

Morphometric characterization of the hydrographic basin of the Curuçá River (Pará) and demarcation of river source as subsidy to management

Yago Y. Parente^{*}, Amilcar C. Mendes^{**}, Artur G. O. de Miranda^{***}, Octavio C. Dourado Junior^{****}

^{*} Mestrando em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil. E-mail: yagoparente96@gmail.com (autor correspondente)

^{**} Pesquisador da Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia, Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG, Belém, Pará, Brasil. E-mail: amendes@museu-goeldi.br

^{***} Doutorando em Geologia e Geoquímica, UFPA, Belém, Pará, Brasil. E-mail: arturgustavomiranda@gmail.com

^{****} Professor do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, UEPA, Belém, Pará, Brasil. E-mail: ocdouradojr@hotmail.com

Received 19 June 2020; accepted 10 December 2020

Abstract

The features' knowledge from the watershed has a higher importance on the management of its natural use resources, urban planning and in environmental diagnosis. One of the study's forms from the watersheds is through morphometrical parameters, which give support to the understanding from geodynamics' processes. This work aimed to study the morphometry from the Curuçá river's basin (Curuçá/PA), besides to determine most likely spots of headwaters from the main river. The data handling was performed in an environment of Geographical system's information. It was measured a total of fifteen morphometrical parameters, being divided in fluvial hierarchy, linear analysis from the drainage system, sandpit analysis from the hydrographical basins and hypsometrical analysis. The drainage area was 303,34 km², 37,97 km extension, equal perimeter to 122,70 km and orientation NE-SW. The hydrographical basin from the Curuçá river showed maximum height of 60 meters, compactness' coefficient of 14,56, form's factor of 0,39 and roundness index of 0,25. The drainage's density obtained was 1,04 km. The basin studied is Exorheic, with a multi directional dendritic drainage's standard, it shows a fifth greatness order and stretched format which allows a bigger superficial outflow, and therefore, a smaller susceptibility and vulnerability to the floods' occurrence in normal conditions of precipitation. This study might be used as a support's tool to a decision making, in order to minimize the negative impacts to the county and the population through some strategies' introduction which can be compatible with environmental, social and economical features from the region.

Keywords: remote sensing, morphometrical parameters, water resources management.

Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Curuçá (Pará) e demarcação de nascentes fluviais como subsídio à gestão

Resumo

O conhecimento das características da bacia hidrográfica tem elevada importância no gerenciamento do uso dos recursos naturais, planejamento urbano e em diagnósticos ambientais. Uma das formas de estudo das bacias hidrográficas é através dos parâmetros morfométricos, os quais dão o suporte ao entendimento de processos geodinâmicos. Este trabalho visou estudar a morfometria da bacia do rio Curuçá (Curuçá/PA), além de determinar os prováveis pontos das nascentes do rio principal. O processamento e análise dos dados foram realizados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas. Foram mensurados um total de quinze parâmetros morfométricos, sendo divididos em hierarquia fluvial, análise linear da rede de drenagem, análise areal da bacia hidrográfica e análise hipsométrica. A área da drenagem foi de 303,34 km², extensão de 37,97 km, perímetro igual a 122,70 km e orientação NE-SW. A bacia hidrográfica do rio Curuçá apresentou altitude máxima de 60 m, coeficiente de compactidade de 14,56, fator de forma de 0,39 e índice de circularidade de 0,25. A densidade de drenagem obtida foi de 1,04 km km⁻². A bacia estudada é do tipo exorreica, com padrão de drenagem dendrítico multidirecional, apresenta grandeza de quinta ordem e formato alongado que possibilita maior escoamento superficial e menor susceptibilidade a ocorrência de enchentes em condições normais de precipitação. Este estudo poderá ser usado como instrumento de apoio à tomada de decisão, a fim de minimizar os impactos negativos ao município e à população por meio da adoção de estratégias que sejam compatíveis com os aspectos ambientais, sociais e econômicos da região.

Palavras-chaves: sensoriamento remoto, parâmetros morfométricos, gestão de recursos hídricos.

1. Introdução

A bacia hidrográfica é a área drenada por um rio principal e seus afluentes, que é composta por um conjunto de canais de escoamento inter-relacionados e contornada por uma divisão topográfica. A ela não se limitam apenas os cursos d'água que seccionam o relevo ou drenam uma determinada área, mas sim, a um espaço topograficamente destinado a alimentar estes cursos d'água através dos processos de movimentação da água (Lima e Fontes, 2015). Desse modo, a bacia é uma zona de captação natural da precipitação que faz convergir em um único ponto de saída, seu exutório (Tucci, 2001). A parcela de água que culmina no curso fluvial está diretamente relacionada ao tamanho da bacia, quantidade de precipitação e às perdas devidas à infiltração e evaporação.

O estudo das bacias hidrográficas tem elevada importância no planejamento do uso dos recursos naturais, planejamento urbano e em trabalhos de diagnóstico de conservação de recursos naturais, no qual estes, devem ser realizados com eficiência e rapidez, a fim de conter a degradação. Nesse sentido, Beltrame (1994) ratifica que a bacia hidrográfica deve ser considerada a unidade básica de análise para o gerenciamento territorial e diagnóstico da situação real em que se encontram os recursos naturais em um determinado lugar.

Segundo o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a partir da Lei nº 9.433, de 08/01/1997, a bacia hidrográfica é considerada a unidade básica do gerenciamento de recursos hídricos, como também territorial. A bacia, por ser uma unidade de planejamento tão complexa que abriga vários elementos naturais e antrópicos em constante interação, torna-se de elevada importância o conhecimento de todas as suas características.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas constitui o conjunto de procedimentos que realizam a análise quali-quantitativa de aspectos geométricos e hipsométricos. Desse modo, estabelece indicadores alusivos com a forma, arranjo estrutural, topografia e composição integrada desses itens (Christofolletti, 1999). A bacia conta com elementos indispensáveis ao cálculo dos parâmetros morfométricos, tais como: a configuração da própria bacia, a rede de drenagem e o relevo do terreno, no qual as correlações desses elementos geram aqueles parâmetros (Cherem, 2008).

Nesse sentido, os índices morfométricos atuam como fontes fundamentais de informações, visto que, segundo Ferreira et al. (2012), o seu conhecimento torna possível a compreensão do comportamento hidrológico que as mesmas apresentam e que futuramente poderão vir a apresentar, o que denota a possibilidade de

acompanhamento das interferências nos processos do ciclo hidrológico e as respectivas respostas da natureza. Desta forma, o conhecimento das características morfométricas pode garantir maior eficiência das intervenções realizadas na bacia, facilitando o seu planejamento, de modo a minimizar impactos ambientais e desastres de origem natural (Carelli e Lopes, 2011).

A mesorregião do Nordeste Paraense é considerada uma das mais antigas áreas de colonização da Amazônia, onde a paisagem atual é caracterizada por um alto grau de antropização, decorrente dos processos de ocupação e das atividades produtivas. Atualmente, essa região passa por uma intensificação do uso e ocupação, proporcionado pelos polos de biodiesel, bem como pela expectativa de construção de um porto offshore no Município de Curuçá, denotando grande significância e importância nos contextos geopolítico, econômico e ambiental do estado do Pará. Ademais, este município também conta com uma unidade de conservação, a Reserva Extrativista Mãe Grande de Curuçá, que até o momento não possui plano de manejo nem qualquer estudo acerca da bacia hidrográfica do rio Curuçá, principal rio do município.

Neste contexto, o presente estudo tem o objetivo de realizar a caracterização morfométrica da bacia de drenagem do rio Curuçá (Curuçá/PA), levando em consideração os parâmetros lineares, aeriais, hipsométricos e de hierarquia fluvial, de forma a propiciar a demarcação das prováveis nascentes fluviais da rede hidrográfica, utilizando técnicas de geoprocessamento.

2. Material e métodos

Área de estudo

O rio Curuçá pertence ao município de Curuçá (00°33"- 00°45"S e 47°57"- 47°45"W), localizado na região do Salgado Paraense (nordeste do estado do Pará), onde estão estabelecidos os estuários de livre conexão com o Oceano Atlântico, que são fortemente influenciados por macromarés semidiurnas, assim como pela forte ação de ondas (Corrêa e Martinelli, 2009). O município está limitado, ao norte, pelo Oceano Atlântico; ao sul, pelo município de Terra Alta; a leste, pelo município de Marapanim e, a oeste, pelo município de São Caetano de Odivelas (Figura 1). O município tem 672,68 km² de área e conta com 38.959 habitantes (IBGE, 2015).

O clima da região é equatorial, caracterizado por altas temperaturas, com valor médio de 27 °C, pequena amplitude térmica e regime de chuva abundante, que supera 2.000 mm ao ano, sendo que os meses de janeiro a junho abrangem o período mais

chuvoso e julho a dezembro, o período menos

chuvoso (Leite et al., 2010).

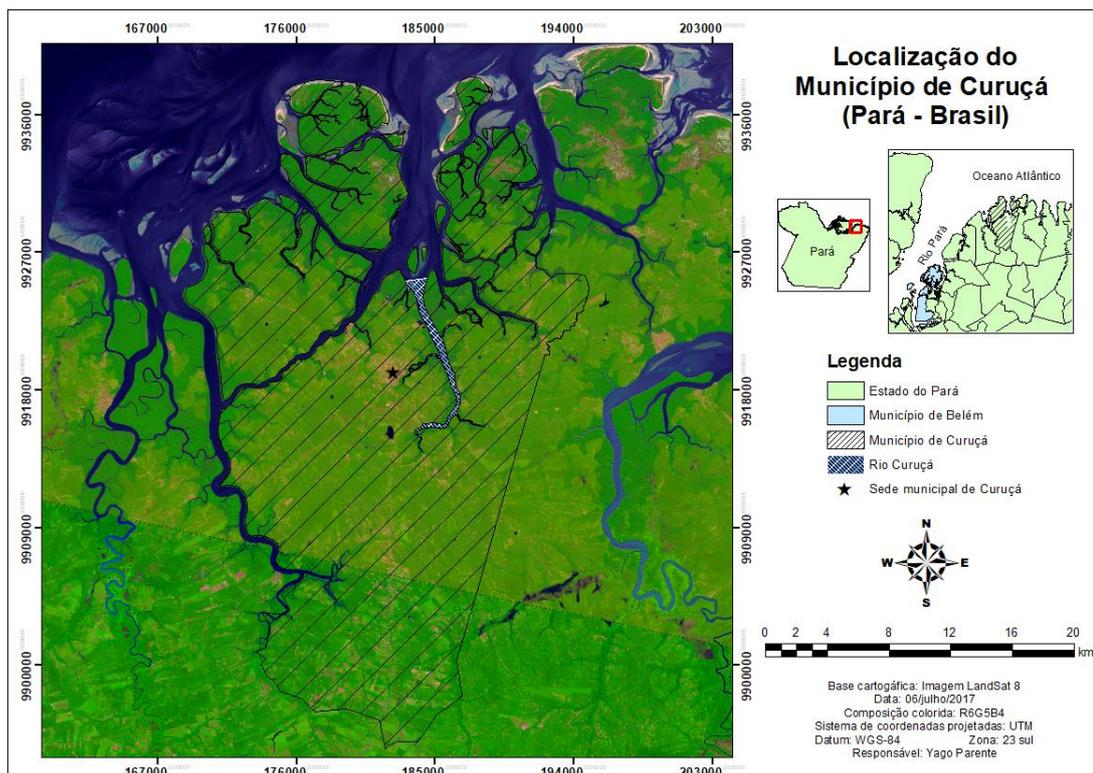


Figura 1 - Localização do município de Curuçá-PA. Fonte: Satélite LandSat 8, sistema de projeção UTM, datum: WGS-84.

Procedimentos metodológicos

O processamento, análise dos dados geográficos e cálculo dos parâmetros morfométricos foram realizados nos softwares ArcGIS 10.4 (ESRI, 2015) e Surfer 15.1 (Golden Software, 2017), sendo que o primeiro também foi utilizado na elaboração dos mapas, padronizando o sistema de coordenadas dos dados geográficos, a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), elipsoide de referência WGS-84, zona 23 sul.

- Aquisição de produtos cartográficos e imagens de satélite

Dados preliminares da rede de drenagem, nomenclatura dos cursos d'água, localidades e as cotas altimétricas da região foram obtidos através do banco de dados cartográficos, disponíveis para download na *homepage* oficial da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG, 1982). Foi utilizada a Carta Topográfica Marapanim (Folha SA. 23-V-A-IV), que enquadra completamente o município de Curuçá.

Quanto às imagens de satélite, foram utilizados os produtos dos sensores Landsat 8, RapidEye e da constelação Planet. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características dessas imagens.

Tabela 1 - Características técnicas das imagens obtidas dos sensores remotos Landsat 8, RapidEye e da constelação Planet.

Características	Satélites		
	Landsat 8	RapidEye	Constelação Planet
Número de satélites	1	5	120
Bandas Espectrais	11 (Ultra Blue, Blue, Green, Red, Near Infrared, Shortwave Infrared 1 e 2, Panchromatic, Cirrus, Thermal Infrared 1 e 2)	5 (Red, Green, Blue, Red Edge, Near Infrared)	4 (Red, Green, Blue, Near Infrared)
Resolução espacial	30 metros, convertida em 15 metros	5 metros	3 metros
Resolução radiométrica	16 Bits	16 bits	16 bits
Tamanho da Imagem	170 x 183 km	25 x 25 km	26 x 8,5 km
Formato	GeoTIFF		

Fonte de dados: Adaptado de Barsi et al. (2014) e Planet Labs (2016)

- Tratamento de imagens de satélite

Técnicas de realce sobre a imagem foram aplicadas com o intuito de facilitar a interpretação visual da mesma. Esse processo foi dividido em três etapas: realce espectral, espacial e radiométrico.

No realce espectral foram testadas diversas

composições entre as bandas espectrais de cada imagem, com o propósito de selecionar aquela que apresentasse a melhor distinção entre a massa d'água e a terra. A partir de tal processo foram selecionadas as bandas do infravermelho próximo, vermelho e verde, na composição RGB (Figura 2).

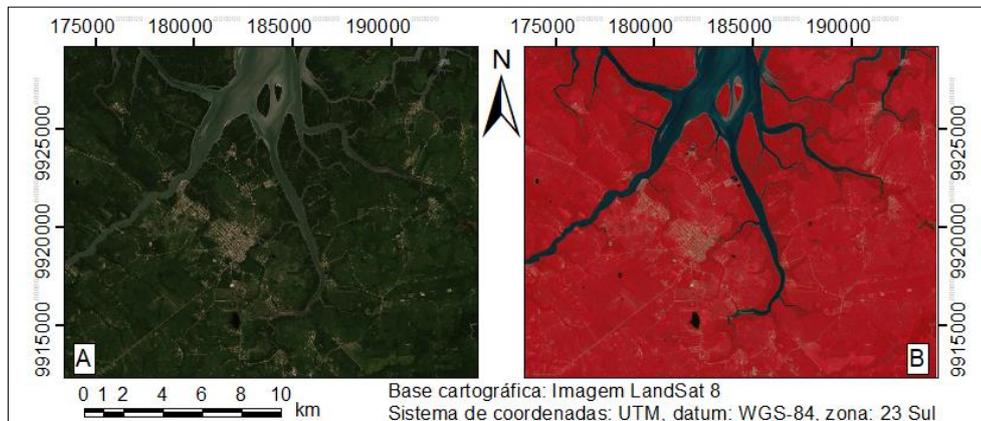


Figura 2 - Diferença entre as composições espectrais, (A) R4G2B1 e (B) R5G4B3. Fonte: Satélite LandSat 8, sistema de projeção UTM, datum: WGS-84.

A técnica de realce espacial foi aplicada somente às imagens Landsat, pois são as únicas que apresentam a banda pancromática. Esse procedimento possibilitou obter as informações das bandas multiespectrais (30 metros de resolução) com a resolução da pancromática (15 metros de resolução). Por fim foi realizado o ajuste radiométrico, que consistiu na manipulação do histograma da imagem através do controle de contraste e brilho.

- Processamento de dados topográficos

Na análise da bacia de drenagem e no cálculo dos parâmetros morfométricos foram utilizadas cotas altimétricas da Carta Planialtimétrica SA. 23-V-A-IV (Marapanim) em escala 1:100.000 e o modelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Para a elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT) foi necessária a criação de uma rede triangular irregular. Para isso foram utilizados os dados de elevação da carta planialtimétrica que abrange a bacia do rio Curuçá. As cotas foram submetidas ao processo de interpolação, pelo método de krigagem, interpolador mais aconselhável em análises topográficas (Valeriano, 2002).

Em seguida foram gerados blocos diagrama, representando a altimetria contínua do terreno e a declividade. Posteriormente, foi reclassificado o MDT de 5 em 5 metros para definir a hipsometria. Os dados SRTM, com resolução de 30 metros, possibilitaram maior consistência nos dados morfométricos, planialtimétricos da bacia de drenagem, bem como refinaram a modelagem, auxiliando na delimitação da bacia e no cálculo do número de canais de drenagem.

- Delimitação da bacia hidrográfica

A metodologia utilizada consistiu no uso de dados SRTM, que foram processados no software ArcGIS 10.4 (ESRI, 2015), com a extensão *ArcHydro Tools*. Este processo foi dividido em quatro etapas: preenchimentos de depressões (*Fill sinks*); direção de fluxo (*Flow direction*); fluxo acumulado (*Flow accumulation*) e delimitação de bacia (*Watershed Delineation*).

O primeiro passo consistiu em preencher os *sinks* do raster. *Sink* é descrito como uma área rodeada por cotas altimétricas superiores, que pode ser associada a depressões, e estes *sinks* correspondem a erros do próprio modelo.

Em seguida, foi definida a direção de fluxo do curso d'água, onde foi utilizada a regra da maior declividade, de modo que o sentido de escoamento se direciona para a célula vizinha que apresente a maior diferença de elevação do terreno em relação ao pixel selecionado. Nessa etapa foi gerada uma grade regular contendo informações sobre as direções de fluxo.

Após a definição da direção de fluxo, foi possível obter o fluxo acumulado que, segundo Mendes e Cirilo (2001), representa a rede de drenagem. Nesse processo foi estabelecida uma grade contendo os valores de acúmulo de água em cada pixel, de modo que cada pixel recebeu um valor correspondente ao número de pixels que contribuíram para que a água chegue até ele. Por fim, foi realizado a delimitação da bacia hidrográfica a partir das grades contendo os valores de direção de fluxo e fluxo acumulado.

- Delimitação da rede de drenagem

A rede de drenagem do rio Curuçá foi definida levando em consideração todos os cursos d'água que interagem e corroboram com o sistema do rio principal. Nesse arranjo arquitetural a bacia englobou canais intermitentes (canais de maré) e perenes (rios, furos, entre outros).

O reconhecimento e delimitação da rede de drenagem foi realizado por meio da técnica de fotointerpretação, a partir da utilização de imagens

Landsat 8, RapidEye e Planet (Figura 3). A princípio foram utilizadas imagens Landsat 8 para traçar os cursos d'água de maior largura; posteriormente, as imagens RapidEye para demarcar os que não foram possíveis de visualizar na anterior e, por fim, foi usado o acervo Planet para delimitar os menores cursos d'água e realizar a ratificação, ou seja, o ajuste fino, do mapeamento.

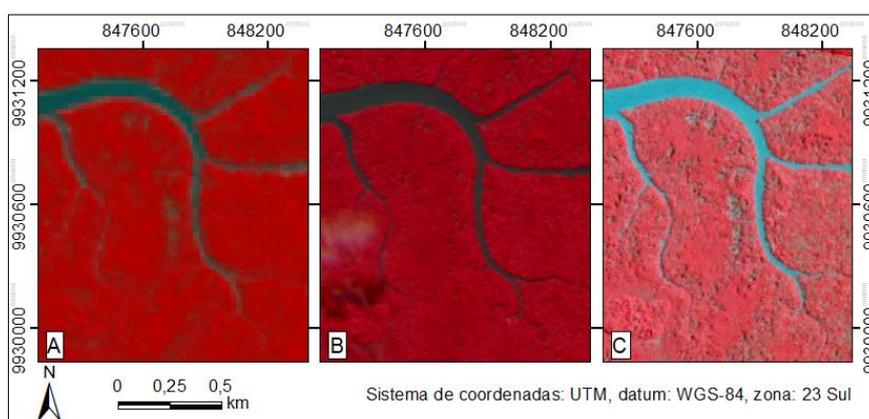


Figura 3 - Representação dos níveis de detalhes das imagens Landsat 8 (A), RapidEye (B) e Planet (C).

A interpretação visual do produto realçado foi realizada utilizando os seguintes padrões-chaves: elementos tom/cor, textura, forma, tamanho, contexto, geometria e configuração da ocupação. Essa mesma técnica também foi utilizada na delimitação das áreas de manguezal, a qual foi utilizado a chave de interpretação definida por Boulhosa e Souza Filho (2008), onde esse ambiente apresenta maior rugosidade e cor marrom avermelhada como resposta da alta reflectância do espectro do vermelho.

- Cálculo dos parâmetros morfométricos

De posse dos dados obtidos a partir da fotointerpretação, processamento do modelo SRTM e da carta topográfica, foram calculados os parâmetros morfométricos da bacia de drenagem, onde estes foram divididos em: I) hierarquia fluvial; II) análise linear da rede de drenagem; III) análise areal das bacias hidrográficas; IV) análise hipsométrica. Os parâmetros analisados foram evidenciados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais parâmetros morfométricos da caracterização de bacias hidrográficas.

Parâmetro Morfométrico	Unidade	Fórmula	Autores
Análise linear da rede de drenagem			
Extensão do percurso superficial	km	$Eps = 1 / (2 * Dd)$	Horton (1945)
Índice de sinuosidade do canal principal	-	$Is = Lp / L$	Horton (1945)
Relação de bifurcação	-	$Rb = Nu / Nu+1$	Horton (1945)
Relação entre os comprimentos médios	-	$RLm = Lmu / Lmu-1$	Horton (1945)
Relação entre RLm e o Rb	-	$Rlb = RLm / Rb$	Horton (1945)
Análise areal das bacias hidrográficas			
Coefficiente de compacidade	-	$Kc = 2,08 * (P / \sqrt{A})$	Villela e Mattos (1975)
Coefficiente de manutenção	km ²	$Cm = 1 / Dd$	Schumm (1956)
Densidade de drenagem	km/km ²	$Dd = Lt / A$	Horton (1945)
Densidade de rios	nº/km ²	$Dr = Nt / A$	Horton (1945)
Fator de forma	km/km ²	$Kf = A / L^2$	Villela e Mattos (1975)
Índice de circularidade	-	$Ic = (12,57 * A) / P^2$	Miller (1953)
Análise hipsométrica			
Amplitude altimétrica máxima	m	$Hm = Hmáx - Hmín$	Christofoletti (1980)
Índice de rugosidade	-	$Ir = Hm * Dd$	Strahler (1964)
Razão de relevo	m/m	$Rr = Hm / L$	Schumm (1956)

- Demarcação de nascentes fluviais

Nesta etapa foram utilizadas duas metodologias: a primeira, desenvolvida pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), descrita por Gonçalves et al. (2016); a segunda, instituída por Christofolletti (1980), que estabelece que o local mais provável da nascente se localiza no início de drenagem do rio principal.

Os critérios do método do IGC estabelecem que as nascentes dos rios se localizam no ponto mais distante da sua foz e/ou situam-se na maior cota topográfica que as demais. Portanto, os locais mais prováveis de se encontrar as nascentes do rio são os pontos de maior altitude e mais distantes da foz. Para a estimativa da altura de cada início de drenagem foi realizada uma interpolação (método de krigagem) dos dados das cotas altimétricas da Folha SA. 23-V-A-IV. O cálculo da distância da foz foi realizado por meio de processos automáticos no SIG.

Para a determinação do rio principal foi utilizado o método de Horton (1945), que utiliza os seguintes critérios: partindo da jusante da confluência, estende-se a linha do curso de água para montante, para além da bifurcação, seguindo a mesma direção, o canal confluyente que apresentar menor ângulo é o principal; se ambos os cursos possuem o mesmo ângulo, o rio de maior extensão é geralmente designado como o rio principal.

3. Resultados e discussão

Classificação da bacia de drenagem

O rio Curuçá tem aproximadamente 22 km de extensão, sua montante situa-se no planalto costeiro do município homônimo e desemboca na planície costeira, onde apresenta foz estuarina. Este rio apresenta duas classificações geométricas de canal: i) no planalto costeiro adquire configuração de um canal meandrante; ii) ao atingir a planície costeira, assemelha mais com um canal retilíneo. Característica que se repete em outros ambientes litorâneos da região (salgado paraense), conforme demonstrado em Silva (2006), que constatou que o rio Marapanim apresenta o estuário com forma de funil, de largura menor na montante, o rio em sua porção de maior abertura apresenta baixa sinuosidade

e, à medida que a seção transversal diminui, cede lugar a um padrão de canal com maior meandramento.

A drenagem estudada é classificada como um rio, segundo a classificação de Christofolletti (1980), por sua direção de fluxo ser influenciada principalmente pela inclinação da superfície do terreno, apresentando suas nascentes nos terrenos mais elevados (planalto), em cotas de 60 metros, e desembocadura na região estuarina, de baixas altitudes, com cotas ≤ 5 metros.

Quanto ao escoamento global de suas águas, a bacia do rio Curuçá pode ser classificada como exorreica, segundo a classificação de Christofolletti (1980), visto que o escoamento se dirige para o Oceano Atlântico. Nesse enquadramento e levando em consideração as baixas altitudes, pode-se considerar que o sistema fluvial sofre forte influência das macromarés semidiurnas da região, a exemplo do que ocorre, por exemplo, com a bacia do rio Marapanim (Oliveira, 1999; Silva, 2006).

Quanto ao padrão de drenagem, a rede hidrográfica pode ser classificada como dendrítica (Figura 4). Na planície costeira a densidade de drenagem é elevada, composta por cursos d'água de primeira ordem e de pequeno comprimento. Neste setor os canais desenvolvem-se em várias direções (padrão desordenado), enquanto que no planalto costeiro apresenta cursos d'água extensos e com menor densidade de drenagem, desenvolvendo-se em maior quantidade com escoamento voltado à planície.

Ambas as características retrocitadas podem ser explicadas pelo tipo de ambiente geomorfológico e sedimentológico que dá suporte à instalação da bacia. No primeiro caso, o ambiente caracteriza-se por ser uma planície de maré lamosa, de baixa declividade e com forte influência de maré, contendo sedimentos argilosos que dificultam a infiltração e propiciam o surgimento de canais superficiais (fluxo superficial) dispostos em várias direções. No planalto, com declividades e cotas altimétricas maiores, constituído por sedimentos areno-argilosos (Oliveira, 1999), há favorecimento para o surgimento de cursos d'água extensos e dada a porosidade e permeabilidade do arcabouço sedimentológico, propiciam a infiltração de água no solo.

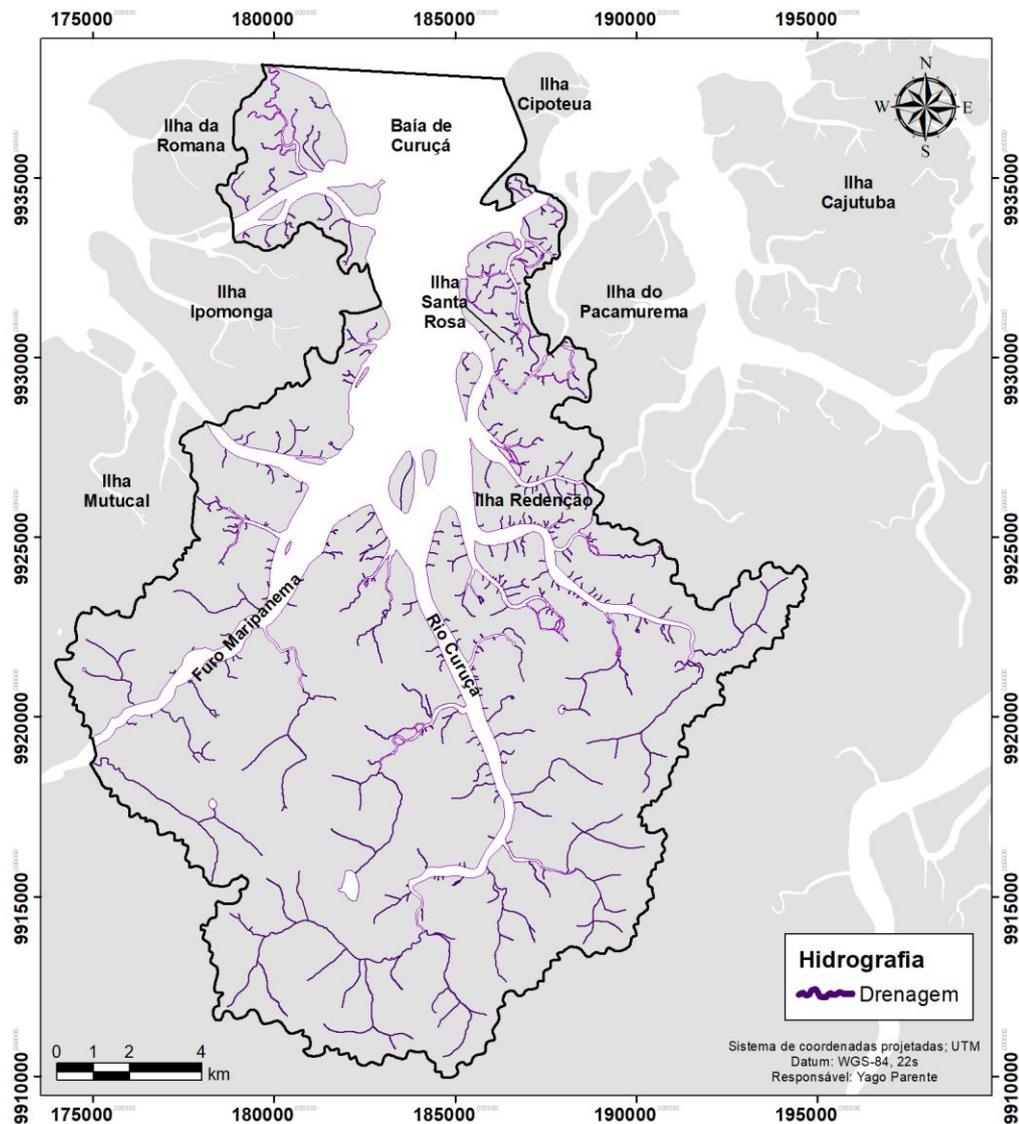


Figura 4 - Rede hidrográfica da bacia do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Parâmetros morfométricos

- Hierarquia fluvial

Segundo a hierarquização da drenagem proposta por Strahler (1952), o valor encontrado indica que a bacia do rio Curuçá apresenta hierarquia de quinta ordem, onde apenas o rio principal adquiriu essa configuração. O arranjo de seus canais lhe confere um padrão dendrítico multidirecional. A maior parte dos cursos d'água enquadra-se como rios de primeira ordem, com comprimento médio de 0,48 km. Esse grupo foi, também, o que apresentou a maior densidade de drenagem quando comparado às demais ordens; seu erro médio foi o menor de todos, com $0,48 \pm 0,34$ km.

Ocorreu um decréscimo significativo da quantidade de cursos d'água de primeira para segunda ordem, com queda de aproximadamente 82%, porém houve um aumento do comprimento

médio dos cursos d'água que ultrapassou 1 km, com extensão máxima de 6,15 km e erro médio de $1 \pm 0,83$ km. A passagem dos cursos d'água para terceira ordem apresentou uma queda na quantidade de 77%, onde o comprimento médio dos cursos foi de 2,36 km; essa classe hierárquica apresentou o curso d'água com maior comprimento (9,53 km) e, também, foi a que obteve o maior erro médio, $2,36 \pm 1,672$ km, indicando que foi a classe onde ocorreu a maior oscilação dos comprimentos.

Quanto às drenagens de quarta e quinta ordem, foram as que apresentaram menor quantidade, respectivamente 3 e 1. Aquela apresentou comprimento médio de 2,48 km com erro de $\pm 0,43$ km, enquanto que o curso d'água de quinta ordem apresentou extensão total de 9,45 km. A Tabela 3 mostra as principais análises realizadas sobre a hierarquia fluvial da bacia.

Tabela 3 – Quantidade e comprimento dos corpos d’água organizados de acordo com a hierarquia da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Hierarquia	Quantidade	Comprimento (km)				Desvio Padrão
		Total	Médio	Máximo	Mínimo	
1ª	389	187,239	0,481	3,698	0,016	0,349
2ª	70	72,762	1,039	6,154	0,011	0,834
3ª	16	37,788	2,362	9,530	0,179	1,672
4ª	3	7,434	2,478	3,127	1,900	0,433
5ª	1	9,452	-	-	-	-

Como visto na Figura 5, os cursos d’água de maior ordem hierárquica se concentraram na porção mais ao sul da bacia, região que apresentou as maiores cotas altimétricas da área; os de menor

ordem se concentraram mais ao norte da bacia, sendo formado principalmente por canais de maré, devido à baixa altimetria e elevada influência da maré.

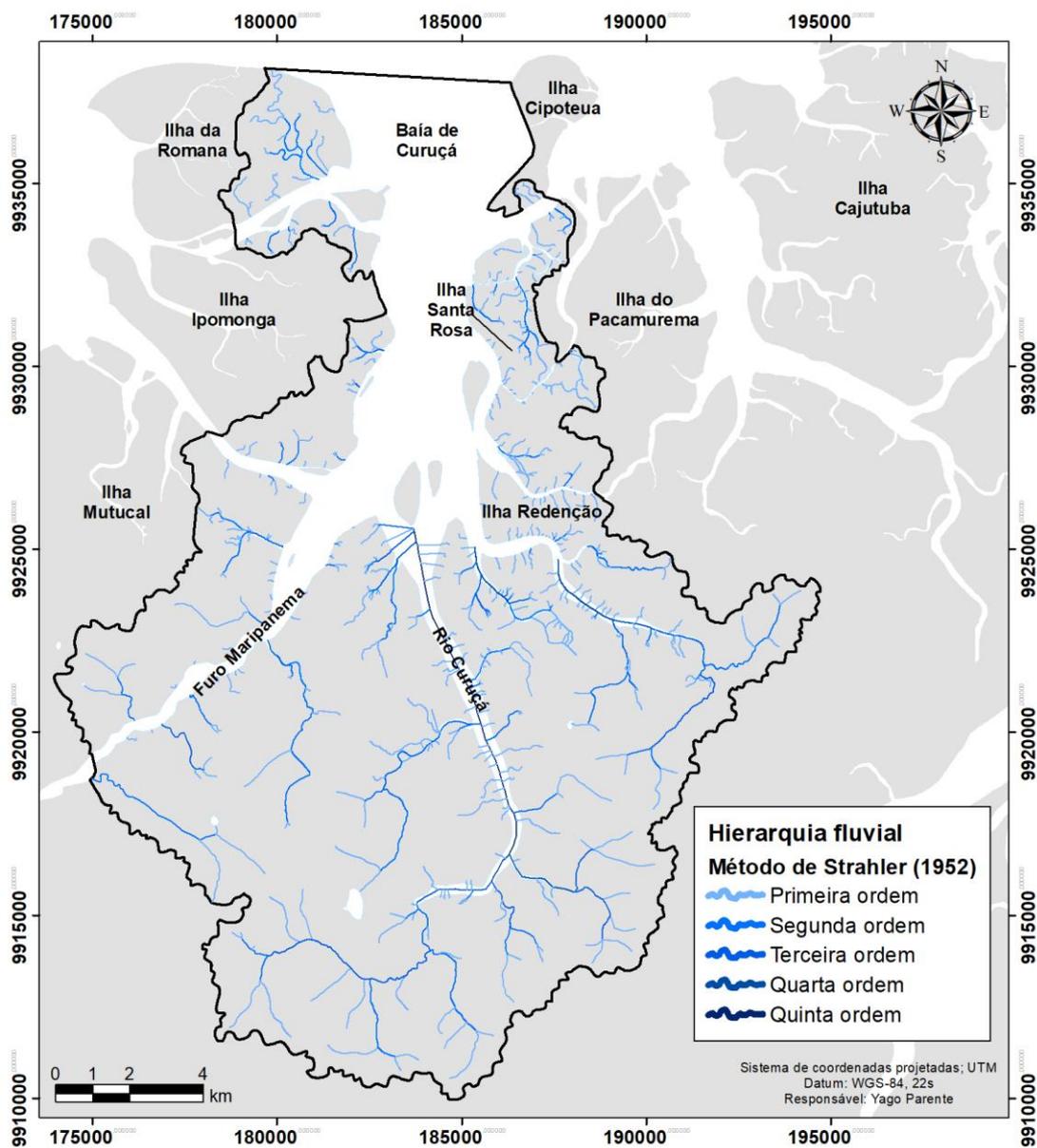


Figura 5 - Hierarquia fluvial da rede hidrográfica da bacia do rio Curuçá, Curuçá/PA

- Análise linear da rede de drenagem

O comprimento do rio principal (rio Curuçá), da sua desembocadura até sua provável nascente, foi

de 34,88 km. Desta extensão, cerca de 12,6 km se encontra na zona de estuário, cercado por canais e furos que se ligam a outros estuários adjacentes,

enquanto que os outros 22,28 km adentraram mais no continente, de forma a não apresentar ligações externas. Deste setor mais interno, cerca de 14 km do comprimento apresentou forma meandrante, enquanto que o restante apresentou formato retilíneo.

Segundo Cherem (2008), o valor do Sin, de 1,25, sugere que este curso d'água possui controle estrutural, como visto na Figura 5, apesar de parte do curso d'água apresentar formato meandrante.

A rede de drenagem é constituída por 479 cursos d'água, dentre os quais estão os cursos perenes e intermitentes, onde estes perfizeram 132,06 km, enquanto os perenes 182,62 km; o comprimento total somou 314,68 km de extensão, com média de 0,66 km e erro médio de $0,66 \pm 0,55$ km. O curso d'água de menor extensão, de aproximadamente 0,011 km, se localizou na planície costeira, enquanto o de maior comprimento, 9,530 km, foi registrado no planalto

costeiro.

A partir da Eps pode-se constatar que a distância média percorrida pelas enxurradas até atingir um curso d'água é de 0,48 km. Segundo Christofletti (1980) a Eps trata-se de uma representação da distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente, correspondendo a uma das variáveis independentes mais importantes que afeta tanto no desenvolvimento hidrológico como o aspecto fisiográfico das bacias de drenagem. O referido autor considera ainda que na evolução do sistema de drenagem, a extensão do percurso superficial está ajustada ao tamanho apropriado relacionado com as bacias de primeira ordem, aproximando-se à metade do recíproco valor da densidade da drenagem. A Tabela 4 mostra um resumo dos principais parâmetros morfométricos lineares.

Tabela 4 - Parâmetros morfométricos lineares da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Parâmetro Morfométrico	Sigla	Unidade	Valores
Comprimento do curso d'água principal	Lp	km	34,88
Comprimento total dos cursos d'água	Lt	km	314,67
Número total de cursos d'água da bacia	Nt	-	479,00
Extensão do percurso superficial	Eps	km	0,48
Índice de sinuosidade do canal principal	Sin	-	1,25

Segundo Summerfield (1991), nas áreas em que a litologia não é heterogênea a relação de bifurcação é dificilmente maior que cinco. No caso da bacia estudada, esta consideração pode ser considerada correta, visto que a mesma apresenta ambientes litológicos bastante distintos. Pode-se destacar a existência de duas grandes unidades geomorfológicas no âmbito da bacia: i) planície costeira, formada por sedimentos lamosos inconsolidados do Quaternário; ii) planalto costeiro, formado por sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras (Terciário).

De acordo com França (1968), solos mais permeáveis apresentam baixos valores de bifurcação, enquanto que solos menos permeáveis apresentam alta bifurcação. Nesse âmbito, a classe 1/2^a apresentou a menor permeabilidade, dado que a maioria dos cursos d'água dessa região ficou contida na planície costeira, seguindo da classe 3/4^a. A classe

4/5^a apresentou os solos mais permeáveis, em razão de grande parte dos cursos d'água estar instalada no planalto costeiro.

A partir dos resultados da Rlm foi possível constatar que os cursos d'água aumentaram de comprimento conforme o aumento do grau hierárquico. A classe 4/5^a apresentou a maior proporção de crescimento, decorrente do fato que o 5^a grau hierárquico apresentou apenas um curso d'água de grande extensão, ao passo que a classe 3/4^a obteve a menor proporção de crescimento, com resultados de comprimentos médios próximos entre si.

O resultado da Rlb permite evidenciar que não houve crescimento na mesma medida dos cursos d'água, porém ocorreu um aumento progressivo do comprimento médio dos cursos d'água, sobretudo na classe 4/5^a. A Tabela 5 mostra um resumo dos principais parâmetros morfométricos lineares separados por hierarquia

Tabela 5 - Parâmetros morfométricos lineares organizados de acordo com a hierarquia da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Ordem	Relação de bifurcação (Rb)	Relação entre os comprimentos médios (RLm)	Relação entre RLm e o Rb (Rlb)
1 / 2 ^a	5,56	2,16	0,39
2 / 3 ^a	4,38	2,27	0,52
3 / 4 ^a	5,33	1,05	0,20
4 / 5 ^a	3,00	3,81	1,27

- Análise areal das bacias hidrográficas

A análise areal da bacia hidrográfica engloba vários índices nos quais intervêm medições planimétricas, além de medições lineares.

A área da bacia que comporta todos de cursos de água que influenciam o sistema fluvial do rio Curuçá é de 303,34 km². O perímetro foi de 122,70 km.

A bacia do rio Curuçá pode ser considerada pequena quando comparada à bacia do rio Marapanim (rede hidrográfica vizinha), que tem área aproximada de 2.234 km² e perímetro de 238 km

(Oliveira, 1999). A bacia do rio Curuçá encontra-se totalmente compreendida nos limites do município de Curuçá/PA, com 37,97 km de sua montante até a desembocadura. Enquanto que a bacia do rio Marapanim abrange 4 municípios (Marapanim, Castanhal, Terra Alta e São Francisco do Pará), contando com 88,69 km de seu montante até a desembocadura (Oliveira, 1999).

A Tabela 6 mostra um resumo dos principais parâmetros morfométricos areais da bacia do rio Curuçá.

Tabela 6 - Parâmetros morfométricos areais da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Parâmetro Morfométrico	Sigla	Unidade	Valores
Área total	A	km ²	303,34
Coefficiente de compacidade	Kc	-	14,65
Coefficiente de manutenção	Cm	km ²	0,96
Comprimento axial da bacia	L	km	27,97
Densidade de drenagem	Dd	km/km ²	1,04
Fator de forma	Kf	-	0,39
Densidade de rios	Dr	n ^o /km ²	1,58
Índice de circularidade	Ic	-	0,25
Largura média da bacia	Lm	km	10,90
Perímetro total	P	km	122,70

Os valores de Coeficiente de Compacidade (Kc) e Índice de Circularidade (Ic) indicam que a bacia possui forma irregular, não se assemelhando ao formato de um círculo e, desse modo, possui tendência alongada que acaba por favorecer o processo de escoamento da água. Uma bacia será susceptível a enchentes mais acentuadas quando seu Kc atingir uma medida mais próxima da unidade, o que não é o caso da bacia estudada sob condições normais de precipitação.

O Fator de Forma (Kf) demonstra que o formato da bacia se assemelha a um retângulo, o que colabora para o processo de escoamento. Nesse contexto, a bacia do rio Curuçá possui forma alongada, que corrobora para que possua uma baixa tendência a sofrer inundações. Por meio do resultado obtido para Fator de Forma (0,39), reforçado pelo resultado encontrado para Coeficiente de Compacidade (14,65), pode-se inferir que a bacia hidrográfica estudada é pouco susceptível a enchentes em condições normais de precipitação, tal fato pode ainda ser comprovado pelo Índice de Circularidade (0,25), onde, segundo Miller (1953), valores menores que 0,51 sugerem que a bacia tende a ser mais alongada, menores possibilidades de enchentes, favorecendo o processo de escoamento.

O Coeficiente de Manutenção (Cm) indicou que são necessários 0,96 km² de área para manter perene cada 1 km de curso d'água. A expressão tão elevada deste valor pode ser associada ao relevo suave que compreende a planície costeira

A Densidade de Rios (Dr) de toda bacia foi de 1,58, onde a maior parte desses cursos d'água corresponderam a cursos de primeira ordem, com os menores comprimentos. Tal índice torna-se importante por representar o comportamento hidrológico de determinada área em um de seus aspectos mais fundamentais, ou seja, a capacidade de gerar novos cursos de água. Segundo Lima & Fontes (2015) valores abaixo de 4,0 representam uma textura grosseira. O comportamento do substrato geológico (Grupo Barreiras) do alto e médio curso também exerce influência, pois apresenta menor resistência aos processos de modelagem do relevo e, neste sentido, entende-se que as formas mais dissecadas acabam por prevalecer. A zona de planície costeira obteve a maior concentração de cursos d'água, resultado decorrente do tipo de substrato (argiloso) dessa zona, que dificulta a infiltração e favorece o escoamento superficial.

A Densidade de Drenagem (Dd) foi de 1,04, resultado este que, de acordo com os critérios de Strahler (1986), significa que a bacia apresenta baixa densidade e textura grosseira. Esse resultado é menor que a classificação proposta por Christofolletti (1980), que é de 5 km/km², indicando que a bacia apresenta baixa relação entre o comprimento de rios e a área da bacia, o que denota um eficiente escoamento de fluxo de água e boa infiltração para o lençol freático, isto é, uma menor propensão a inundações. O baixo resultado desse parâmetro pode ser explicado também pelo ambiente geomorfológico em que a

bacia está encaixada onde a maior parte se caracteriza pelo planalto costeiro, constituído por sedimentos areno-argilosos, que formam solos permeáveis e acabam por conferir uma baixa densidade de drenagem à bacia.

- Análise hipsométrica

A maior cota altimétrica registrada na bacia foi de 66,88 m, porém não foi constatada nenhuma drenagem nesta área. A maior cota altimétrica onde foram constatados traços de drenagem foi de 58,49 m. Ambas as cotas retrocitadas se localizam no

planalto costeiro, em sua porção mais a sul. Enquanto que as áreas de menor altitude se localizaram na porção mais a norte da planície costeira, região em que há o predomínio de planícies de maré lamosas colonizadas por manguezais. A amplitude altimétrica da bacia foi de 61,88 m.

A Figura 06 mostra o MDE desenvolvido a partir de uma grade de triângulos irregulares, onde é possível, de maneira tridimensional, averiguar que as maiores altitudes ficaram concentradas na porção sul da bacia.

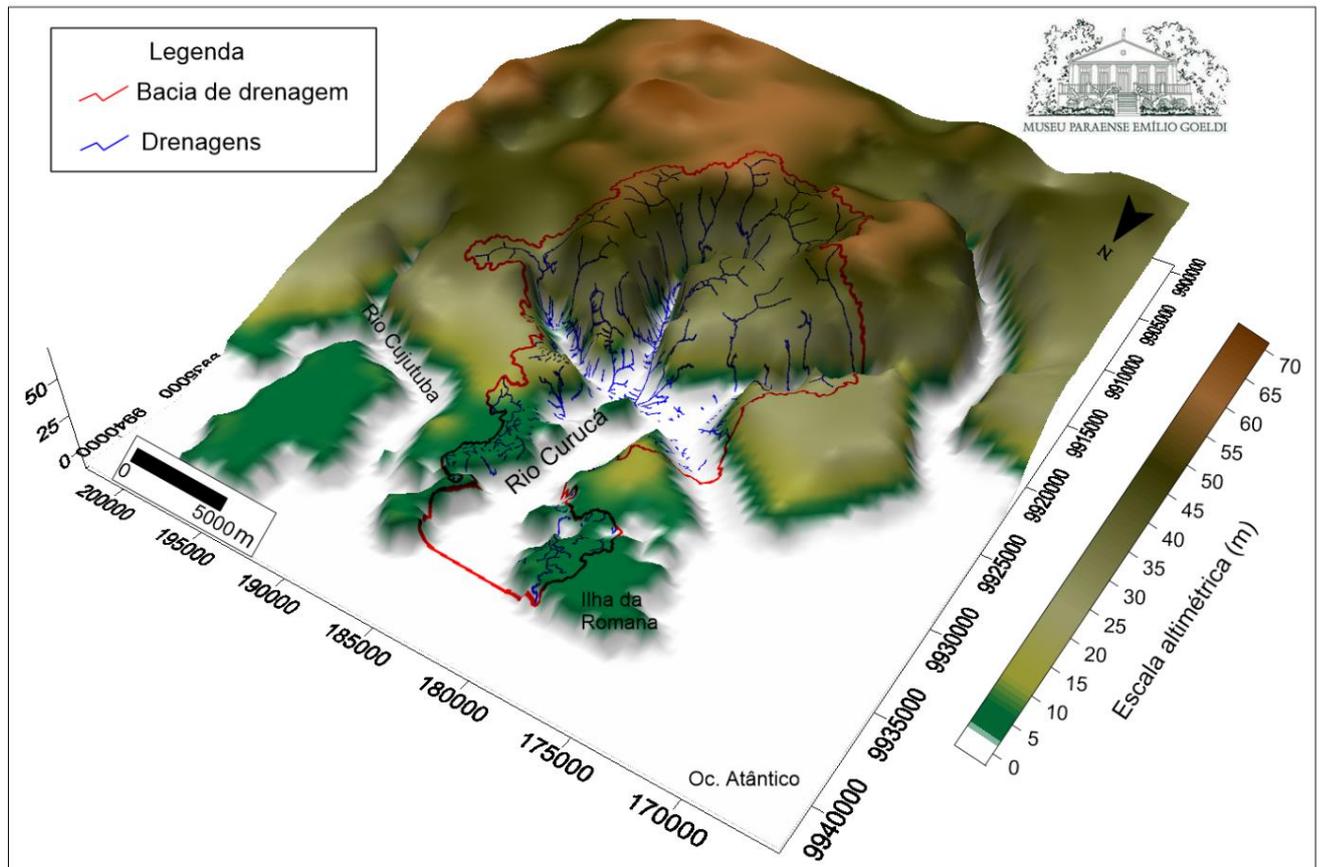


Figura 6 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA, gerado a partir das cotas topográficas da carta Marapanim (Folha SA. 23-V-A-IV).

Cabe ressaltar que em uma primeira abordagem foi realizada a tentativa de desenvolver o MDE a partir de dados SRTM, mas foram detectados problemas como valores espúrios nas áreas da foz do rio, próxima à linha de costa e em áreas que não possuíam valores de altitude. Dessa forma, optou-se por elaborar o MDE a partir de dados altimétricos oriundos da carta planialtimétrica, cuja a precisão e acurácia foram melhores.

Para a razão de relevo da bacia foi obtido valor muito baixo, pois apesar da elevada amplitude altimétrica a bacia contou também com um grande

comprimento axial. A partir desse dado é correto asseverar que, em média, para cada metro que se deslocar da montante para a desembocadura, irá ocorrer um decréscimo de 0,22 cm na altura do terreno. Levando em consideração o baixo valor do índice de rugosidade, pode-se constatar que a bacia apresenta baixa tendência para ocorrer enchentes, pois poucos são os pontos que estão próximos à rede de drenagem. A Tabela 7 mostra os principais parâmetros morfométricos hipsométricos calculados nesse estudo.

Tabela 7 - Parâmetros morfométricos hipsométricos da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Parâmetro Morfométrico	Sigla	Unidade	Valores
Amplitude altimétrica	Hm	m	61,88
Índice de rugosidade	Ir	-	0,06
Maior altitude	Hmáx	m	66,88
Menor altitude	Hmín	m	5,00
Razão de relevo	Rr	m/m	0,0022121

Demarcação de nascentes fluviais

Foram contabilizados um total de 420 pontos extremos dos cursos d'água da bacia (pontos de início de drenagem para os rios e fim de drenagem para os canais de maré), dos quais 302 pontos se localizaram em ambiente definido como planície de maré lamosa, dominados exclusivamente por marés e fortemente influenciados pelos processos dinâmicos dos canais de marés, que são inundados apenas pelas marés astronômicas de sizígia e permanecem expostas durante as marés baixas e incapazes de originar nascentes fluviais.

A Figura 7 mostra a distribuição altimétrica

dos pontos de início de drenagem ao longo do comprimento da bacia. É possível notar que ao se distanciar da foz ocorre um aumento significativo das cotas. Na região do estuário (planície costeira) ocorreu a predominância de canais de maré, que foram demarcados desde a desembocadura até distâncias de 22 quilômetros da mesma. Os cursos d'água fora do ambiente de planície de maré lamosa surgiram a partir das cotas de 14 metros e distâncias de 13 quilômetros, regiões com menos influência do ciclo das marés, seja por possuírem maiores cotas ou se localizarem em regiões mais interioranas.

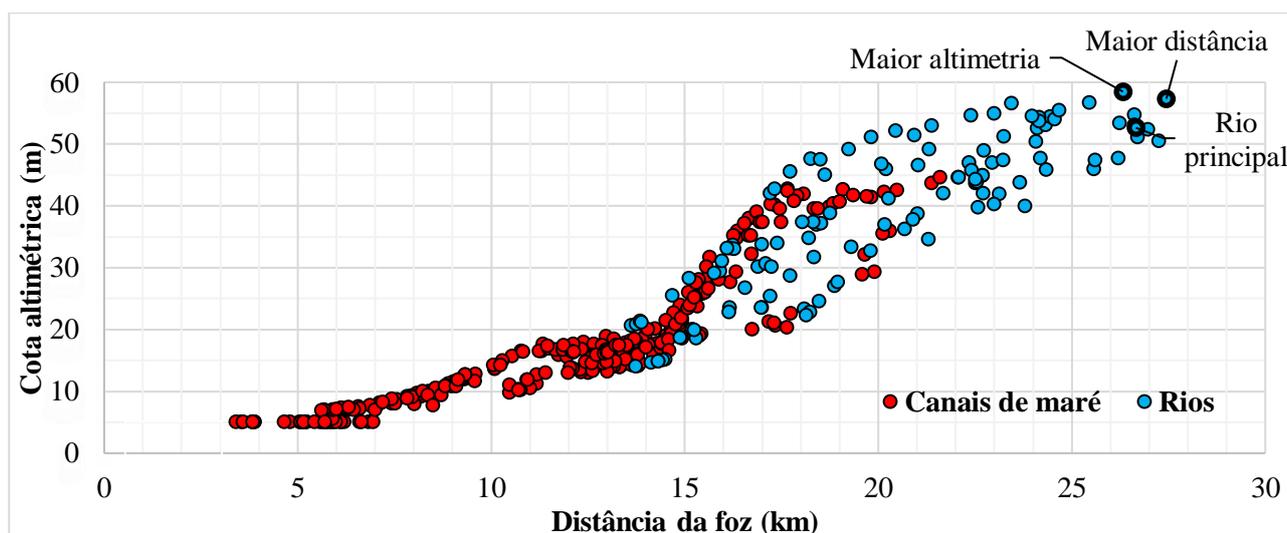


Figura 7 -Distribuição dos pontos das extremidades da rede hidrográfica da bacia hidrográfica do rio Curuçá, Curuçá/PA.

A metodologia de demarcação de nascentes indicou três pontos com a maior probabilidade de se constituírem na nascente do rio Curuçá. Em cada ponto foi considerado um critério diferente (maior cota altimétrica, maior distância da foz e rio principal). A Tabela 8 mostra um resumo das principais características de cada ponto.

A utilização do método de IGC forneceu a localidade de dois pontos com alta possibilidade de serem as nascentes do rio: I) o primeiro ponto apresentou a maior cota altimétrica em relação aos demais, porém não foi o mais distante em relação à foz; II) o segundo ponto apresentou a maior distância da foz e foi o segundo com a maior altimetria. Pelo método do rio principal, a provável localidade da nascente não foi nenhum destes pontos anteriores, porém foi um dos mais distantes e com maiores cotas.

Tabela 8 - Prováveis nascentes do rio Curuçá, Curuçá/PA.

Provável nascente	Critério	Cota altimétrica (m)	Distância retilínea da foz (km)	Coordenadas	
				X	Y
1	Altimetria	58,49	26,32	185.857,17	9.911.713,63
2	Distância	57,34	27,44	184.659,92	9.910.548,50
3	Rio principal	52,64	26,66	178.690,98	9.911.928,34

Como visto na Figura 8, os rios foram demarcados somente na parte sul da bacia devido estarem localizados em setores com as maiores cotas altimétricas. As prováveis nascentes do rio Curuçá se

localizaram no limite sul da bacia, próximas umas às outras. As nascentes 1 e 2 ficaram cerca de 2 km afastadas, enquanto que a nascente 3 ficou mais distante destas, cerca de 6 km.

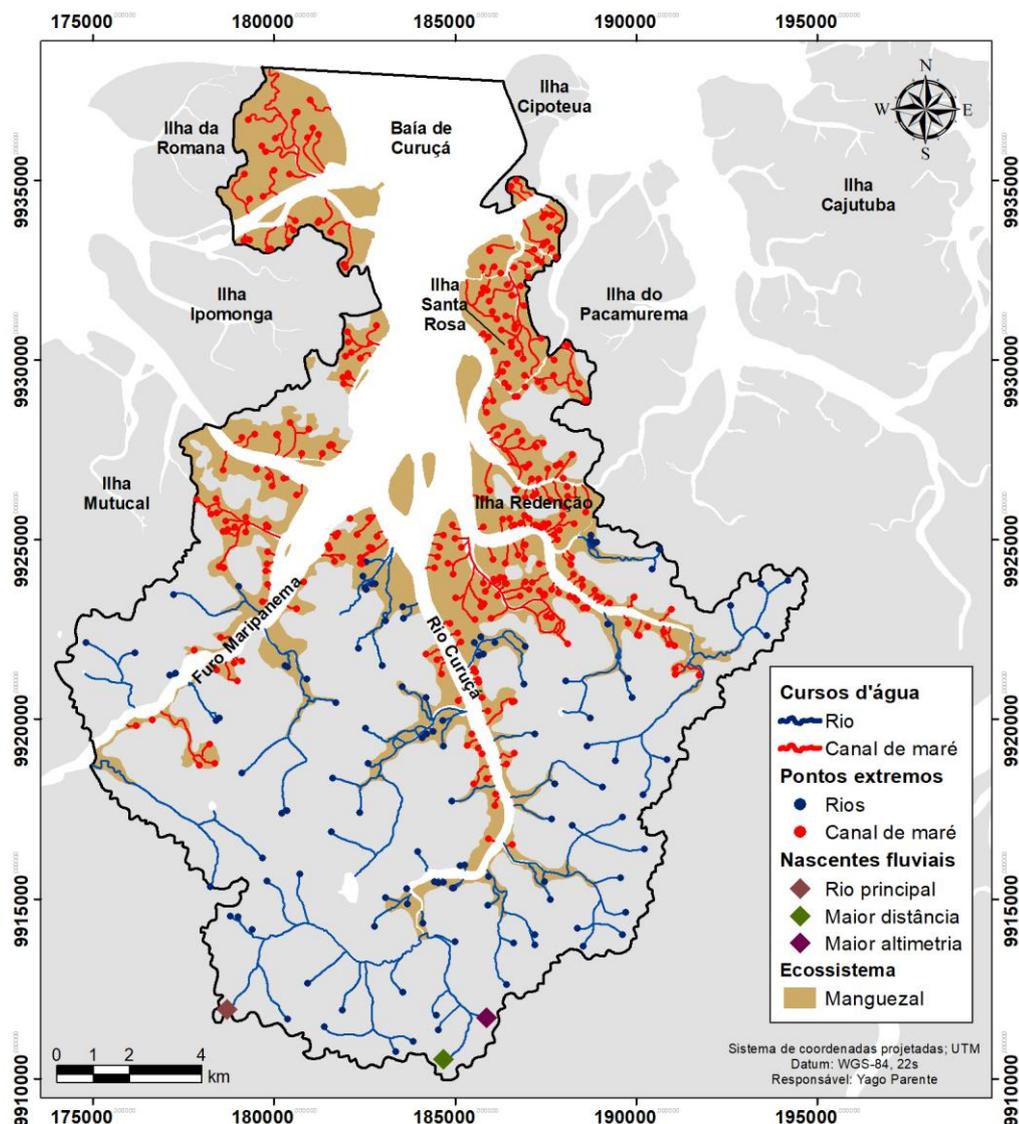


Figura 8 - Pontos das extremidades da rede hidrográfica da bacia de drenagem do rio Curuçá, Curuçá/PA.

4. Conclusão

Os índices morfométricos formam uma base consistente de dados que facilitam a compreensão do relacionamento entre as propriedades físicas da rede de drenagem e suas propriedades dinâmicas, permitindo bons resultados de análise para o monitoramento dos processos hidrológicos

A análise dos dados permitiu caracterizar a bacia de drenagem do rio Curuçá como exorreica, ou seja, com escoamento direcionado para o Oceano Atlântico. Essa bacia se encontra inserida em dois tipos de ambientes geomorfológicos: o planalto costeiro e a planície costeira. O padrão de drenagem da bacia foi qualificado como dendrítico, em que a planície costeira apresentou maior adensamento de cursos d'água de pequenos comprimentos quando

comparados ao planalto costeiro. A bacia foi classificada com o quinto grau hierárquico, sendo que os cursos d'água de primeira ordem ocuparam cerca de 82% do total, concentrando-se na porção mais a norte da bacia, na planície costeira. O rio Curuçá possui dois formatos geométricos. Na sua porção mais continental assemelha-se ao formato meandrante, indicando ausência de controle estrutural, enquanto que o restante apresenta formato retilíneo, sugerindo controle tectônico.

De posse dos resultados dos parâmetros aeriais foi possível concluir que a bacia possui forma alongada, evidenciando pequeno risco de inundações em condições normais de pluviosidade. A bacia registrou os maiores valores de altitude em sua porção mais a sul com cotas que chegaram a cerca de

60 m, enquanto que em sua porção norte foi caracterizada por possuir baixas cotas altimétricas. Em vista disso, foi a região que contou com a maior influência de mares e também foi onde houve a concentração dos canais de maré.

Por meio de técnicas de sensoriamento remoto foram demarcados três pontos de início de drenagem com a maior probabilidade de se localizarem as nascentes do rio Curuçá, cada ponto sendo considerada uma característica prioritária (altitude, distância da foz e rio principal).

Os estudos sobre a morfometria complementam os estudos sobre as bacias hidrográficas, sobretudo por apontarem diretrizes para planejamento e a gestão de sua área. O conhecimento dessas características da bacia hidrográfica é uma ferramenta estratégica na gestão, visto que as informações geradas neste estudo são de elevada importância para a compreensão dos fatores que afetam comportamento hidrológico da bacia. Nesse contexto, este estudo poderá ser usado como instrumento de apoio à tomada de decisão para os órgãos competentes, a fim de minimizar os impactos negativos ao município e à população por meio da adoção de estratégias que sejam compatíveis com os aspectos ambientais, sociais e econômicos da região.

Referências

- Barsi, J.A., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B.L., Pedelty, J.A., 2014. The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sensing* 6, 10230-10251.
- Beltrame, A.deV., 1994. Diagnóstico do Meio Físico de Bacias Hidrográficas: modelo e aplicação. Editora da UFSC, Florianópolis.
- Boulhosa, M.B.M., Sousa Filho, P.W.M., 2008. Reconhecimento e mapeamento dos ambientes costeiros para geração de mapas de ISA ao derramamento de óleo, Amazônia oriental. *Revista brasileira de geofísica* 27, 23-27.
- Carelli, L., Lopes, P.P., 2011. Caracterização fisiográfica da bacia Olhos D'água em Feira de Santana/BA: Geoprocessamento aplicado à análise ambiental. *Boletim Goiano de Geografia* 31, 43-54.
- Cherem, L.T.S., 2008. Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte, UFMG.
- Christofolletti, A., 1980. Geomorfologia. Edgard Blücher, São Paulo.
- Christofolletti, A., 1999. Modelagem de Sistemas Ambientais. Edgard Blücher, São Paulo.
- Corrêa, A. B., Martinelli, J. M., 2009. Composição da População do Camarão-Rosa *Farfantepenaeus subtilis* (Pérez-Farfante, 1936) no Estuário do Rio Curuçá, Pará, Brasil. *Revista Científica da UFPA* 7, 1-18.
- DSG. Diretoria do Serviço Geográfico Brasileiro., 1982. Carta Marapanim, Folha SA. 23-V-A-IV, Escala 1:100.000, Ministério do Exército, Região Norte do Brasil. Carta.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute., 2015. ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 10.4. Software.
- Ferreira, R.G., Moura, M.C.O., Castro, F.S., 2012. Caracterização morfométrica da sub-bacia do ribeirão Panquinhas, ES. *Enciclopédia Biosfera* 8, 2247-2256.
- França, G.V., 1968. Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba. Tese (Doutorado). Piracicaba, USP.
- Golden Software., 2017. Surfer Free Trial, Surface Mapping System for the desktop, version 15.1. Software.
- Gonçalves, N., Santos, A.dos, Aguirre, J., 2016. Identificação da nascente que dá origem aos rios Grande e Pinheiros. *Arquitextos* 188, 01-20.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* 56, 275-370.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2015. Censo Demográfico 2015: Cidades. IBGE, Brasília.
- Leite, N.R., Pereira, L.C.C., Abrunhosa, F., Pires, M.A.B., Costa, R.M., 2010. Occurrence of *Cymbasoma longispinosum* Bourne, 1890 (Copepoda: Monstrilloida) in the Curuçá River estuary (Amazon Littoral). *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 82, 577-583.
- Lima, A.S., Fontes, A.L., 2015. Estudo de parâmetros morfométricos da sub-bacia hidrográfica do rio Jacarecica (SE). *Interespaço* 1, 203-221.
- Mendes, C.A.B., Cirilo, J.A., 2001. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: princípios, integração e aplicação. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.
- Miller, V.C., 1953. A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Technical Report, Dept. Geology, Universidade Columbia, Nova York.
- Oliveira, R.D., 1999. Estudo morfométrico da bacia de drenagem do rio Marapanim. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Belém, UFPA.
- Planet Labs., 2016. Planet Imagery Product Specification: Planetscope & Rapideye. Disponível: https://www.planet.com/products/satelliteimagery/files/1611.09_Spec_Sheet_Combined_Imagery_Product_Letter_DraftV3.pdf. Acesso: 10 fev. 2020.

- Schumm, S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Pertlj Amboy. *Bulletin of the Geological Society of America* 67, 597-646.
- Silva, J.F.B.R.S., 2006. Geoquímica dos sedimentos de manguezais do nordeste do Estado do Pará: um exemplo do estuário do rio Marapanim. Tese (Doutorado). Belém, UFPA.
- Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63, 1117-1142.
- Strahler, A.N., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, in: Chow, V.T. (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology: a compendium of water resources technology*. McGraw Hill, New York, pp. 39 – 75.
- Strahler, A.N., 1986. *Geografia Física*. Ômega, Barcelona.
- Summerfield, M.A., 1991. *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. Longan Scientific & Technical, Essex.
- Tucci, C.E.M., 2001. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.
- Valeriano, M.deM., 2002. Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ministério da Ciência e Tecnologia, São José dos Campos.
- Villela, S.M., Mattos, A., 1975. *Hidrologia Aplicada*. McGRAWHill do Brasil, São Paulo.