%, e Muito Alto obteve apenas 0,11%. A sub-bacia 4 acumulou 72,43% do ICR nas classes Médio e Alto, e percentual de 11,12% para as categorias Muito Baixo e Baixo, enquanto Muito Alto obteve 16,46%.

Os resultados da sub-bacia 5 totalizaram 81,86% para as categorias Alto e Muito Alto, enquanto o Médio obteve 16,31% e Muito Baixo e Baixo totalizaram apenas 1,82%. Já a sub-bacia 6 totalizou 77,36% das classes Alto e Muito Alto, 12,25% da classe Médio e 10,38% dos valores Muito Baixo e Baixo.

De modo geral, o ICR evidenciou as unidades homogêneas do relevo nas sub-bacias do Pirajibu-Mirim, mostrando ser uma ferramenta eficaz, podendo auxiliar na gestão de bacias hidrográficas, uma vez que possibilita a identificação de feições morfológicas locais que, somadas as variáveis físicas da bacia, permitem identificar as áreas mais suscetíveis quanto ao potencial erosivo. Paralelo a isso, o índice de concentração do relevo, aliado às características morfométricas, permitem a previsão de áreas propensas à inundação, enchentes e alagamentos, englobando também o monitoramento de áreas suscetíveis às corridas e deslizamento de massa.

Os índices morfométricos avaliados neste estudo foram dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas.

| Sub-Bacias<br>Hidrográficas | Índices de Forma |      |      | Índices Lineares            |             |                             |
|-----------------------------|------------------|------|------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
|                             | IC               | Kc   | Kf   | Dd<br>(km/km <sup>2</sup> ) | Eps<br>(km) | Cm<br>(km/km <sup>2</sup> ) |
| 1                           | 0,36             | 1,64 | 0,34 | 3,40                        | 1,70        | 0,29                        |
| 2                           | 0,38             | 1,61 | 0,40 | 5,00                        | 2,50        | 0,20                        |
| 3                           | 0,46             | 1,46 | 0,33 | 6,42                        | 3,21        | 0,16                        |
| 4                           | 0,45             | 1,47 | 0,45 | 5,08                        | 2,54        | 0,20                        |
| 5                           | 0,66             | 1,22 | 0,44 | 5,15                        | 2,57        | 0,19                        |
| 6                           | 0,54             | 1,35 | 0,56 | 4,28                        | 2,14        | 0,23                        |

O IC das sub-bacias variou entre 0,36 e 0,66, com uma amplitude de 0,30, sendo a sub-bacia 1 a que apresentou o menor valor, seguida pela sub-bacia 2, com IC igual a 0,38, possuindo o formato mais alongado dentre as sub-bacias analisadas. O maior valor obtido foi para a sub-bacia 6, e sub-bacia 5 (0,54). O IC é um importante atributo morfométrico, pois permite inferir sobre a propensão de enchentes (SILVA et al., 2016). Nesse sentido, as sub-bacias com maiores propensões a enchentes, se consideradas somente as suas características físicas são as sub-bacias 5 e 6. As enchentes podem ocorrer nos exutórios dessas sub-bacias, sendo as áreas com maiores concentrações do fluxo ocasionado pelo escoamento superficial.

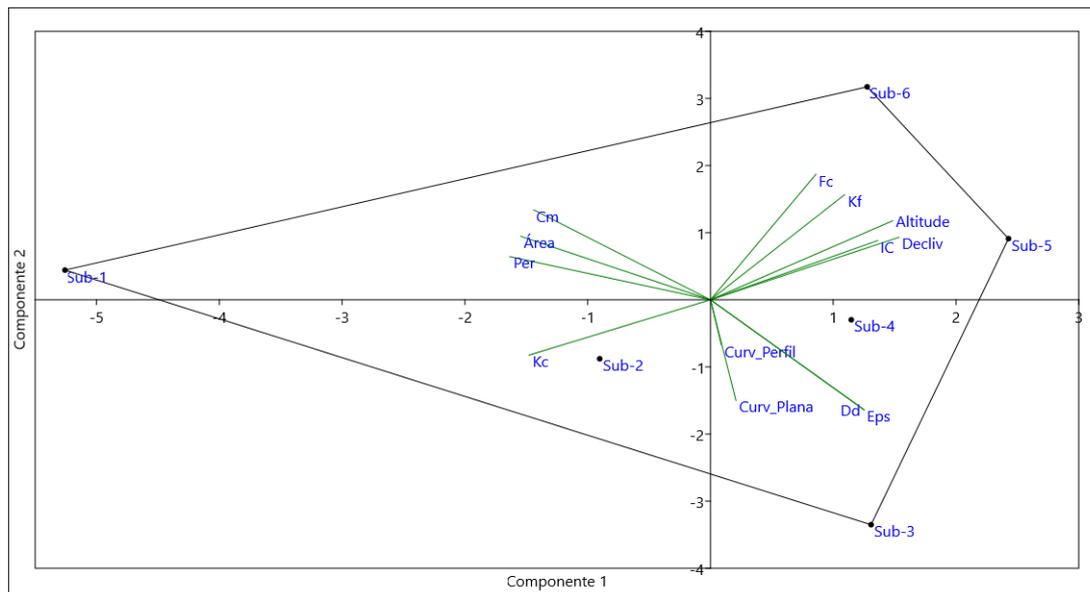
A Dd apresentou valor mínimo de 3,40 km/km<sup>2</sup>, sendo a sub-bacia 1 com a menor densidade de drenagem, enquanto o valor máximo encontrado foi de 6,42 km/km<sup>2</sup> para a sub-bacia 3. Portanto, todas as sub-bacias são excepcionalmente bem drenadas. De acordo com Silva et al. (2016), quanto maior o valor de Dd maior a necessidade da conservação das matas ripárias para a manutenção dos cursos de água.

O Kc das sub-bacias variou entre 1,22 e 1,64, sendo os menores valores encontrados para as sub-bacias 5 e 6, com 1,22 e 1,35 respectivamente. Já as sub-bacias 4, 2 e 1 apresentaram os valores mais elevados, com 1,47, 1,60 e 1,64, respectivamente.

As sub-bacias apresentaram valores de Kf entre 0,33 e 0,56. As sub-bacias 6 e 4 apresentaram os valores mais elevados, com 0,56 e 0,45; enquanto as sub-bacias 3, 1 e 2 apresentaram os menores valores, sendo 0,33, 0,34 e 0,40, respectivamente. Já a sub-bacia 5 apresentou Kf igual a 0,41. Portanto, de acordo com classificação de Silva et al. (2016) quanto à propensão de enchentes, as sub-bacias possuem baixa propensão, uma vez que todas apresentaram valores abaixo de 0,75.

O Cm apresentou o valor mínimo de 0,16 km/km<sup>2</sup> para sub-bacia 3 e o valor máximo de 0,29 km/km<sup>2</sup> para a sub-bacia 1. As sub-bacias que necessitam de menor área para manutenção dos canais, além da sub-bacia 3, são a 5, 4 e 2, com valores de 0,19 e 0,20 km/km<sup>2</sup>. Já as sub-bacias que necessitam de maiores áreas são 1 e 6, com Cm de 0,29 e 0,23 km/km<sup>2</sup>.

De modo a estabelecer possíveis relações entre os padrões de drenagem observados nas sub-bacias e os atributos do relevo foi realizada a ACP. A componente 1 explicou 52,67% das correlações, enquanto a componente 2 explicou 26,68%. Na Figura 11 são ilustradas as correlações obtidas.



**Figura 11.** Análise de componentes principais (ACP) por sub-bacias.

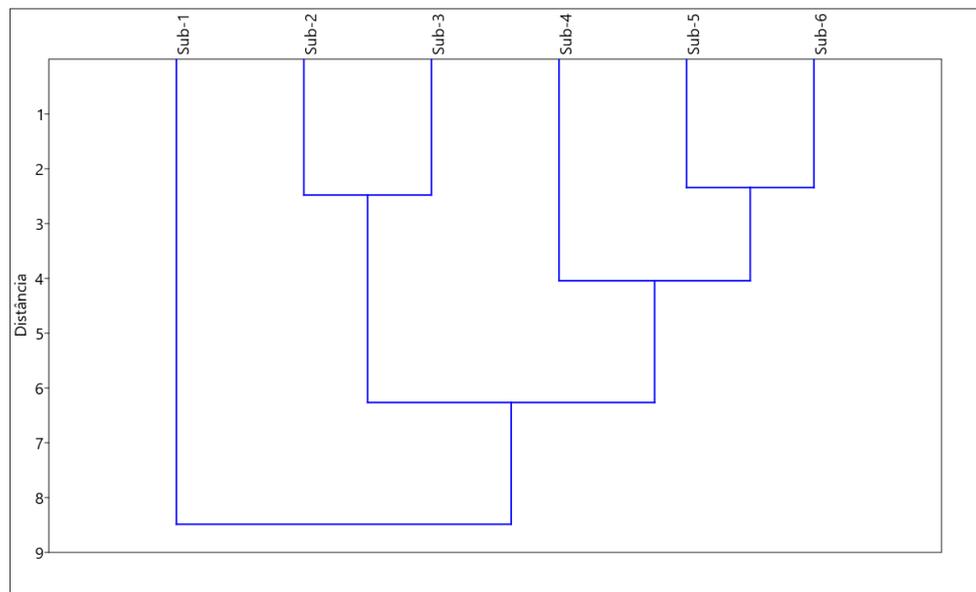
A sub-bacia 1 apresentou uma expressiva diferenciação das demais sub-bacias, com correlação negativa quanto às características relacionadas a área, com coeficiente de  $-0,90$ , perímetro ( $-0,94$ ) e  $C_m$  de  $-0,86$ . O resultado é justificado em razão da sub-bacia apresentar as maiores dimensões em comparação com as demais. Nesse sentido, observa-se que as respectivas variáveis exercem maiores influências nas sub-bacias com menores dimensões. Esse fato também foi observado nos estudos de Bouramtane et al. (2020), que analisaram 230 bacias hidrográficas e parâmetros que refletissem a topografia, morfologia e geologia locais. A Sub-1 possui um padrão de drenagem e relevo que se diferencia das demais, pois possui as menores altitudes, declividades, além de possui o ICR predominantemente muito baixo e baixo. Essas características do relevo influenciam na velocidade do escoamento, que tende a ser mais baixo nessas regiões.

A sub-bacia 2 apresentou forte correlação negativa com o  $K_c$ , com coeficiente de correlação de  $-0,78$ , que pode ser explicado devido a sua forma bastante irregular. Essa sub-bacia possui características de transição, com um relevo mais acentuado com elevadas altitudes e declividades nas porções Leste e Sul. A sub-bacia 2 está completamente inserida no Maciço Sorocaba.

As sub-bacias 3 e 4 apresentam correlações inversas mais expressivas na componente 2 em relação a variável curvatura horizontal ( $Curv\_Horizontal$ ), com o coeficiente de  $-0,62$ , e curvatura vertical ( $Curv\_Vertical$ ), com  $-0,27$ . Portanto, essas sub-bacias se diferem das demais quanto às formas das vertentes. A  $D_d$  e  $Eps$  obtiveram uma forte correlação para a componente 1, com  $0,78$ . Os escores das sub-bacias foram  $1,65$  e  $1,01$ , respectivamente. As sub-bacias 3 e 4 se localizam a Oeste, e possuem as menores áreas, porém possuem uma elevada altitude nas porções que correspondem aos limites a Oeste da bacia. De acordo com Bouramtane et al. (2020), a inclinação da superfície e a resistência das rochas determinam os padrões de drenagem.

As sub-bacias 5 e 6 estão inseridas nas áreas mais elevadas do Pirajibu-Mirim, sendo fortemente influenciadas pela altitude e declividade. Ambas estão inseridas no Maciço São Francisco (Biotita granito), com intersecção de Metarenitos, Metarritmitos e Metaconglomerados do Grupo São Roque. Ainda, estas sub-bacias apresentaram uma forte influência das variáveis de forma, como o  $F_c$ ,  $K_f$  e  $IC$ , pelo fato de apresentarem formas similares que se assemelham a um círculo. Esses fatores, associados ao relevo, inferem sobre a suscetibilidade destas quanto a ocorrência de processos erosivos, pois quanto maior a declividade da área, maior será a energia e velocidade do deflúvio superficial (SILVA et al., 2016). Também é importante considerar os aspectos relacionados aos usos da terra, assim como as transformações decorrentes da urbanização, tais como o desmatamento de áreas vulneráveis e a impermeabilização dos topos e vertentes das colinas, além da canalização de cursos de água, fatores que podem agravar a vulnerabilidade ambiental dessas áreas.

Para apoiar a hipótese de que as sub-bacias do Pirajibu-Mirim se diferenciam em relação aos padrões de drenagem foi realizada a análise *cluster* (Figura 12).



**Figura 12.** Dendrograma dos parâmetros do relevo pelo *Ward's Method* e quadrado da distância Euclidiana.

A sub-bacia 1 apresenta a maior distinção dentre as demais sub-bacias, representada na análise pela maior distância. A análise também mostrou que as sub-bacias 2 e 3 possuem semelhanças, enquanto a sub-bacia 4 se difere ligeiramente, tendendo a um agrupamento mais próximo das sub-bacias 5 e 6.

A ACP, assim como análise de clusters, forneceram evidências de que as sub-bacias apresentam diferentes padrões quanto à drenagem, sendo estes influenciados, principalmente, pelos aspectos físicos relacionados à morfometria e relevo. Todavia, a metodologia adotada no estudo apoiada em SIG mostrou-se adequada para o tratamento do conjunto de informações físicas das sub-bacias, contribuindo com os estudos acerca de bacias hidrográficas.

Soares et al. (2018) utilizaram variáveis fisiográficas que foram confrontadas com os dados de vazão com o objetivo de conhecer as variáveis principais e determinantes no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Ivaí (PR). Enquanto Bouramtane et al. (2020) utilizaram uma abordagem estatística para avaliar os fatores que controlam padrões de redes de drenagem em áreas áridas de Marrocos, que também incluíram a ACP e Análise de Clusters. De acordo com os autores, a ACP mostrou que os parâmetros topográficos, de inclinação e geológicos, ou seja, o parâmetro associado ao controle estrutural explica melhor a variação no padrão de drenagem, sendo estes os parâmetros utilizados para embasamento do presente estudo.

## 5. Conclusões

O índice de concentração de rugosidade auxiliou na identificação de feições morfológicas locais do relevo de acordo com a compartimentação das sub-bacias, mostrando ser um índice adequado quando utilizado em conjuntos com outras variáveis na inferência de padrões entre sub-bacias de mesma abrangência.

Os índices morfométricos obtidos permitiram identificar alguns padrões de drenagem de acordo com a compartimentação da bacia, que foram corroborados pela ACP, que explicou 77,5% das correlações entre as características do relevo e padrões de drenagem. O estudo da morfometria de bacias hidrográficas, apoiado no conhecimento de padrões de drenagem e nas características físicas da área pode fornecer informações importantes que subsidiem a gestão de áreas prioritárias a serem conservadas em bacias hidrográficas, uma vez que a interferência antrópica pode impactar significativamente no comportamento hidrológico.

Sendo assim, a partir do estudo foi possível obter conhecimento sobre os compartimentos da bacia hidrográfica do Pirajibu-Mirim que necessitam de atenção quanto às ações de gestão e manejo devido às suas características físicas intrínsecas, como às sub-bacias 5 e 6, que apresentaram altitudes e declividades mais elevadas, vertentes com predominância côncavas/convexas e índice de concentração de rugosidade do relevo predominantemente classificado como muito alto, demonstrando um relevo bastante movimentado. Somado a

isso, estes compartimentos apresentaram os resultados mais favoráveis a enchentes e alagamentos demonstrados pelos índices morfométricos.

Todavia, esses compartimentos não devem ser apropriados de forma desordenada, pois a ocupação pode alterar o modelado da paisagem, ocasionando reflexos na qualidade ambiental que podem ser refletidos no arraste de sedimentos e assoreamento de corpos hídricos, alagamentos e inundação de áreas suscetíveis como as evidenciadas neste estudo.

**Contribuições dos Autores:** Vanessa Cezar Simonetti - Concepção; metodologia; elaboração das figuras e redação do artigo. Darllan Collins da Cunha e Silva – Concepção; metodologia; curadoria de dados; revisão e edição do texto; André Henrique Rosa: Supervisão e orientação. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem aos revisores anônimos pelas valiosas sugestões, que muito contribuíram para a melhoria do manuscrito.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse.

## Referências

1. BAPTISTA, M. B.; VON SPERLING, M. Morfologia fluvial. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água em Rios**. Editora UFMG Horizonte, 2007. 588p.
2. BORAH, H.; DEKA, S. Morphometric Analysis for Prioritization of Sub-Watersheds of Jamuna River Watershed, Assam, India Using Remote Sensing and GIS Technique. **International Journal of Control and Automation**, v. 13, n. 2s, p. 18-26, 2020.
3. BOURAMTANE, T. et al. Statistical approach of factors controlling drainage network patterns in arid areas. Application to the Eastern Anti Atlas (Morocco). **Journal of African Earth Sciences**, v. 162, p. 103707, 2020. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103707
4. CARVALHO, T. M.; LATRUBESSE, E. M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5, n. 1, 2004. DOI: 10.20502/rbg.v5i1.34
5. CERRI, R. I.; REIS, F. A. G. V.; GRAMANI, M. F.; GABELINI, B. M.; ZAINÉ, J. E.; SISTO, F. P.; CARMO GIORDANO, L. Análise da influência de atributos fisiográficos e morfométricos na definição da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa. **Geologia USP**, v. 18, n. 1, p. 35-50, 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-133737
6. CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.
7. COLIADO, P. H. S.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Avaliação das características físicas da bacia hidrográfica do Rio Pariquera-Açu no Baixo Ribeira De Iguape (SP). **Holos Environment**, v. 20, n. 3, p. 320-334, 2020. DOI: 10.14295/holos.v20i3.12386
8. CORRÊA, C. J. P.; TONELLO, K. C.; FRANCO, F. S. Análise hidroambiental da microbacia do Pirajibu-Mirim, Sorocaba, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 4, p. 943-953, 2016. DOI: 10.4136/ambi-agua.1969
9. EMPLASA. Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo S.A, 2016. **Padrões Socioespaciais da Macrometrópole Paulista**. Disponível em: <<https://emplasa.sp.gov.br/Comunicacao/Publicacoes>>. Acesso em: 04 jan. 2020.
10. ESRI INC. **ArcMap (versão 10.5.1)**. Redlands: Estados Unidos, 2016.
11. GAJBHIYE, S.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A. Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: an RS and GIS perspective. **Applied Water Science**, v. 4, n. 1, p. 51-61, 2014. DOI: 10.1007/s13201-013-0129-7
12. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**, 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>>. Acesso em: 25 jan. 2021.
13. MARQUES, V. V. **Fragilidade ambiental associada à conectividade do escoamento superficial indireto na bacia do Rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba/SP**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). ICTS, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2017.
14. MELO, D. S. et al. Self-organizing maps for evaluation of biogeochemical processes and temporal variations in water quality of subtropical reservoirs. **Water Resources Research**, v. 55, n. 12, p. 10268-10281, 2019. DOI: 10.1029/2019WR025991
15. ROSENBERG, N. J. **Microclimate: The biological environment**. John and Wiley Sons, New York, 1974. 315p.
16. SAAE. Serviço Autônomo de Água e Esgoto. **Adequação e Revisão do Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água de Sorocaba**. Sorocaba, 2016. 205p.

17. SABINO, H.; VASQUES, G. M.; HERMANI, L. C.; DART, R. O. Morfometria de bacias hidrográficas de primeira ordem em áreas agrícolas sob sistema plantio direto: delimitação e propensão à erosão e inundação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i3.1770
18. SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. DOI: 10.20502/rbg.v15i1.376
19. SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambory, New Jersey. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 67, p. 597-646, 1956. DOI: 10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2
20. SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Uso de indicadores morfométricos como ferramentas para avaliação de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 627-642, 2016. DOI: 10.26848/rbgf.v9.2.p627-642
21. SILVA, D. C. C.; SALES, J. C. A.; SIMONETTI, V. C.; LOURENÇO, R. W. Análise espacial do custo de reposição de nutrientes do solo em uma bacia hidrográfica. **RAMA - Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, p. 189-212, 2020. DOI: 10.17765/2176-9168.2020v13n1p189-212
22. SIMONETTI, V. C.; FRASCARELI, D.; GONTIJO, E. S.; MELO, D. S.; FRIESE, K.; SILVA, D. C.; ROSA, A. H. Water quality indices as a tool for evaluating water quality and effects of land use in a tropical catchment. **International Journal of River Basin Management**, p. 1-12, 2019. DOI: 10.1080/15715124.2019.1672706
23. SIMONETTI V. C.; SILVA, D. C. C.; ROSA, A. H. Proposta metodológica para identificação de riscos associados ao relevo e antropização em áreas marginais aos recursos hídricos. **Scientia Plena**, v. 15, p. 1-19, 2019. DOI: 10.14808/sci.plena.2019.025301
24. SOARES, M. R. G. J.; OKA-FIORI, C.; SILVEIRA, C. T.; KAVISKI, E. Avaliação do método de levantamento morfométrico em bacias hidrográficas através da estatística multivariada. **Geosul**, v. 33, n. 68, p. 83-97, 2018. DOI: 10.5007/2177-5230.2018v33n68p83
25. SOPCHAKI, C. H.; SAMPAIO, T. V. M. Estudo de metodologias para identificação de formas de vertentes na bacia do rio Curralinho-Região Metropolitana de Curitiba/PR. **Revista Geografar**, v. 8, n. 1, p. 100-124, 2013. DOI: 10.5380/geografar.v8i1.30945
26. STRAHLER, A. N. Hypsometric analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**. v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952. DOI: 10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2
27. VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, 2003. DOI: 10.20502/rbg.v4i1.17
28. VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003. DOI: 10.1590/S1415-43662003000300022



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.