



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOSÉ MOTA DE SOUSA NETO**

**INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MDE NA CARACTERIZAÇÃO  
MORFOMÉTRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**

**CRATEÚS**

**2022**

JOSÉ MOTA DE SOUSA NETO

INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MDE NA CARACTERIZAÇÃO  
MORFOMÉTRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N385i Neto, José Mota de Sousa.

Influência da resolução espacial do MDE na caracterização morfométrica da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús / José Mota de Sousa Neto. – 2022.

72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

1. Bacia hidrográfica. 2. Geoprocessamento. 3. MDE. 4. Caracterização morfométrica. I. Título.

CDD 620

---

JOSÉ MOTA DE SOUSA NETO

INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MDE NA CARACTERIZAÇÃO  
MORFOMÉTRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Larissa Granjeiro Lucena  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*A minha avó, Antonia Susana Mota  
(in memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

A meus pais, Conceição Mota e Antonio Soares, por todo o suporte e apoio emocional e financeiro providos a mim ao longo dos anos de curso.

A minha irmã, Suzanne Mota e ao meu sobrinho, Luan Mota pelo companheirismo, pela cumplicidade e pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

A minhas tias Rita Mota, Margarida Mota, Maiza Soares e Ilda Soares, por, muitas vezes, exercerem o papel de mães, dando apoio e suporte em diversos momentos da minha vida.

A Amanda Castro e Michele Pontes, pela amizade incondicional, pelo companheirismo e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que me dediquei a este trabalho.

A Vitória Mota e Guilherme Soares, que são mais do que primos, mas irmãos que me deram apoio incondicional ao longo de toda a minha vida e à realização deste trabalho.

A Jailson Sampaio, por todos os anos de moradia e por todo o companheirismo e cumplicidade ao longo dos anos.

A Daniele Saboia, por toda a amizade, apoio e motivação para que este trabalho fosse plenamente realizado.

Aos meus amigos que ganhei ao longo de minha jornada acadêmica e que se tornaram família: Artur Gevázio, Carolina Mesquita, Zilda Chaves, Samuel Siqueira, Anny Isadora, Maria Giovanna, Marcos Bandeira, Felipe Sousa, Magno Rodrigues, Emanuel Rosendo, Aryane Galvão, dentre outros.

Ao professor Alan Michell, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

*"A ciência é sobre saber, a engenharia é sobre fazer".*

*Henry Petroski*

## RESUMO

A crescente disponibilidade de dados relacionados ao relevo de determinada região possibilitou realizar estudos com maior detalhamento e precisão sobre as bacias hidrográficas. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da resolução espacial do MDE na caracterização morfométrica da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), bem como duas de suas sub-bacias, a bacia do Açude Carnaubal e Açude Colina, representando bacias de menor escala, a partir dos modelos MDEs ALOS RTC 12,5m, SRTM 30m e SRTM 90m, utilizando o software ArcGIS. A delimitação da bacia e a rede de drenagem foram extraídos de modo automático, enquanto os índices morfométricos foram calculados manualmente. Todos os MDEs estudados resultaram na mesma classificação dos índices morfométricos, indicando, de modo geral, a baixa propensão a cheias em todas as bacias, visto que são pertencentes à mesma região hidrográfica. Isso implica que não houve influência direta da resolução na caracterização morfométrica da bacia, ocorrendo variação entre os seus valores, mas não influenciando diretamente nas características. Em relação à área de drenagem, não se notou variações consideráveis entre os três MDEs. A área da RHSC apresenta uma variação média de 0,50% entre os modelos, enquanto as bacias dos açudes Carnaubal e Colina apresentam variações de 0,41% e 0,62% entre seus respectivos valores. Isso indica que, apesar de haver uma maior precisão na caracterização de bacias com menores escalas, não há diferenças expressivas que possam influenciar nos resultados finais. Diante do comparativo entre os MDEs, constatou-se que o MDE de resolução média (SRTM 30m) demonstrou ser o modelo de maior eficiência, considerando-se a precisão no processamento das bacias, que não aponta diferenças expressivas nos resultados, em relação ao MDE de alta resolução (ALOS), e considerando as etapas do geoprocessamento, coleta e análise de dados, visto que o SRTM 30m resulta em uma análise mais rápida e igualmente precisa dos dados da bacia hidrográfica, bem como sua devida caracterização morfométrica.

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica, Geoprocessamento, MDE, Caracterização morfométrica.

## ABSTRACT

The growing availability of data related to the relief of a region made it possible studies with greater detail and precision about the watersheds. The objective of this work was to analyze the influence of the spatial resolution of the DEM on the morphometric characterization of the Hydrographic Region of Sertões de Crateús (HRSC), as well as two of its sub-basins, the Açude Carnaubal and Açude Colina basins, representing smaller-scale basins, from the DEM ALOS RTC 12.5m, SRTM 30m and SRTM 90m models, using the ArcGIS software. The delimitation of the basin and the drainage network were extracted automatically, while the morphometric indices were manually calculated. Each DEM studied resulted in the same classification of morphometric indices, indicating the low propensity to floods in all basins, since they belong to the same hydrographic region. This implies that there was no direct influence of the resolution on the morphometric characterization of the basin, with variation between its values, but not directly influencing the characteristics. Regarding the drainage area, there were no considerable variations between the DEMs. The HRSC area presents an average variation of 0.50%, while the Carnaubal and Colina reservoirs present variations of 0.41% and 0.62% between their respective values. This indicates that, although there is greater precision in the characterization of basins with smaller scales, there are no significant differences that may influence the final results. In view of the comparison between the DEMs, it was found that the medium resolution DEM (SRTM 30m) proved to be the most efficient model, considering the precision in the processing of the basins, which does not indicate significant differences in the results, in relation to the high resolution DEM (ALOS), and considering the stages of geoprocessing, collection and analysis, since the SRTM 30m results in a faster and equally accurate analysis of the watershed data, as well as its proper morphometric characterization.

**Keywords:** Watershed, Geoprocessing, DEM, Morphometric Characterization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Interface geral do ArcMap 10.3 .....   | 21 |
| Figura 2 - Extensão Média do Escoamento Superficial .....   | 31 |
| Figura 3 - Hierarquia dos cursos d'água segundo Método de Strahler .....  | 32 |
| Figura 4 - Bacia dos Sertões de Crateús.....  | 35 |
| Figura 5 - Municípios da Bacia Hidrográfica do Açude Carnaubal .....  | 38 |
| Figura 6 - Fluxograma com as etapas executadas pelo ArcHydro .....  | 40 |
| Figura 7 - Comparativo entre a delimitação da RHSC para as diferentes resoluções de MDE.....                      | 42 |
| Figura 8 - Rede de drenagem da RHSC obtida pelos diferentes MDE.....  | 44 |
| Figura 9 - Curva hipsométrica RHSC com base no ALOS .....   | 48 |
| Figura 10 - Hierarquização dos rios da RHSC, processado pelo SRTM1 (30m) .....                                    | 49 |
| Figura 11 - Comparativo entre a delimitação da Bacia do Açude Carnaubal para as diferentes resoluções de MDE..... | 50 |
| Figura 12 - Comparativo entre as redes de drenagem obtidos dos MDEs para a Bacia do açude Carnaubal .....         | 52 |
| Figura 13 - Curva hipsométrica Açude Carnaubal, com base no MDE ALOS .....  | 56 |
| Figura 14 - Hierarquização dos rios da Bacia do Açude Carnaubal, processado pelo SRTM1 (30m) .....                | 57 |
| Figura 15 - Comparativo entre a delimitação da Bacia do Açude Colina para as diferentes resoluções de MDE .....   | 58 |
| Figura 16 - Comparativo entre as redes de drenagem obtidos dos MDEs para a Bacia do açude Colina.....             | 61 |
| Figura 17 - Curva hipsométrica Açude Colina, com base no MDE ALOS .....   | 63 |
| Figura 18 - Hierarquização dos rios da Bacia do Açude Colina, processado pelo SRTM1 (30m) .....                   | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação das densidades de drenagem .....   | 26 |
| Tabela 2 - Classificação dos coeficientes de compacidade .....  | 27 |
| Tabela 3 - Classificação da Amplitude Altimétrica .....   | 28 |
| Tabela 4 - Classificação dos Índices de Circularidades .....  | 29 |
| Tabela 5 - Classificação dos índices de sinuosidade .....   | 29 |
| Tabela 6 - Classificação dos fatores de forma.....  | 30 |
| Tabela 7 - Principais reservatórios e capacidade de acumulação.....   | 34 |
| Tabela 8 - Percentual da área dos municípios inseridos total ou parcialmente na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús..... | 36 |
| Tabela 9 - Temperaturas máximas, médias e mínimas (°C) em Crateús .....   | 36 |
| Tabela 10 - Descrição das variações comparadas entre os MDEs .....  | 41 |
| Tabela 11 - Características geométricas da RHSC .....   | 43 |
| Tabela 12 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e SRTM3 na RHSC .....                                   | 45 |
| Tabela 13 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e ALOS na RHSC .....                                    | 45 |
| Tabela 14 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM3 e ALOS na RHSC .....                                    | 45 |
| Tabela 15 - Características Morfométricas obtidas para a RHSC .....   | 47 |
| Tabela 16 - Características geométricas da bacia do açude Carnaubal .....   | 51 |
| Tabela 17 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e SRTM3 na Bacia Carnaubal .....                        | 53 |
| Tabela 18 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e ALOS na Bacia Carnaubal .....                         | 53 |
| Tabela 19 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM3 e ALOS na Bacia Carnaubal .....                         | 53 |
| Tabela 20 - Características Morfométricas obtidas para a Bacia do Açude Carnaubal .....   | 55 |
| Tabela 21 – Características geométricas da Bacia do Açude Colina .....  | 59 |
| Tabela 22 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e SRTM3 na Bacia do Açude Colina .....                  | 59 |
| Tabela 23 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e ALOS na Bacia do Açude Colina .....                   | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 24 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM3 e ALOS na<br>Bacia do Açude Colina ..... | 60 |
| Tabela 25 - Características Morfométricas obtidas para a Bacia do Açude Colina .....                             | 62 |

## SUMÁRIO

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | INTRODUÇÃO.....  | 14 |
| 2      | OBJETIVOS .....  | 17 |
| 2.1    | Objetivo geral.....  | 17 |
| 2.2    | Objetivos específicos .....                                      | 17 |
| 3      | REFERENCIAL TEÓRICO .....  | 18 |
| 3.1    | Bacia Hidrográfica .....   | 18 |
| 3.2    | Sistemas de Informações Geográficas (SIG).....                   | 19 |
| 3.2.1  | <i>ArcGIS</i> .....  | 20 |
| 3.2.2  | <i>ArcHydro</i> .....  | 21 |
| 3.3    | Modelos Digitais de Elevação (MDE) .....                         | 22 |
| 3.3.1  | <i>Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)</i> .....             | 22 |
| 3.3.2  | <i>Advanced Land Observing Satellite (ALOS/ PALSAR)</i> .....    | 23 |
| 3.4    | Caracterização Morfométrica.....                                 | 24 |
| 3.4.1  | <i>Área de Drenagem e Perímetro</i> .....                        | 25 |
| 3.4.2  | <i>Comprimento total dos cursos d'água e Rio Principal</i> ..... | 25 |
| 3.4.3  | <i>Densidade de drenagem (Dd)</i> .....                          | 26 |
| 3.4.4  | <i>Coeficiente de compacidade (Kc)</i> .....                     | 27 |
| 3.4.5  | <i>Amplitude altimétrica (Hm)</i> .....                          | 27 |
| 3.4.6  | <i>Índice de circularidade (Ic)</i> .....                        | 28 |
| 3.4.7  | <i>Índice de sinuosidade (IS)</i> .....                          | 29 |
| 3.4.8  | <i>Fator de forma (Kf)</i> .....                                 | 30 |
| 3.4.9  | <i>Índice de rugosidade (Ir)</i> .....                           | 30 |
| 3.4.10 | <i>Extensão média do escoamento superficial (I)</i> .....        | 31 |
| 3.4.11 | <i>Ordem dos cursos d'água</i> .....                             | 31 |
| 3.4.12 | <i>Hipsometria</i> .....   | 32 |
| 4      | MATERIAIS E MÉTODOS.....   | 32 |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>4.1</b>   | <b>Caracterização das áreas de estudo .....</b>                       | <b>33</b> |
| <b>4.1.1</b> | <b><i>Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC) .....</i></b> | <b>33</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b><i>Açude Carnaubal .....</i></b>                                   | <b>37</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b><i>Açude Colina.....</i></b>                                       | <b>39</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Dados e software utilizado.....</b>                                | <b>39</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b><i>Fonte de dados .....</i></b>                                    | <b>39</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b><i>Processamento dos dados .....</i></b>                           | <b>40</b> |
| <b>4.2.3</b> | <b><i>Comparativo entre os resultados .....</i></b>                   | <b>41</b> |
| <b>5</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                    | <b>42</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>RHSC.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>5.2</b>   | <b>Açude Carnaubal .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>5.3</b>   | <b>Açude Colina.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>5.4</b>   | <b>Análise comparativa dos resultados.....</b>                        | <b>65</b> |
| <b>6</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                     | <b>68</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                               | <b>70</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Collischon e Dornelles (2013), a bacia hidrográfica é um componente geográfico e hidrológico, definida por uma determinada região que abrange a drenagem de uma rede de corpos de água, ligados a um rio principal e direcionados a um mesmo ponto, na porção mais baixa da área topográfica, este denominado exultório. Sua delimitação depende de fatores geográficos, definidos através das estruturas de relevo da região, como morros, serras, picos e chapadas. Com essas informações de relevo, geralmente obtidas de um mapa topográfico, é possível identificar os divisores de água.

De acordo com Silva et al. (2015), a bacia hidrográfica pode ser considerada como a unidade de controle para as entradas e saídas de fluxos contínuos de materiais, sendo a sua delimitação uma ferramenta essencial no planejamento e gerenciamento dos recursos disponíveis, pois nortearão as ações quanto à utilização, bem como a produção de bens e serviços.

Há diversos fatores que podem influenciar no comportamento de uma bacia hidrográfica, como o clima, o solo, a vegetação, etc. Além disso, outros fatores que influenciam, especialmente com relação ao movimento da água através da bacia, são os fatores morfométricos (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Essas características morfométricas da bacia hidrográfica estão associadas ao relevo e representam uma série de parâmetros fisiográficos que visam obter uma melhor compreensão da dinâmica da bacia, como a área, perímetro, comprimento dos cursos de água, entre outros. A análise morfométrica, além de apresentar um conjunto de dados quantitativos da hidrografia e formas topográficas de uma bacia hidrográfica, são a base para outros estudos mais complexos, como estudos geomorfológicos, desastres naturais associados a dinâmicas de vertentes fluviais, impactos ambientais, etc. (SCHNORR; SCCOTI; PETSCH, 2021).

Com os avanços das tecnologias e dos métodos de estudos geográficos e hidrológicos, tornou-se possível realizar essas análises de forma automatizada e, conseqüentemente mais precisa, em relação aos métodos manuais de delimitação das bacias. Dessa forma, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) apresentam-se como uma alternativa precisa e eficiente para obtenção de informações geográficas. Os MDE, processados através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), podem obter resultados bastante satisfatórios acerca da caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica, visto que se trata de um processo automatizado. Os SIG são amplamente

utilizados nos estudos de cunho ambiental, possibilitando a obtenção de produtos voltados para um planejamento e adequabilidade das ações econômicas exercidas no espaço geográfico (SCHNORR; SCCOTI; PETSCH, 2021).

Os modelos digitais de elevação (MDE) são exemplos significativos de representação em escala reduzida do espaço geográfico, de posse de uma matriz formada por *pixels* com valores distintos de altitude, podemos analisar as diferenças topográficas de uma determinada área (SCHNORR; SCCOTI; PETSCH, 2021), além de possibilitar a obtenção de outros parâmetros, como a declividade, índices de rugosidade, entre outros.

A crescente disponibilidade gratuita de MDE a partir do ano 2000 com as missões SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e ALOS PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite/ Phase Array type Lband Synthetic Aperture Radar*) promoveram um ganho enorme para a comunidade científica, devido à possibilidade de realizar estudos em escala de maior detalhe e precisão de maneira gratuita (CUNHA; BACANI, 2019).

Com essa maior disponibilidade de MDE, surgiram também modelos com melhores resoluções e qualidade dos dados. A disponibilização do MDE SRTM 3 arc ~90m, proporcionou maiores possibilidades em relação à obtenção de conhecimentos sobre o território. No entanto, esse MDE contém imperfeições caracterizadas por depressões espúrias, picos anômalos, pontos ou áreas com ausência de dados, além de apresentar uma baixa resolução espacial (CUNHA; BACANI, 2019). Dessa forma, após um processo de refinamento e correção de erros, foi disponibilizado, em 2014, o MDE SRTM 1 arc ~30m, com uma melhor resolução espacial. Em seguida foi disponibilizado o MDE ALOS/RTC (*Radiometric Terrain Corrected*), com alta resolução espacial (~12,5m), proporcionando, assim, uma melhor qualidade dos dados.

Diante disso, levanta-se o questionamento acerca da influência das diferentes resoluções dos MDE na delimitação de bacias hidrográficas e sua caracterização morfométrica. Surge a hipótese de que resoluções maiores produzem resultados mais precisos, em comparação a resoluções mais baixas. Também surge o questionamento relacionado à escala das regiões de estudo, onde bacias hidrográficas de grande porte seriam comparadas a bacias de menor magnitude, como as microbacias de corpos d'água de médio e pequeno porte.

O estudo acerca da influência da resolução espacial do MDE é importante para se obter uma maior eficiência acerca dos processamentos de dados geográficos,

relacionados principalmente à hidrologia e recursos hídricos. Utilizar o MDE mais adequado para determinada finalidade proporciona maior velocidade de processamento e pode exigir menos poder de processamento computacional.

Dessa forma, o presente trabalho irá buscar realizar um estudo acerca da influência da resolução espacial dos modelos digitais de elevação na caracterização morfométrica da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), avaliando a precisão dos modelos e realizando um comparativo entre os parâmetros obtidos através de cada MDE, no intuito de apontar o modelo com maior eficiência e viabilidade de processamento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar a influência da resolução espacial dos MDEs na caracterização morfométrica da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús.

### **2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos para a plena realização deste trabalho, pode-se citar os seguintes.

- Realizar a extração da delimitação das bacias RHSC, Carnaubal e Colina, bem como suas respectivas redes de drenagem;
- Obter, através de softwares de geoprocessamento, características físicas e geométricas das bacias RHSC, Carnaubal e Colina;
- Realizar o cálculo dos índices morfométricos das bacias hidrográficas estudadas;
- Calcular as variações médias dos parâmetros das bacias, obtidos entre os três modelos digitais de elevação;
- Realizar o comparativo entre os três MDEs na caracterização morfométrica das bacias;
- Verificar a influência da escala da bacia hidrográfica na obtenção dos parâmetros morfométricos;
- Analisar a viabilidade da utilização do MDE de alta resolução na caracterização física das bacias.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Bacia Hidrográfica

A água precipitada alcançando a superfície percorre diversos caminhos até chegar às calhas dos rios para formar o escoamento fluvial. Parte da chuva infiltra-se na superfície terrestre e, movendo-se lentamente pelo meio poros, alimenta as calhas dos rios, garantindo-lhes uma certa sustentação do escoamento fluvial nos períodos não chuvosos. Outra parte, movendo-se mais rapidamente sobre a superfície, chega às calhas fluviais provocando mudanças mais abruptas no regime dos cursos d'água (RAMOS et al., 1989).

De acordo com Ramos et al. (1989), uma bacia hidrográfica pode ser definida como a área onde a precipitação é coletada e conduzida para seu sistema de drenagem natural, isto é, uma área composta de um interrelacionado sistema de drenagem natural onde o movimento de água superficial inclui todos os da água e do solo existentes na localidade.

Segundo Collischonn et al. (2013), a bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico sujeito a entradas de água (eventos de precipitação) que geram saídas de água (escoamento e evapotranspiração). A bacia hidrográfica transforma uma entrada concentrada no tempo (precipitação) em uma saída relativamente distribuída no tempo (escoamento).

Uma bacia hidrográfica é, normalmente, definida por um curso de água, um ponto ou seção transversal desse curso de água, que pode ser chamado de exutório, e por informações do relevo. Com as informações de relevo, normalmente obtidas de um mapa topográfico, é possível identificar os divisores de água (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Segundo Ramos et al. (1989), duas áreas de drenagem podem ser consideradas fisicamente independentes quando está em estudo os fenômenos que ocorrem em uma ou outra área, mas são interdependentes quando se considera a bacia hidrográfica maior à qual essas áreas estão integradas.

Ramos et al. (1989) também citam que essa integração de áreas de drenagem faz-se cada vez mais necessária à medida que a água tem se tornado um dos fatores limitantes do desenvolvimento harmônico de uma sociedade. A água é necessária à agricultura, uso doméstico, comercial e à recreação, e seu uso indevido pode causar

efeitos destrutivos de degradação da região, bem como aumentar o custo do desenvolvimento e diminuir a qualidade de vida nas regiões a jusante.

### **3.2 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**

Com a evolução da informática, surgiram novas possibilidades de análises estratégicas para o auxílio na tomada de decisão. A possibilidade de visualização dos resultados das análises, especialmente em um mapa, faz com que a compreensão por intermédio do analista seja de forma facilitada e clara. Esse tipo de tecnologia é chamado de Sistema de Informação Geográfica (SIG), mas essa tecnologia já era usada bem antes da invenção do computador (FELIZARDO, 2016)

As áreas adjacentes aos rios são constantemente degradadas e exploradas pela sociedade, assim, para melhor gerenciá-las é imprescindível que a informação seja sistematizada com utilização de sistemas que articulem essas informações, de modo a processá-las para gerar subsídios às intervenções porventura sejam necessárias sua adequada operação, prevenindo e controlando processos naturais ou de ações antrópicas nas bacias hidrográficas (MENDES; CIRILO, 2013).

O termo Geoprocessamento tem sido usado para caracterizar uma área multidisciplinar, que envolve conhecimentos de diferentes disciplinas, como por exemplo, Geografia, Cartografia, Ciência da Computação, Sensoriamento Remoto, Fotogrametria, Levantamento de Campo, Geodésia, Estatística, Pesquisas Operacionais, Matemática, Engenharia, etc (FILHO, 1995).

Um sistema de geoprocessamento tem por objetivo o processamento de dados referenciados geograficamente, desde a coleta até a geração e a exibição das informações por meio de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais e gráficos, entre outros (SILVA, 2006).

De acordo com Câmara et. al (2001),

O termo sistemas de informação geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. A principal diferença de um SIG para um sistema de informação convencional é sua capacidade de armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos diferentes tipos de dados geográficos.

Os programas computacionais de SIG possuem ferramentas para manipular os dados geográficos a fim de produzir informações geográficas. Esses programas possuem ferramentas para exibirem dados e informações geográficas, ferramentas para realizar edição, alteração e transformação de dados geográficos, ferramentas para medir distâncias e áreas, ferramentas para combinar mapas, entre outras (FERREIRA, 2006).

Uma das vantagens dos SIG é que eles podem manipular dados gráficos e não-gráficos de forma integrada, provendo uma forma consistente para análise e consulta envolvendo dados geográficos. Pode-se permitir, por exemplo, acesso a registros de imóveis a partir de sua localização geográfica. Além disso, podem fazer conexões entre diferentes entidades, baseados no conceito de proximidade geográfica (FILHO, 1995).

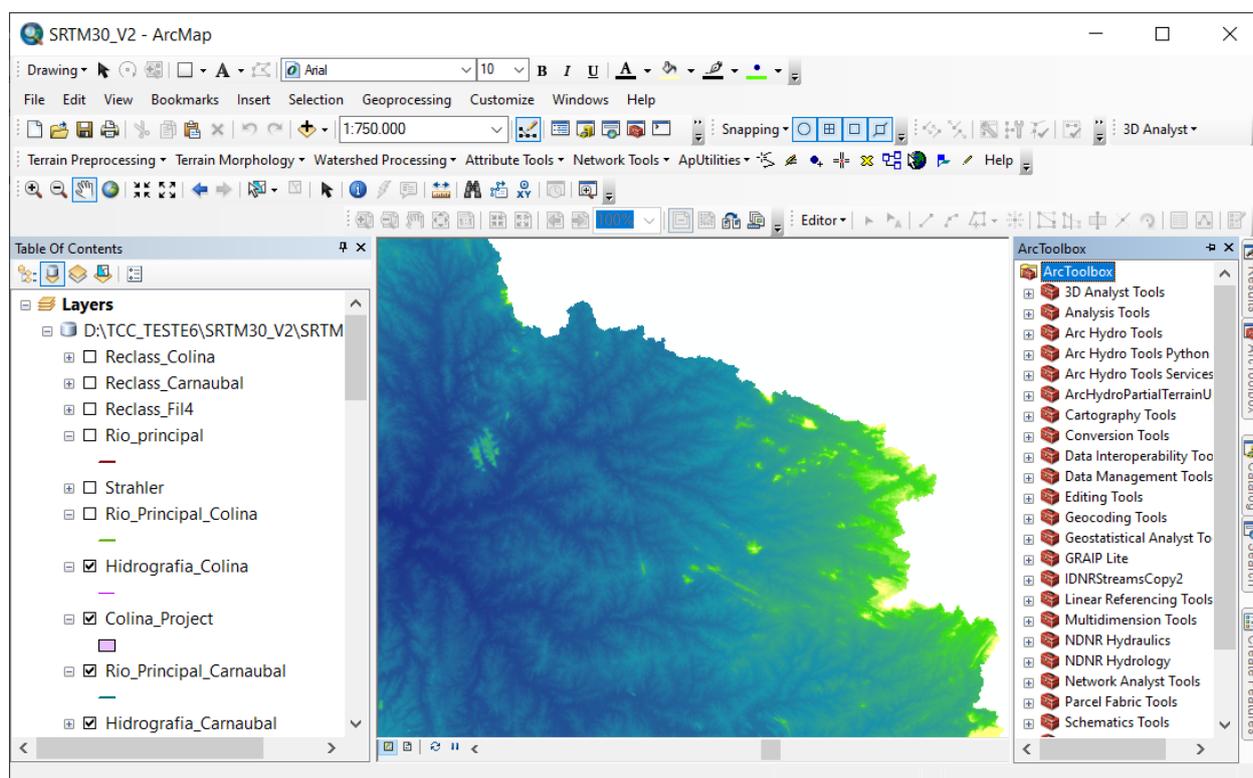
### **3.2.1 ArcGIS**

O ArcGIS é um sistema de informação geográfica (*Geographic Information System – GIS*) utilizado para criar, gerenciar, compartilhar e analisar dados espaciais. O sistema fornece uma infraestrutura para criar mapas e buscar informações geográficas. O ArcGIS é um produto da empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), um fornecedor internacional de sistemas de informações geográficas (GIS) software, GIS web e aplicativos de gerenciamento de banco de dados geográficos.

Dentre as diversas funções disponíveis no software, as principais são criação e utilização de mapas; compilação de dados geográficos; análise de informações mapeadas; compartilhamento e descoberta de informações geográficas; utilização de mapas e informações geográficas em uma gama de aplicações; e gestão de informação geográficas numa base de dados.

O ArcMap é o aplicativo utilizado para visualizar, editar e consultar dados geoespaciais, além de possibilitar a criação de mapas. A interface do ArcMap (Figura 1) tem duas seções principais, incluindo uma tabela de conteúdos à esquerda e o (s) quadro (s) de dados que exibem o mapa. Os itens no índice correspondem a camadas no mapa.

Figura 1 - Interface geral do ArcMap 10.3



Fonte: elaboração própria

### 3.2.2 *ArcHydro*

Além das funcionalidades nativas presentes no ArcGIS, também é possível adicionar extensões ao software, visando ampliar as possibilidades de processamento em áreas mais específicas, como recursos hídricos.

Dessa forma, a *ArcHydro* consiste em um modelo de dados, ferramentas e fluxos de trabalho desenvolvidos ao longo dos anos para apoiar implementações específicas de SIG em recursos hídricos (ESRI, 2022).

A *ArcHydro* ajuda a construir um conjunto de dados fundamental que possa ser usado em análises e para integração com modelos de recursos hídricos. Ele padroniza as estruturas de dados de água para que possam ser usados de forma consistente e eficiente para resolver uma gama mais ampla de problemas de recursos hídricos em qualquer escala — regional, nacional ou internacional (ESRI, 2022).

### 3.3 Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Tradicionalmente, os estudos de hidrologia estiveram baseados em mapas topográficos para a caracterização de bacias hidrográficas. A partir da década de 1970, a popularização dos computadores permitiu que fossem criadas formas de representar o relevo digitalmente, permitindo a armazenagem e processamento de dados topográficos de uma forma prática para análises hidrológicas (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013)

De acordo com Namikawa et al. (2003), um Modelo Digital de Terreno (MDE) ou Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Dados de relevo, informações geológicas, profundidades de um rio e informações meteorológicas são exemplos típicos de fenômenos representados por um MDE.

O uso de MDE é a forma mais prática, rápida e menos subjetiva de obter as informações geográficas necessárias na delimitação de bacias. Eles podem ser gerados a partir da modelagem de dados altimétricos, como pontos tridimensionais ou curvas de níveis, obtidos por levantamentos topográficos, bases cartográficas, dados de GPS, entre outras fontes ou derivados a partir de sensoriamento remoto orbital (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Várias metodologias têm sido desenvolvidas com intuito de se construir modelos digitais de terreno que representem a superfície terrestre de forma mais fidedigna. Os erros encontrados nos modelos digitais de elevação são em geral, função do método de obtenção dos dados utilizados e do tipo de modelagem utilizada em sua confecção (SILVA, 2013).

#### 3.3.1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Lançado em 2000 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) gerou o primeiro modelo digital de elevação gratuito. A SRTM foi pilotada a bordo do ônibus espacial *Endeavour* de 11 a 22 de fevereiro de 2000 e foi realizada em conjunto pela agência espacial norte-americana (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*), a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), o Departamento de Defesa

dos Estados Unidos (DoD) e as agências espaciais alemã (DLG) e italiana (ASI) em fevereiro de 2000, para mapear o relevo da área continental da Terra com interferometria de radar de abertura sintética (InSAR), entre 60° de latitude norte e 54° de latitude sul, o que corresponde à aproximadamente 80% das áreas emersas do planeta (GROHMANN; RICCOMINI; STEINER, 2008)

Segundo Bispo et al. (2010), a existência desses dados em cobertura nacional permite que se avalie e se desenvolva seu potencial para o mapeamento da vegetação de forma relativamente padronizada em diferentes ambientes. Os dados SRTM são passíveis de derivação em variáveis morfométricas (ou, na denominação mais recente, geomorfométricas) para expressão das diferentes características do relevo, o que resulta num conjunto de dados em complemento à altimetria.

Com a liberação do MDE SRTM 3 arc ~90m para a América do Sul, em 2003, ocorreu uma expectativa com relação aos ganhos de conhecimento sobre nosso território, justificada pela carência geral de dados topográficos em escalas adequadas (CUNHA; BACANI, 2019). No entanto, esse MDE contém imperfeições caracterizadas por depressões espúrias, picos anômalos, pontos ou áreas com ausência de dados, além de apresentar uma baixa resolução espacial.

Na busca de corrigir essas falhas, a Embrapa Monitoramento por Satélite, com o objetivo de construir uma base nacional de dados topográficos, disponibilizou um MDE de melhor qualidade para todo o território nacional. A partir de setembro de 2014 foi disponibilizado o MDE SRTM 1 arc ~30 m, com uma média resolução espacial para a América do Sul (CUNHA; BACANI, 2019).

### **3.3.2 *Advanced Land Observing Satellite (ALOS/ PALSAR)***

As imagens da missão SRTM disponíveis podem não ser suficientes para a caracterização de determinadas feições devido a resolução espacial máxima alcançada por este tipo de imagem. O MDE SRTM é distribuído na resolução de 30 metros para o território dos Estados Unidos e de 90 metros para as demais áreas continentais. O Brasil possui estes dados na resolução de 30 metros derivados de interpolação dos modelos de 90 metros (VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

Em outubro do mesmo ano, foi liberado o MDE ALOS/RTC (*Radiometric Terrain Corrected*) de alta resolução espacial (12,5 metros) pela *Alaska Satellite Facility*. Esses dados incluídos no projeto RTC são feixes finos e cenas polarimétricas em todas

as áreas terrestres globais, exceto na Antártica, na Groenlândia, na Islândia e no norte da Eurásia.

De acordo com a EMBRAPA (2018), o satélite ALOS foi lançado em 2006 pela *Japan Aerospace Exploration Agency* – JAXA, no centro espacial de Tanegashima (Japão) e entrou na fase operacional e fornecimento de dados ao público no mesmo ano. Sua operação foi concluída em 2011. A ele foram incorporadas características necessárias aos satélites modernos de alta resolução: a grande velocidade e capacidade de tratamento dos dados e a precisão avançada na determinação de seu posicionamento espacial.

Os vários produtos derivados da ALOS contribuem amplamente para o avanço da ciência, bem como para campos de aplicação, como gestão de recursos naturais, monitoramento de desastres e mitigação de danos e desenvolvimento e planejamento regional. O programa de ciências ALOS busca promover pesquisas científicas e aplicações. Esta pesquisa contribui para medir mudanças no terreno e nos cursos d'água devido à erosão do solo, bem como para classificar e analisar características do terreno com dados de elevação.

O sistema foi desenvolvido prioritariamente para fomentar pesquisas científicas e aplicadas na área de sensoriamento remoto e prover o Japão e países da Ásia do Pacífico com dados cartográficos que pudessem oferecer subsídios ao estudo de temas ligados ao desenvolvimento sustentável, monitoramento de desastres naturais e recursos naturais (EMBRAPA, 2018).

### **3.4 Caracterização Morfométrica**

Há diversos fatores que influenciam na dinâmica de uma bacia hidrográfica. Características como o relevo, solo, clima e vegetação podem determinar as características e comportamentos acerca dos diferentes itens que compõem a formação da bacia, de modo geral. Além desses fatores, outras características também são de grande relevância, como a morfometria. As características morfométricas de uma bacia hidrográfica estão associadas ao relevo, e incluem a área de drenagem, o comprimento do curso de água principal, e a declividade (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013)

Segundo Costa (2015), o uso da morfometria em diagnóstico de bacias hidrográficas possibilita explicar interações que ocorrem entre os elementos da paisagem. Descreve as características sobre o sistema fluvial e a modelagem do relevo,

que em associação com a dinâmica de uso da terra permite identificar os principais vetores que atuam sobre as transformações das paisagens locais, mediante as alterações antrópicas e naturais.

Os índices calculados da morfometria são importantes para se obter um estudo hidrológico, e com grande relevância para poder se definir prioridades de gestão e elaboração de planos de ações (GOMES, 2016).

### **3.4.1 Área de Drenagem e Perímetro**

De acordo com (TUCCI, 1993), a área da bacia é um dado fundamental pra definir a potencialidade hídrica da bacia hidrográfica, uma vez que a multiplicação dessa área pela altura da lâmina d'água precipitada possibilita definir o volume de água recebido pela bacia. A área é um dado fundamental para definir a potencialidade hídrica de uma bacia, uma vez que a bacia é a região de captação da água da chuva. (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). A área é representada em quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>), drenada pelo conjunto do sistema fluvial da bacia, abrangendo toda a hidrografia. Além disso, é um elemento essencial para o cálculo das outras características físicas da bacia, como o fator de forma e o índice de circularidade.

De forma análoga à área de drenagem, o perímetro representa uma das características geométricas base para a obtenção de outras variáveis morfométricas da bacia, em sua caracterização. Ele delimita o comprimento do contorno da bacia hidrográfica ao longo do divisor de águas que delimita sua área. Os valores de perímetro são dados em quilômetros (km).

### **3.4.2 Comprimento total dos cursos d'água e Rio Principal**

Além da área e perímetro da bacia, é necessário definir as características geométricas acerca da sua hidrografia. Estas são o comprimento total dos cursos d'água e o comprimento do curso d'água - ou rio - principal.

O tempo que a água leva para escoar ao longo de um rio depende da velocidade da água e da distância a ser percorrida. A distância que deve ser percorrida pela água da chuva até chegar ao exutório da bacia depende do ponto de origem da

água. (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Uma importante característica da bacia hidrográfica é o comprimento do seu curso d'água principal ( $L_t$ ).

O curso d'água principal pode ser definido como o mais longo caminho que a água pode percorrer dentro de uma bacia hidrográfica. Já o comprimento total dos cursos d'água ( $L$ ) é o resultado da soma dos comprimentos de todos os trechos de rios ao longo da bacia hidrográfica.

### 3.4.3 Densidade de drenagem ( $Dd$ )

A densidade de drenagem ( $Dd$ ) é expressa pela relação entre o somatório de todos os comprimentos de cursos de água da bacia ( $L$ ) e a área total de drenagem da bacia ( $A$ ).

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (1)$$

Esse índice é indicativo da maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, dando uma ideia a respeito do grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia (GUARIZ, 2008).

De acordo com Christofolletti (1980), o cálculo da densidade de drenagem é importante na análise das bacias hidrográficas porque apresenta relação inversa com o comprimento dos rios. À medida que aumenta o valor numérico da densidade, há diminuição quase proporcional do tamanho dos componentes fluviais das bacias de drenagem.

A densidade de drenagem pode ser classificada, de acordo com Christofolletti (1980), como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1 - Classificação das densidades de drenagem**

| Classe          | Limites ( $\text{km km}^{-2}$ ) |
|-----------------|---------------------------------|
| Baixa densidade | < 7,5                           |
| Média densidade | 7,5 - 10                        |
| Alta densidade  | $\geq 10$                       |

Fonte: Christofolletti (1980)

### 3.4.4 Coeficiente de compacidade (Kc)

O coeficiente de compacidade (Kc) relaciona a forma da bacia com um círculo. Constitui a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia (CARDOSO et al., 2006). É um índice que informa sobre a susceptibilidade da ocorrência de inundações nas partes baixas da bacia. Uma bacia será mais suscetível a enchentes mais acentuadas quando seu Kc for mais próximo da unidade. O Kc foi determinado baseado na equação 2.

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

Onde Kc é o coeficiente de compacidade, P é o perímetro (m) e A é a área de drenagem (m<sup>2</sup>).

A susceptibilidade a enchentes em relação ao coeficiente de compacidade pode ser classificada de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos coeficientes de compacidade

| Classe                      | Limites     |
|-----------------------------|-------------|
| Alta propensão a enchentes  | 1,00 – 1,25 |
| Tendência média a enchentes | 1,26 – 1,50 |
| Não sujeito a enchentes     | > 1,50      |

Fonte: Júnior et al. (2012)

### 3.4.5 Amplitude altimétrica (Hm)

A amplitude altimétrica (Hm) é definida como a diferença entre os pontos de maior (P<sub>1</sub>) e menor (P<sub>2</sub>) altitudes da bacia. A amplitude altimétrica tem relação com a energia potencial máxima que a água pode ter na superfície da bacia, e, por isso, está relacionada com a velocidade do escoamento e com taxas de erosão (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Este conceito, também denominado de “relevo máximo da bacia”, considera que o ponto mais elevado da bacia deve ser a média das cotas mais elevadas,

pois o seu ponto alto não compreende toda a porção mais elevada (ROCHA et. al, 2014). A amplitude altimétrica, em metros, é dada pela Equação 3.

$$H_m = P_1 - P_2 \quad (3)$$

Os intervalos de classes para a amplitude altimétrica estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da Amplitude Altimétrica

| <b>Classe</b> | <b>Limites (m)</b> |
|---------------|--------------------|
| Muito Baixa   | 15 – 20,39         |
| Baixa         | 20,40 – 25,78      |
| Média         | 25,79 – 31,17      |
| Alta          | 31,18 – 36,56      |
| Muito Alta    | 36,57 – 41,00      |

Fonte: Júnior et al. (2012)

### **3.4.6 Índice de circularidade (Ic)**

O índice de circularidade define a relação entre a área da bacia (A), em km<sup>2</sup> e o perímetro (P), em km, de forma a definir a tendência da forma da bacia a ter um formato mais circular ou alongado. O valor do índice de circularidade tende ao valor 1 à medida que a bacia se aproxima de um formato circular, e se distancia conforme ela detém uma forma mais alongada. Quanto mais circular é a bacia, mais ela é suscetível a enchentes, pois ao ocorrer um evento de precipitação, quando atingir o tempo de concentração da bacia, praticamente toda sua superfície estará contribuindo no exutório, gerando, desta maneira uma elevada vazão. O cálculo é dado pela equação 4.

$$IC = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad (4)$$

A forma da bacia pode ser classificada segundo o Índice de Circularidade, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos Índices de Circularidades

| <b>Classe</b>       | <b>Limites</b> |
|---------------------|----------------|
| Forma alongada      | 0,36 – 0,50    |
| Forma intermediária | 0,51 – 0,75    |
| Forma circular      | 0,76 – 1,00    |

Fonte: Silva (2012)

### 3.4.7 Índice de sinuosidade (IS)

O índice de sinuosidade (IS) é a relação entre a extensão do rio principal (L) e a distância do canal principal, em linha reta, da nascente ao exutório (Ev). Este índice expressa a velocidade de escoamento do canal principal. Quanto maior a sinuosidade, maior será a dificuldade de se atingir o exutório do canal, portanto, a velocidade de escoamento será menor (SANTOS et al., 2014).

$$IS = \frac{100(L - Ev)}{L} \quad (5)$$

De acordo com Christofolletti (1980), o índice de sinuosidade se divide em algumas classes, definidas pela Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos índices de sinuosidade

| <b>Classe</b> | <b>Descrição</b> | <b>Limites</b> |
|---------------|------------------|----------------|
| <b>I</b>      | Muito reto       | >20%           |
| <b>II</b>     | Reto             | 20 – 29%       |
| <b>III</b>    | Divagante        | 30 – 39,9%     |
| <b>IV</b>     | Sinuoso          | 40 – 49,9%     |
| <b>V</b>      | Muito sinuoso    | >50%           |

Fonte: Christofolletti (1980)

### 3.4.8 Fator de forma (Kf)

O fator de forma compara a forma da bacia com a de um retângulo, relacionando a largura média da bacia com seu comprimento axial. O comprimento axial da bacia hidrográfica (L) é igual ao comprimento do curso d'água principal. Segundo Santana et al. (2015), bacias alongadas apresentam pequenos valores do fator de forma e são menos susceptíveis a inundações, uma vez que se torna menos provável que uma chuva intensa cubra toda a sua extensão. Um valor de Kf baixo, ou seja, com o L grande, está menos suscetível a enchentes, comparadas a outras bacias de mesma área, mas com o Kf maior. O fator de forma é obtido através da equação 6.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

A susceptibilidade a inundações em relação ao fator de forma pode ser classificada de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação dos fatores de forma

| Classe                      | Limites     |
|-----------------------------|-------------|
| Não sujeito a enchentes     | < 0,50      |
| Tendência média a enchentes | 0,50 – 0,75 |
| Sujeito a enchentes         | 0,76 – 1,00 |

Fonte: Júnior et al. (2012)

### 3.4.9 Índice de rugosidade (Ir)

A aptidão de uso da terra é avaliada pela combinação do relevo da bacia e a densidade de drenagem, por meio do índice de rugosidade (Ir). É o produto da amplitude altimétrica (Hm) com a densidade de drenagem (Dd). É um valor adimensional, que é dado pela Equação 7.

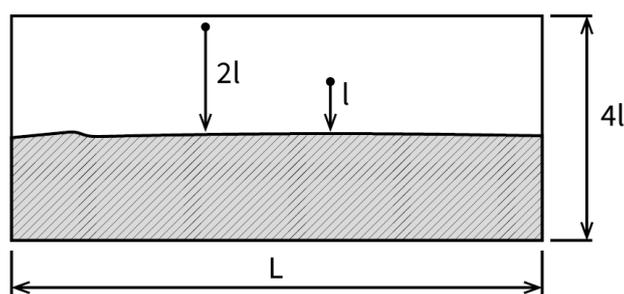
$$Ir = Hm * Dd \quad (7)$$

### 3.4.10 Extensão média do escoamento superficial (l)

Este índice é definido como sendo a distância média em que a água da chuva teria que escoar sobre os terrenos de uma bacia, caso o escoamento se desse em linha reta desde onde a chuva caiu até o ponto mais próximo no leito de um curso d'água qualquer da bacia (VILLELA; MATTOS, 1975). O valor é obtido representando a bacia de área de drenagem (A) como um retângulo, e o curso d'água de extensão L passando pelo seu centro, como mostra a Figura 2. Dessa forma, a extensão do escoamento superficial (l), é dada pela Equação 8.

$$l = \frac{A}{4L} \quad (8)$$

Figura 2 - Extensão Média do Escoamento Superficial

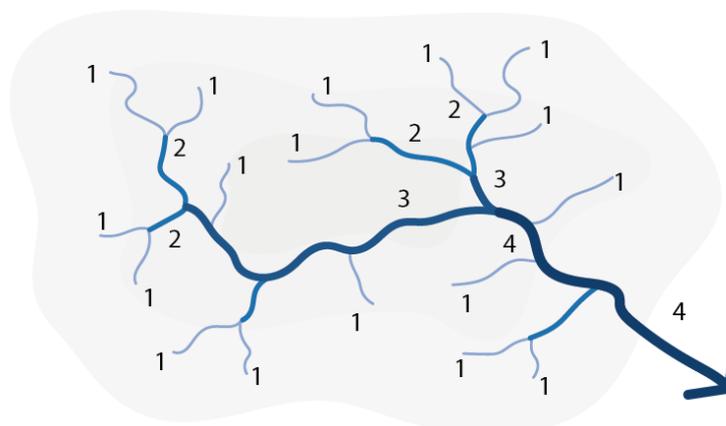


Fonte: adaptado de (VILLELA; MATTOS, 1975)

### 3.4.11 Ordem dos cursos d'água

A hierarquia dos cursos dos rios é determinada conforme o modelo de Strahler (1957). Neste modelo, são considerados de primeira ordem os rios menores que não possuem nenhum afluente. São, por evidência, os rios que não desaguaram ou encontraram com outro rio, desde sua nascente. Dessa forma, o encontro de dois rios de primeira ordem resulta em um curso de água de segunda ordem. Os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens, assim consecutivamente, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Hierarquia dos cursos d'água segundo Método de Strahler



Fonte: o autor, adaptado de Collischon e Dornelles (2013)

Através da análise da classificação de Strahler pode-se também compreender o nível de erosão dentro de uma bacia, bem como o grau de transporte de sedimentos e ação fluvial no relevo, uma vez, que quanto maior a quantidade de córregos maior será então a ação fluvial no relevo (RIBEIRO; SANTOS, 2007)

Quanto maior a porcentagem de canais de primeira ordem, mais frágil é a região e paisagem, pois eles mostram um relevo seco, que pode ser provocada pela forma estrutural, como falhas, fraturas ou dobramentos (FREITAS, 2019).

#### **3.4.12 Hipsometria**

A curva hipsométrica representa graficamente o relevo médio de uma bacia hidrográfica, permite avaliar a porcentagem da área de drenagem da bacia que se encontra acima ou abaixo das várias elevações. Representa o estudo da variação da elevação dos vários terrenos da bacia com referência ao nível médio do mar (VILLELA; MATTOS, 1975).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Visando obter um comparativo mais preciso acerca da eficiência da resolução do MDE na obtenção das características da bacia, serão realizados, neste estudo, a caracterização de três bacias hidrográficas, de tamanhos distintos, para avaliar a

influência da escala na obtenção dos parâmetros morfométricos. Dessa forma, além da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (grande porte), também serão estudadas as bacias dos açudes Carnaubal e Colina (médio e pequeno porte, respectivamente), localizadas nos municípios de Crateús e Quiterianópolis, respectivamente, e ambas sub-bacias da RHSC, através do mesmo segmento de rio principal. Dessa forma, pode-se obter uma maior precisão dos resultados ao se comparar bacias de relevo e características climáticas e geográficas semelhantes.

A hipótese principal é a de que bacias hidrográficas maiores possam proporcionar resultados mais precisos e menos divergentes, em relação às diferentes resoluções de MDE, quando relacionadas a bacias de menor extensão, estas possivelmente apresentando maior variação entre os resultados obtidos nas três resoluções.

#### **4.1 Caracterização das áreas de estudo**

##### ***4.1.1 Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC)***

A Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC) fica localizada no estado do Ceará e ocupa uma área de 10.821 km<sup>2</sup>, compreendendo a rede de drenagem do Rio Poti. Segundo o Caderno da Bacia Hidrográfica dos Sertões de Crateús, a bacia é composta por nove municípios, e apresenta uma capacidade de acumulação de águas superficiais de 436,04 milhões de m<sup>3</sup>, num total de 10 açudes monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). A RHSC localiza-se na porção ocidental do Estado do Ceará, entre as latitudes 4°36'44" S - 6°07'40" S e longitudes 40°00'00" W - 41°09'16" W. Limita-se ao norte com as regiões hidrográficas da Serra da Ibiapaba e do Acaraú, a Leste com a Região Hidrográfica do Banabuiú, ao sul com a do Alto Jaguaribe e a oeste com o estado do Piauí (COGERH, 2020).

O Rio Poti é um dos grandes afluentes do rio Parnaíba, eixo principal da drenagem piauiense. Nasce no Estado do Ceará, onde sua bacia abrange os municípios de Ararendá, Boa Viagem, Crateús, Independência, Ipaporanga, Ipueiras, Monsenhor Tabosa, Nova Russas, Novo Oriente, Parambu, Pedra Branca, Poranga, Quiterianópolis, Tamboril e Tauá. A tabela 7 apresenta a área de cada um deles na Região Hidrográfica e seus respectivos percentuais.

Tabela 7 - Principais reservatórios e capacidade de acumulação

| Município        | Área Total do Município (Km <sup>2</sup> ) | Área do Município pertencente à Região Hidrográfica (Km <sup>2</sup> ) | Área do Município pertencente à Região Hidrográfica (%) |
|------------------|--|--|---|
| Ararendá         | 342,3                                      | 342,0  | 99,9%   |
| Boa Viagem       | 2.833,3                                    | 3,0  | 0,1%  |
| Crateús          | 2.981,8                                    | 2981,8   | 100,0%  |
| Independência    | 3.221,6                                    | 3219,9   | 99,9%   |
| Ipaporanga       | 704,9                                      | 704,9  | 100,0%  |
| Ipueiras         | 1.483,7                                    | 137,4  | 9,3%  |
| Monsenhor Tabosa | 892,1                                      | 2,2  | 0,2%  |
| Nova Russas      | 736,9                                      | 67,2   | 9,1%  |
| Novo Oriente     | 947,6                                      | 947,6  | 100,0%  |
| Parambu          | 2.313,9                                    | 3,1  | 0,1%  |
| Pedra Branca     | 1.301,3                                    | 1,3  | 0,1%  |
| Poranga          | 1.311,4                                    | 85,3   | 6,5%  |
| Quiterianópolis  | 1.042,2                                    | 1037,6   | 99,6%   |
| Tamboril         | 2.014,0                                    | 1263,8   | 62,8%   |
| Tauá             | 4.009,4                                    | 9,4  | 0,2%  |

Fonte: COGERH (2021)

A RHSC possui 10 açudes públicos gerenciados pela COGERH, com capacidade de acumulação de 436.038.000 m<sup>3</sup>. Destes, três - Barra Velha, Flor do Campo e Jaburu II - são de grande porte, possuindo capacidade superior a 75 milhões de m<sup>3</sup>, de modo a tentar garantir o atendimento das demandas entre anos subsequentes, devido às características semiáridas da Região. Já a média açudagem (capacidade entre 10 a 75 milhões de m<sup>3</sup>) é representada por dois barramentos: Carnaubal e Realejo. Na área existe ainda um reservatório em construção, o Fronteiras, cuja capacidade de acumulação será de 488.140.000 m<sup>3</sup> (COGERH, 2021).



Tabela 8 - Percentual da área dos municípios inseridos total ou parcialmente na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús

| Reservatório                 | Município       | Proprietário | Ano de Construção | Rio Barrado        | Capacidade (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-----------------|--------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| Barragem do Batalhão         | Crateús         | EXÉRCITO     | *                 | Rch do Meio        | 1.638.000                    |
| Barra Velha                  | Independência   | ESTADO       | 1999              | Rch Sta Cruz       | 99.560.000                   |
| Carnaubal                    | Crateús         | ESTADO       | 1990              | Rio Poti           | 73.200.000                   |
| Colina                       | Quiterianópolis | DNOCS        | 1998              | Rio Poti           | 4.290.000                    |
| Cupim                        | Independência   | DNOCS        | 1998              | Rio Cupim          | 4.600.000                    |
| Flor do Campo                | Novo Oriente    | ESTADO       | 1999              | Rio Poti           | 105.000.000                  |
| Jaburu II                    | Independência   | DNOCS        | 1984              | Rio Jaburu         | 101.641.000                  |
| Realejo                      | Crateús         | DNOCS        | 1980              | Rch Carrapateiras  | 31.550.000                   |
| São José III                 | Ipaporanga      | *            | *                 | Rch São José       | 7.960.000                    |
| Sucesso                      | Tamboril        | ESTADO       | 1988              | Rch Cassimiro      | 6.600.000                    |
| <b>TOTAL (M<sup>2</sup>)</b> |                 |              |                   | <b>436.038.000</b> |                              |

Fonte: COGERH (2021)

As temperaturas na Região Hidrográfica são caracterizadas por temperaturas pouco brandas, tendo sua média anual em torno de 27,4°C. As temperaturas máximas ocorrem nos meses de setembro a dezembro, com a média das máximas no período de 1981 a 2010 atingindo o maior valor (36,0°C), em outubro. E as temperaturas mínimas ocorrem entre os meses de maio a agosto, com a médias das temperaturas mínimas no mesmo período atingindo o menor valor (20,6 °C) em junho. A tabela 9 apresenta os valores de temperaturas máximas, médias e mínimas da região.

Tabela 9 - Temperaturas máximas, médias e mínimas (°C) em Crateús

| T (°C) | Jan  | Fev  | Mar  | Abr  | Mai  | Jun  | Jul  | Ago  | Set  | Out  | Nov  | Dez  | Média |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Máxima | 33,6 | 32,8 | 32   | 31,1 | 31,7 | 32,3 | 33,1 | 34,2 | 35,5 | 36,0 | 35,7 | 35,1 | 33,6  |
| Média  | 27,6 | 26,7 | 26,1 | 25,6 | 25,8 | 25,8 | 26,5 | 27,4 | 28,8 | 29,5 | 29,6 | 29,0 | 27,4  |
| Mínima | 23,2 | 22,6 | 22,5 | 22,2 | 21,7 | 20,6 | 20,7 | 21,5 | 22,8 | 23,4 | 23,7 | 23,7 | 22,4  |

Fonte: COGERH (2021)

A geologia da região é representada pelo embasamento cristalino, compreende o Grupo Caraíba, que é formado por um conjunto de rochas gnáissicas, intensamente migmitizadas, onde se destacam a biotita-gnaïsse cinza associada à anfibolitos, quartzitos e micaxistos, datados do Pré-Cambriano Indiviso. Essa área testemunha a atuação de longos e intensos processos de erosão, sendo considerada pela literatura como área de circundesnudação periférica, constituindo-se verdadeira área de aversão, deprimida entre a Ibiapaba e os Cariris (LIMA, 1982).

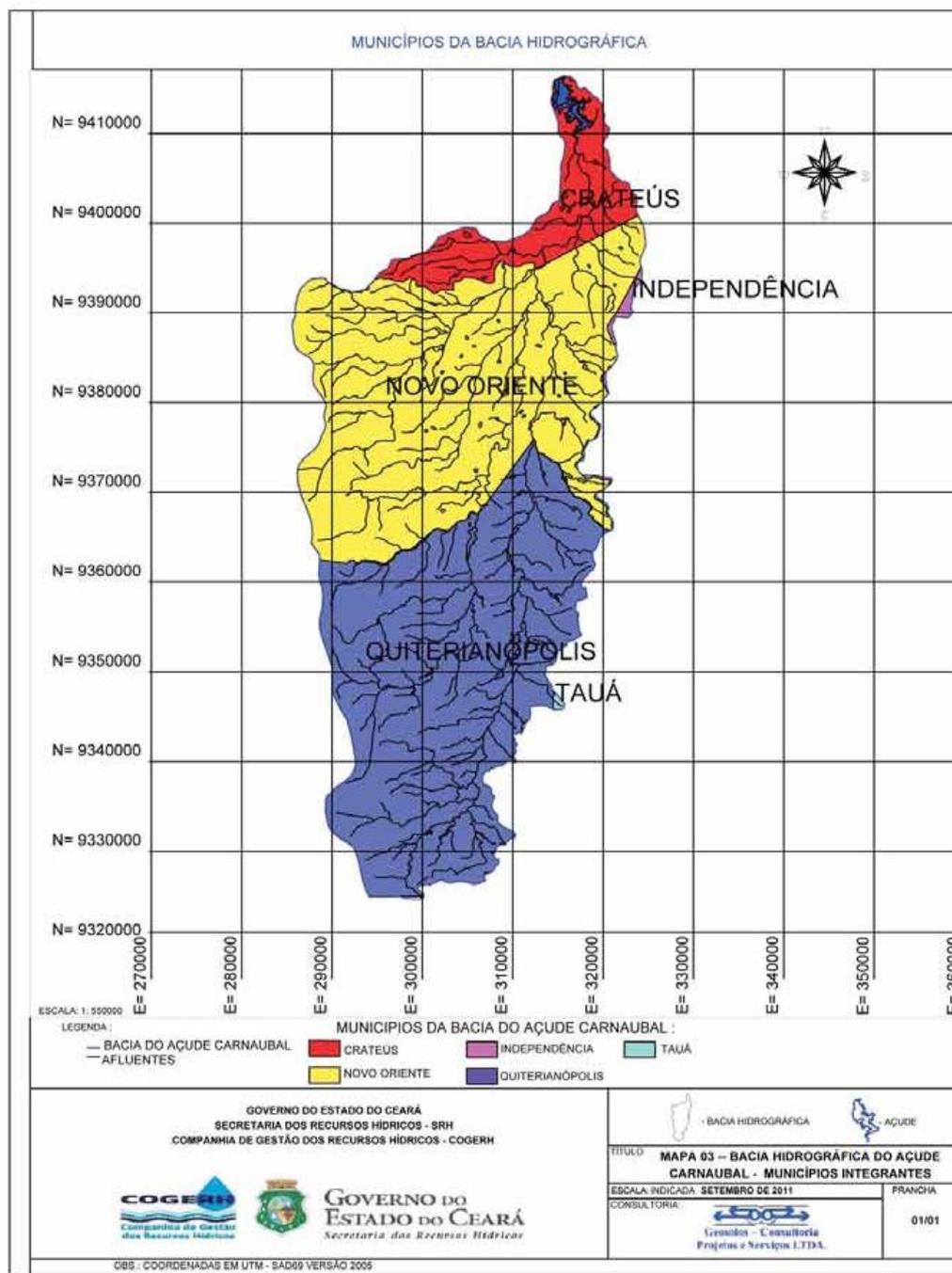
O tipo de chuvas dessa região é o característico dos sertões, apresentando-se geralmente breves períodos quando se constituem aguaceiros ou enxurradas, originando inicialmente um escoamento difuso ou laminar, transportando e depositando o material desagregado, em função de sua granulometria e competência da água, mas sempre dependente dessa condição de torrencialidade, convergindo para as bajadas ou depressões, indo se concentrar em sulcos, riachos e rios. Esse escoamento superficial difuso é, assim, responsável pela erosão das vertentes que, encontrando condições favoráveis de evolução, faz recuar as encostas mais íngremes, principalmente nos locais de maior rarefação da cobertura vegetal (LIMA, 1982).

#### **4.1.2 Açude Carnaubal**

Como parte integrante do sistema hidrográfico do rio Parnaíba, a bacia hidrográfica do açude Carnaubal, drena uma área de 2.067,68 Km<sup>2</sup>, e possui como principal afluente o rio Poti. Este rio nasce na região montanhosa da Serra da Joanhina no município de Parambu, no estado do Ceará, e segue o sentido norte-sul até a cidade de Crateús, onde passa a correr no sentido Leste-Oeste até desaguar na cidade de Teresina no Piauí. Drena os municípios de Quiterianópolis, Crateús e Novo Oriente (CEARÁ, 2011), como mostrado na Figura 5.

O açude Carnaubal, localizado no município de Crateús, represa o rio Poti e seu reservatório tem capacidade para armazenar 87.690.000 m<sup>3</sup> (metros cúbicos) de água, sendo projetada e iniciada a construção no final da década de 1980, finalizada no ano de 1990 pelo DNOCS, para as seguintes finalidades: A irrigação das localidades próximas ao açude e o abastecimento de água da cidade de Crateús (CEARÁ, 2011).

Figura 5 - Municípios da Bacia Hidrográfica do Açude Carnaubal



Fonte: (CEARÁ, 2011)

### **4.1.3 Açude Colina**

A bacia hidrográfica do açude Colina está inserida na região hidrográfica do Parnaíba, com 362,70 km<sup>2</sup> de área, englobando apenas o município de Quiterianópolis, que totaliza população de 20.079 pessoas (urbana e rural), conforme Censo Demográfico de 2000. O principal afluente é o rio Poti, que nasce na Serra Grande (ou serra dos Cariris Novos) na porção sul do Município de Quiterianópolis, desenvolve-se na direção sul-norte até a sede municipal, onde é barrado, seguindo na direção norte até alcançar o município de Crateús, a partir daí toma o sentido oeste rumo ao estado do Piauí, onde desemboca no rio Parnaíba (CEARÁ, 2010).

É um sistema altamente eutrófico com histórico constante de floração de cianobactérias. Além de abastecimento, o açude também é utilizado para piscicultura artesanal, dessedentação de animais e irrigação (BUARQUE; CARVALHO; PEREIRA, 2013).

A água destina-se principalmente para o abastecimento da sede do Município de Quiterianópolis após tratamento realizado pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE que atende uma população de 2.089 pessoas e comunidades do entorno; piscicultura artesanal, com 40 associados, dessedentação de animais, irrigação do entorno e a montante (CEARÁ, 2010).

## **4.2 Dados e software utilizado**

### **4.2.1 Fonte de dados**

Os dados SRTM 1 e SRTM 3, com resoluções de 30 e 90 metros, respectivamente, foram obtidos no portal Earth Explorer, do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), disponível no endereço <https://earthexplorer.usgs.gov/>. O MDE ALOS com resolução espacial de 12,5 m foi obtido gratuitamente do *Alaska Satellite Facility* (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>).

Em ambas as resoluções foram obtidos os modelos digitais de elevação, de forma a abranger toda a área da bacia hidrográfica e proporcionar uma melhor análise e precisão da caracterização. Esses MDEs posteriormente foram pré-processados através da ferramenta *Mosaic to Raster*, do ArcGIS, para que fossem

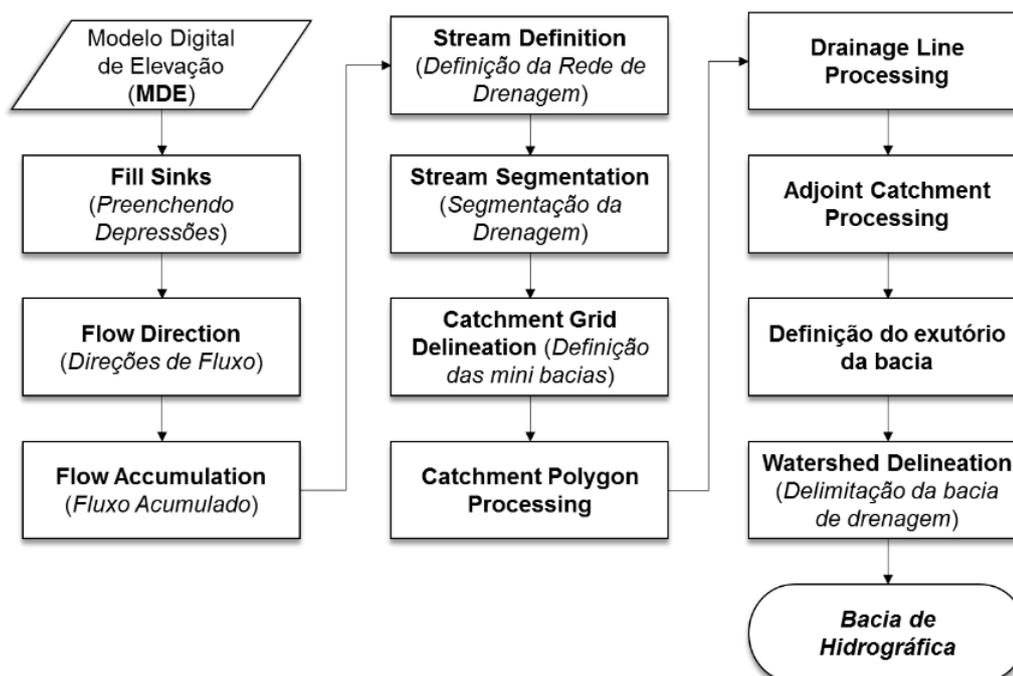
unificados em um único MDE e, assim, possibilitando realizar a caracterização morfométrica.

#### 4.2.2 Processamento dos dados

De posse dos modelos digitais de elevação SRTM e ALOS já pré-processados, utilizou-se do conjunto de ferramentas ArcHydro dentro do software ArcMap 10.3 para a delimitação da RHSC, as sub-bacias do Açude Carnaubal e Açude Colina, bem como a extração da rede de drenagem e a obtenção dos dados necessários para a devida caracterização morfométrica.

As etapas executadas no ArcHydro foram: Fill Sinks (preenche depressões e remove elevações), Flow Direction (define a direção do fluxo), Flow Accumulation (determina o fluxo acumulado), Stream Definition (gera o raster da rede de drenagem), Stream Segmentation (segmenta o raster de drenagem), Catchment Grid Delineation (gera o raster das sub-bacias), Catchment Polygon Processing (gera o vetor das sub-bacias), Adjoint Catchment (junta as bacias hidrográficas) e Point Delineation (definição do exutório). O fluxograma com as etapas realizadas no ArcHydro está representado na figura 6.

Figura 6 - Fluxograma com as etapas executadas pelo ArcHydro



Após a devida delimitação das bacias utilizando o SRTM 1, SRTM 3 e ALOS, as diferentes características morfométricas das bacias hidrográficas em estudo foram comparadas. As características geométricas obtidas foram área, perímetro, comprimento total dos cursos d'água e do Rio Principal, além de coeficientes morfométricos como densidade de drenagem, coeficiente de compacidade, amplitude altimétrica, índices de circularidade, sinuosidade e rugosidade, fator de forma, extensão média do escoamento superficial, além da ordem dos cursos d'água e as curvas hipsométricas. Na etapa de *Stream Definition*, onde se realiza a definição da rede de drenagem, definiu-se o valor do limite de área acumulada a partir do qual inicia a rede de drenagem de aproximadamente 0,5 km<sup>2</sup>.

#### 4.2.3 Comparativo entre os resultados

Para este estudo foram realizados três resultados diferentes para a caracterização morfométrica de cada bacia hidrográfica (RHSC, Carnaubal e Colina), obtidos através de cada resolução de MDE (SRTM1, SRTM 3 e ALOS). Dessa forma, pretendeu-se realizar a comparação dos resultados em pares, calculando a variação percentual entre os fatores obtidos entre duas resoluções diferentes, dessa forma, resultando em 3 variações diferentes para cada bacia. O cálculo da variação percentual entre os dois valores foi realizado através da equação 9.

$$\text{Variação percentual} = \left( \frac{VF}{VI} - 1 \right) * 100 \quad (9)$$

Onde VF é o valor final da operação e VI diz respeito ao valor inicial. A tabela 10 apresenta a descrição de cada análise de variação.

**Tabela 10 - Descrição das variações comparadas entre os MDEs**

| <b>Variação</b> | <b>Bacias</b> | <b>Resoluções comparadas</b> |
|-----------------|---------------|------------------------------|
| V1              | RHSC          | SRTM 30m - SRTM 90m          |
| V2              | RHSC          | SRTM 30m - ALOS 12,5m        |
| V3              | RHSC          | SRTM 90m - ALOS 12,5m        |

Fonte: elaboração própria

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

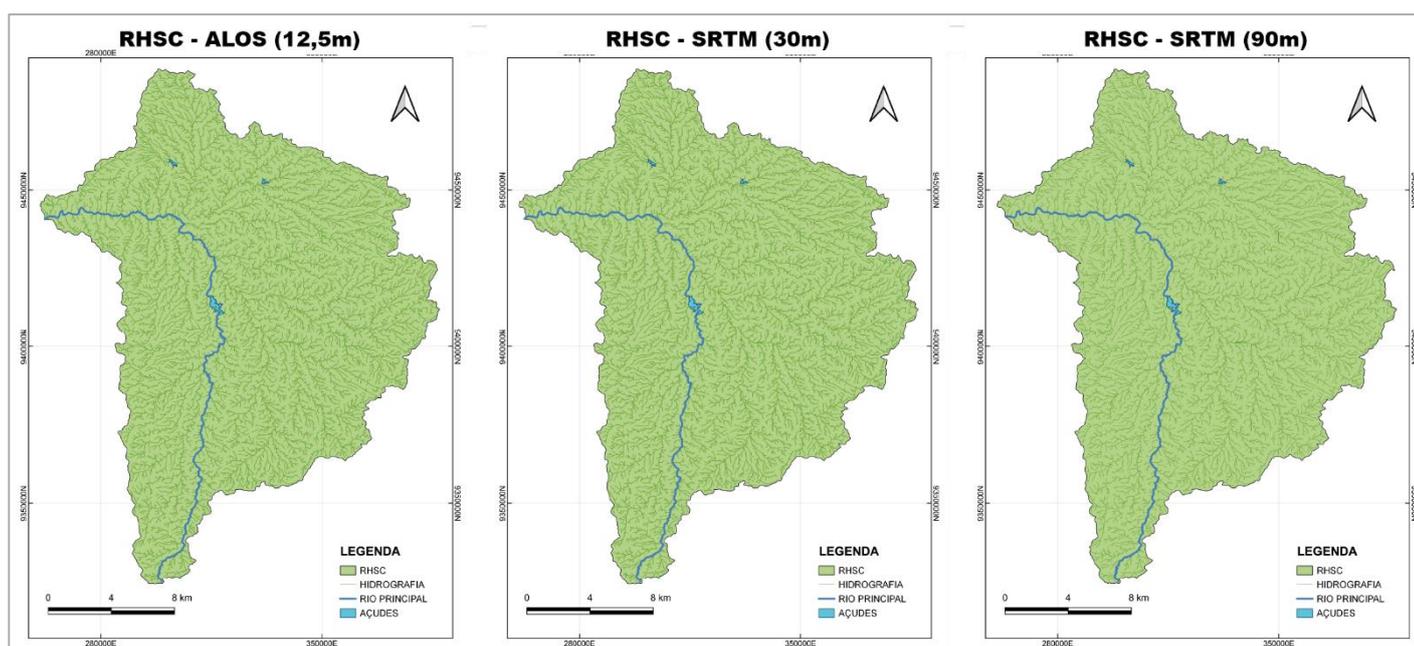
Para melhor organização e apresentação dos resultados obtidos neste trabalho, esta seção será dividida entre as bacias dos Açudes Colina e Carnaubal e a Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús. Serão apresentados em cada seção as delimitações das bacias e suas respectivas redes de drenagem, bem como os seus parâmetros morfométricos.

### 5.1 RHSC

#### 5.1.1 Delimitação da Bacia e Rede de Drenagem

Através da aplicação dos MDEs no software ArcMap, processados através da extensão ArcHydro, obteve-se a delimitação automática das bacias hidrográficas e a suas respectivas redes de drenagem. O comparativo dos resultados das extrações, geradas automaticamente, da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús, processadas através dos MDEs SRTM1 (30m), SRTM3 (90m) e ALOS (12,5m), está representado na Figura 7.

Figura 7 - Comparativo entre a delimitação da RHSC para as diferentes resoluções de MDE



Fonte: elaboração própria

Ao se analisar visualmente os resultados das bacias extraídas, não se encontram discrepâncias no formato da bacia, sendo possível notar apenas pequenas variações visuais no seu contorno, em alguns pontos específicos, que são visualizados apenas através do manuseio em softwares, como é o caso do ArcMap.

No entanto, ao se fazer uma análise mais quantitativa acerca da caracterização da bacia, é possível obter valores mais precisos de área, perímetro, comprimento total dos cursos d'água e o comprimento do rio principal. Esses valores, ao serem comparados entre as resoluções de MDE, podem possibilitar uma melhor análise, além de comparar, com maior precisão, a diferença entre os resultados. Dessa forma, a Tabela 11 apresenta os valores obtidos para a caracterização geométrica da RHSC, bem como os valores equivalentes para cada MDE, para efeito de comparação.

Tabela 11 - Características geométricas da RHSC

| <b>ÍNDICE</b>          | <b>Unid.</b>    | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> |
|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Área                   | km <sup>2</sup> | 10815,75           | 10823,78           | 10742,09            |
| Perímetro              | km              | 612,68             | 608,2332           | 619,27              |
| Comp. total dos rios   | km              | 10319,76           | 10362,37           | 10246,78            |
| Comp. do rio principal | km              | 216,757            | 216,536            | 215,448             |

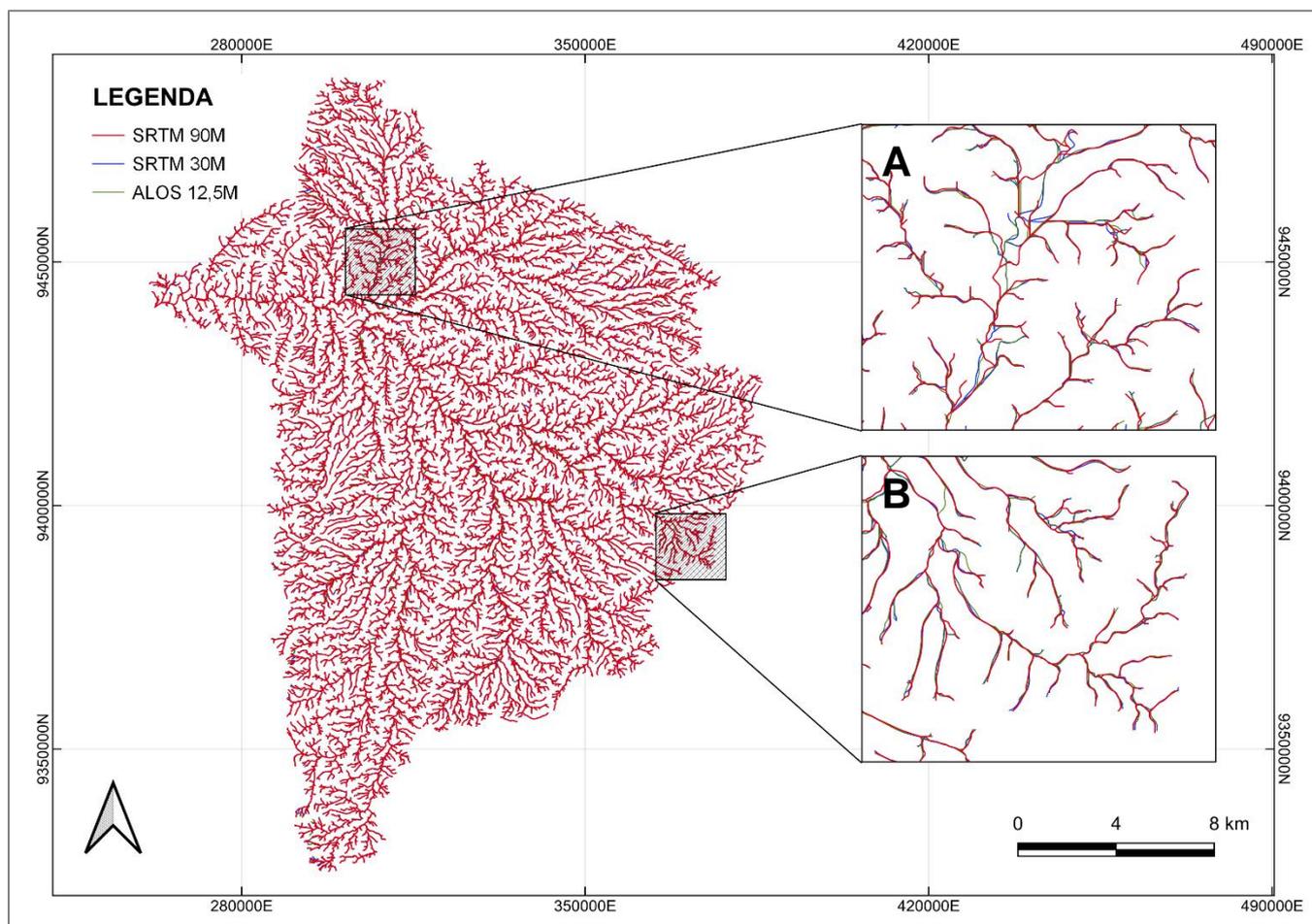
Fonte: elaboração própria

De acordo com os resultados obtidos para a bacia, pode-se notar uma proximidade entre os valores obtidos para a área de drenagem, confirmando a semelhança entre os MDEs notada na análise visual. Dentre os valores obtidos para a área, a maior diferença encontra-se entre os valores do SRTM3 e ALOS, que foi de aproximadamente 82 quilômetros quadrados. Ao se considerar a escala da bacia, que detém uma área média de mais de 10 mil quilômetros quadrados, tal diferença nos valores da área tornam-se desprezíveis. O mesmo ocorre para as outras características da bacia, como o comprimento total dos cursos dos rios e o rio principal, porém apresentando valores ligeiramente mais divergentes para o perímetro.

O resultado da extração da rede de drenagem da RHSC está representado na Figura 8. Por se tratar de uma bacia de grande escala, com uma área consideravelmente grande, ao se analisar visualmente, do ponto de vista geral da

bacia, as três redes resultantes dos MDEs, não se observa diferenças visuais consideráveis nos segmentos de cursos d'água. Porém, ao se observar em uma escala menor a rede de drenagem, analisando mais proximamente, nota-se alterações em alguns pontos específicos na região da bacia. Como é possível visualizar em alguns pontos aproximados da imagem, na Figura 8-A, que destaca uma região mais central da bacia, pode-se notar uma discordância maior entre os fluxos de água, em comparação aos fluxos da região representada pela Figura 8-B, que destaca uma região mais próxima das nascentes dos rios.

Figura 8 - Rede de drenagem da RHSC obtida pelos diferentes MDE



Fonte: elaboração própria

Pode-se notar, também, que as redes de drenagem extraídas pelos MDEs SRTM1 e ALOS, que possuem uma resolução espacial maior, apresentam, visualmente, menos divergência entre os seus traçados dos corpos hídricos, enquanto

o MDE SRTM3, de resolução 90 metros, apresenta maior diferença, em comparação às outras duas redes de drenagem.

De todo modo, para se visualizar de forma mais palpável os resultados, calculou-se as variações percentuais entre as características obtidas. Dessa forma, os valores das variações entre os índices, calculados através dos três MDEs estão apresentados nas tabelas 12, 13 e 14, que representam os valores calculados de V1, V2 e V3, como já explicado anteriormente neste trabalho.

Tabela 12 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e SRTM3 na RHSC

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>Variação 1 (V1)</b> |
|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Área (km <sup>2</sup> )  | 10815,745          | 10823,780          | 0,07%                  |
| Perímetro (km)           | 612,678            | 608,233            | 0,73%                  |
| Comp. dos Rios (km)      | 10319,762          | 10362,367          | 0,41%                  |
| Comp. Rio Principal (km) | 216,757            | 216,536            | 0,10%                  |

Fonte: elaboração própria

Tabela 13 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e ALOS na RHSC

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> | <b>Variação 2 (V2)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Área (km <sup>2</sup> )  | 10815,745          | 10742,094           | 0,68%                  |
| Perímetro (km)           | 612,678            | 619,270             | 1,08%                  |
| Comp. dos Rios (km)      | 10319,762          | 10246,781           | 0,71%                  |
| Comp. Rio Principal (km) | 216,757            | 215,448             | 0,60%                  |

Fonte: elaboração própria

Tabela 14 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM3 e ALOS na RHSC

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> | <b>Variação 3 (V3)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 10823,780          | 10742,094           | 0,75%                  |
| Perímetro (km)           | 608,233            | 619,270             | 1,81%                  |
| Comp. dos Rios (km)      | 10362,367          | 10246,781           | 1,12%                  |
| Comp. Rio Principal (km) | 216,536            | 215,448             | 0,50%                  |

Fonte: elaboração própria

As áreas obtidas para os MDEs de 30 e 90 metros (V1), apresentam menor variação entre si (0,07%), ao se comparar com as variações das outras resoluções, V2 e V3 (0,68% e 0,75%, respectivamente). Tal fato ocorre devido a ambos os MDEs serem provenientes da mesma missão espacial. O objetivo da missão espacial era realizar o mapeamento do relevo do planeta terra, através de um modelo com resolução espacial de 90 metros. Porém, devido à grande presença de falhas no modelo, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), através do projeto TOPODATA, disponibilizou um novo MDE reconicionado, com menor presença de falhas e com uma resolução espacial de 30 metros. Portanto, por serem MDEs provenientes da mesma fonte de dados, eles tendem a ter resultados próximos, com baixas variações.

De modo geral, em todas as três resoluções, há uma variação de área inferior a 1%, indicando uma boa precisão em sua delimitação e, dessa forma, por se tratar de variações pequenas, considerando a escala da bacia, não há influência considerável no cálculo dos índices morfométricos.

Os valores obtidos para o perímetro apresentam variações ligeiramente maiores que os da área, com valores, em média, acima de 1%. Ao se comparar com as variações calculadas para as outras características, o perímetro apresenta valores maiores, embora ainda considerados desprezíveis, representando pouca influência na caracterização morfométrica, visto que, do ponto de vista da bacia, uma variação máxima de aproximadamente 11 quilômetros (entre o SRTM3 e ALOS), é ínfima, para uma bacia que apresenta um perímetro total na faixa de 600 quilômetros.

No caso do rio principal, verificou-se que os canais de maior fluxo, 276,75 km (SRTM 30m) e 216,53 (SRTM 90m), foram extraídos dos MDEs de média e baixa resolução, enquanto o MDE de 12,5 metros gerou um rio principal ligeiramente menor, com extensão de 215,44 km. De todo modo, são diferenças pequenas, com baixa variação. A extensão do rio principal apresenta a menor variação média, em relação aos outros índices, com um valor de apenas 0,40% nos valores encontrados para esse parâmetro.

### **5.1.2 Índices morfométricos**

As propriedades morfométricas da RHSC, extraídas e calculadas dos diferentes MDEs são apresentadas na tabela 15. Nela estão expostos os dados

obtidos através das equações e processos apresentados anteriormente, nas três resoluções de MDE estudadas neste trabalho.

A partir da análise dos índices obtidos, os valores médios extraídos dos MDEs para o coeficiente de compacidade (1,65) e fator de forma (0,23), indicam que a bacia hidrográfica apresenta características de baixa propensão a enchentes. Os valores médios para o índice de circularidade (0,36) e densidade de drenagem (0,95) indicam uma bacia que possui forma alongada e média densidade de drenagem, favorecendo o escoamento superficial das águas pluviais, confirmando a baixa probabilidade de enchentes.

Essa caracterização leva em conta os valores médios entre os resultados obtidos dos MDEs, porém os valores, ao se analisar separadamente, não apontam diferenças na classificação dos índices morfométricos.

Tabela 15 - Características Morfométricas obtidas para a RHSC

| ÍNDICE                            | Unid. | SRTM1 (30m) | SRTM3 (90m) | ALOS (12,5m) |
|-----------------------------------|-------|-------------|-------------|--------------|
| Densidade de drenagem - Dd        | Adim. | 0,954       | 0,957       | 0,954        |
| Altitude máxima - Hmax            | m     | 923,0       | 923,0       | 923,0        |
| Altitude mínima - Hmin            | m     | 219,0       | 219,0       | 219,0        |
| Amplitude altimétrica - Hm        | m     | 704,0       | 704,0       | 704,0        |
| Relação de relevo - Rr            | Adim. | 0,06769     | 0,06767     | 0,06792      |
| Índice de compacidade - IC        | Adim. | 0,362       | 0,368       | 0,352        |
| Índice de sinuosidade - Is        | Adim. | 44,002      | 43,958      | 43,482       |
| Coeficiente de manutenção - Cm    | Adim. | 1048,062    | 1044,528    | 1048,338     |
| Coeficiente de compacidade - Kc   | Adim. | 1,650       | 1,637       | 1,673        |
| Fator de forma - F                | Adim. | 0,23020     | 0,23084     | 0,23142      |
| Índice de rugosidade - Ir         | Adim. | 671,716     | 673,989     | 671,539      |
| Ext. média do escoamento sup. - I | Adim. | 0,262       | 0,261       | 0,262        |
| Ordem de Strahler                 | Adim. | 8           | 8           | 8            |

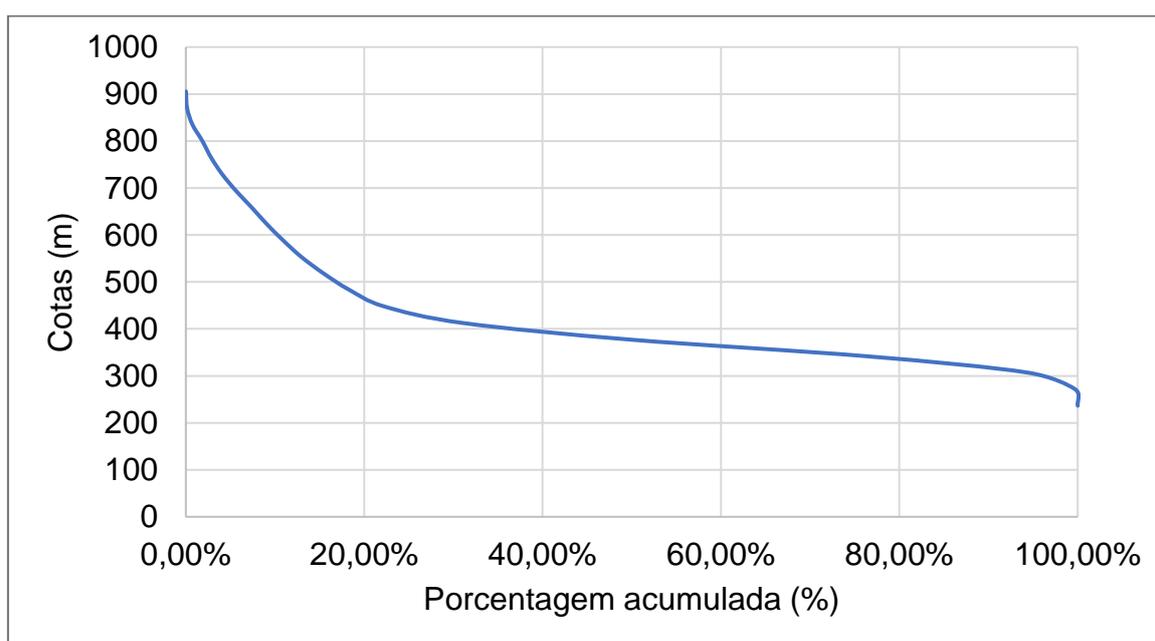
Fonte: elaboração própria

### 5.1.3 Hipsometria

Os valores de elevação variam entre 219 m e 923 m, não apresentando alteração entre os MDEs, o que pode ser justificado pela resolução vertical dos mesmos, de 1 metro, reduzindo, assim a precisão das altitudes. Dessa forma, a bacia

apresenta uma amplitude altimétrica de 704,00 m, indicando um elevado valor de amplitude, o que favorece o escoamento superficial difuso. A altitude média encontrada foi de 571,02m. Com base nos resultados de elevação a partir dos três MDEs foi elaborada uma representação gráfica da curva hipsométrica (Figura 9). Por se tratar de valores muito próximos, não há alterações visuais entre as curvas obtidas para os MDEs, portanto, gerou-se uma curva hipsométrica com valores médios.

Figura 9 - Curva hipsométrica RHSC com base no ALOS

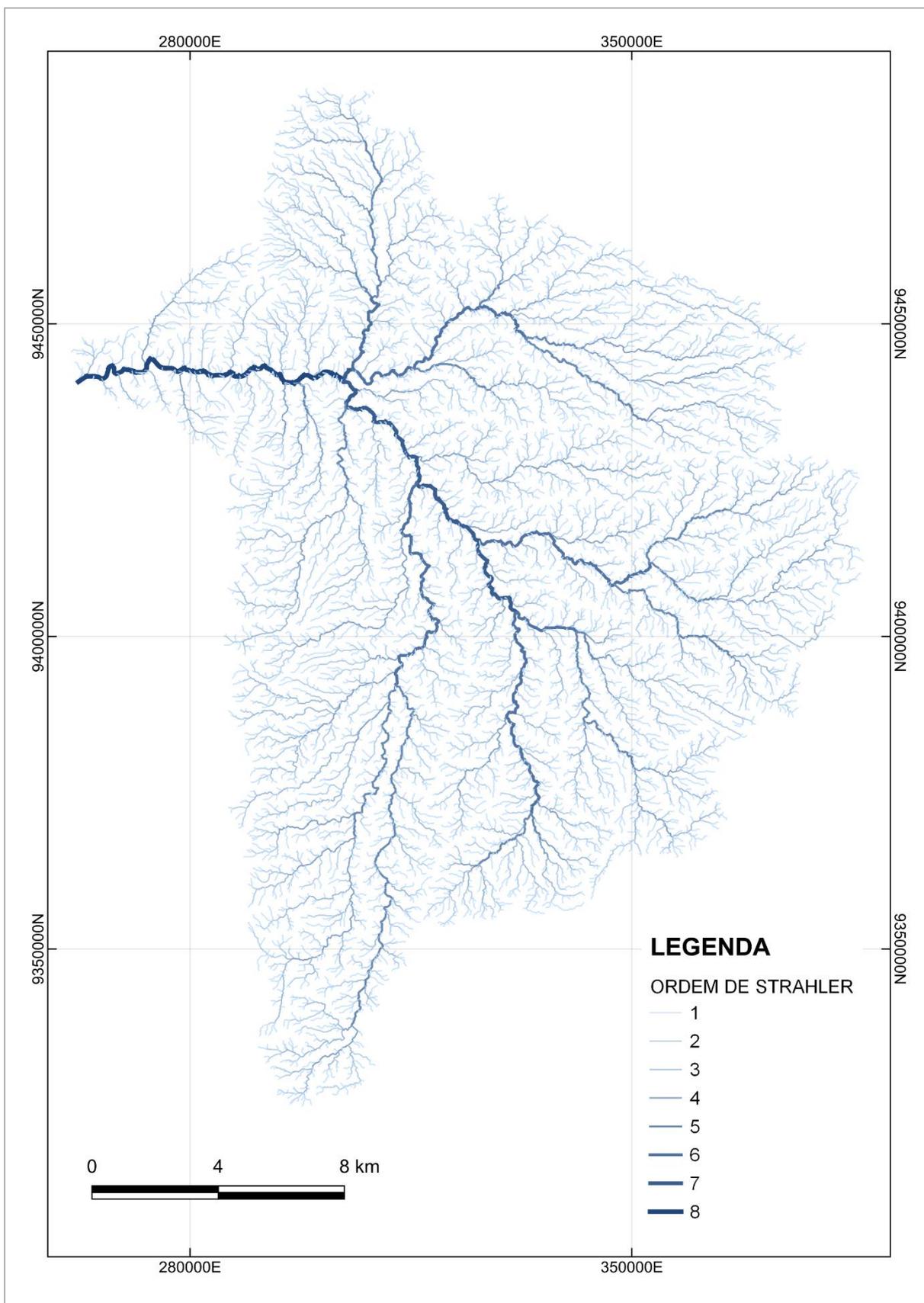


Fonte: elaboração própria

#### 5.1.4 *Ordem dos rios*

De maneira semelhante ao que ocorre com a curva hipsométrica, a classificação de Strahler para a ordem dos cursos dos rios também é a mesma para os três MDEs, visto que não há alterações consideráveis entre as redes de drenagem que possam influenciar no resultado. A técnica aplicada ao estudo possibilitou identificar que a RHSC é uma bacia hidrográfica de oitava ordem. Portanto a Figura 9 apresenta a representação gráfica da hierarquização fluvial da rede de drenagem da bacia.

Figura 10 - Hierarquização dos rios da RHSC, processado pelo SRTM1 (30m)



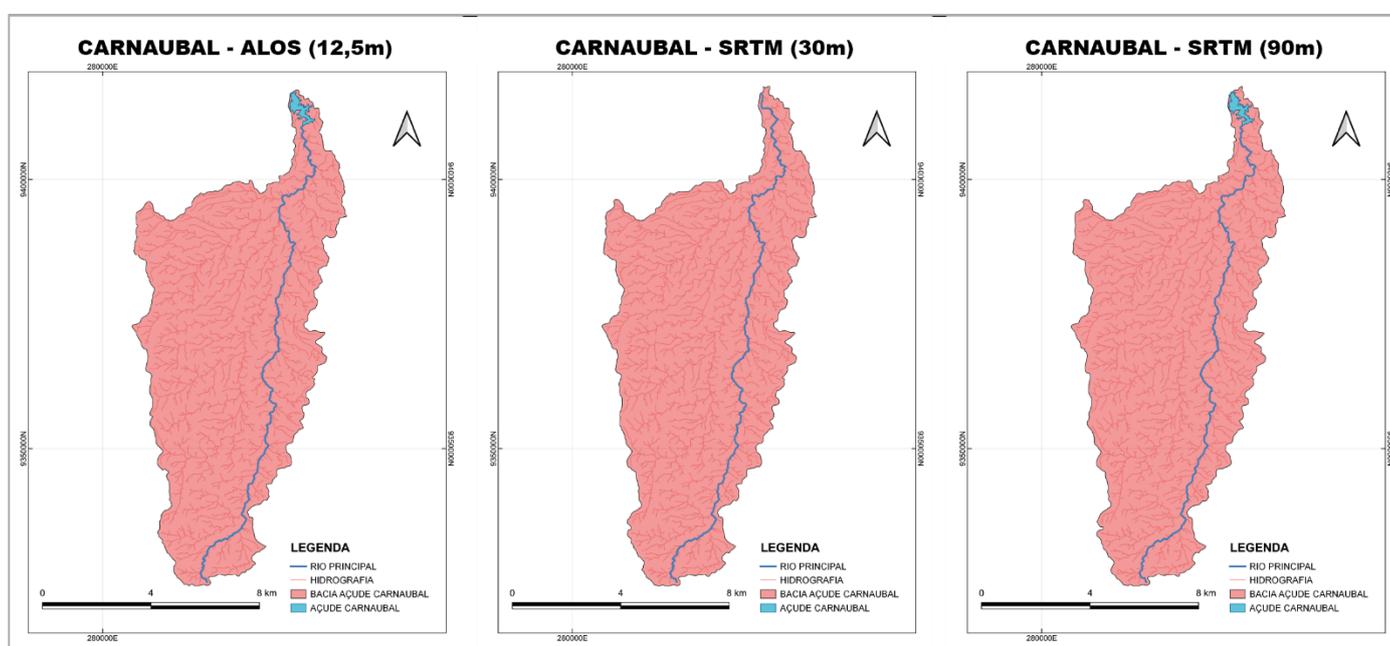
Fonte: elaboração própria

## 5.2 Açude Carnaubal

### 5.2.1 Delimitação da bacia e rede de drenagem

A Figura 11 apresenta os resultados da delimitação automática da bacia hidrográfica do açude Carnaubal, bem como a extração de sua rede de drenagem, obtidas pela extensão ArcHydro, no software ArcMap. A imagem demonstra o comparativo visual entre os três resultados extraídos dos MDEs.

Figura 11 - Comparativo entre a delimitação da Bacia do Açude Carnaubal para as diferentes resoluções de MDE



Fonte: elaboração própria

Assim como ocorre na RHSC, as três delimitações da bacia do açude Carnaubal, mesmo possuindo um tamanho menor em relação à região hidrográfica, também não apresentam diferenças visuais consideráveis entre si, sendo possível diferenciá-las somente através do levantamento de alguns valores geométricos mais precisos, como a área e perímetro (Tabela 16).

Tabela 16 - Características geométricas da bacia do açude Carnaubal

| <b>ÍNDICE</b>          | <b>Unid.</b>    | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> |
|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Área                   | km <sup>2</sup> | 2065,844           | 2068,437           | 2055,818            |
| Perímetro              | km              | 277,3              | 276,9              | 276,0               |
| Comp. total dos rios   | km              | 1973,0             | 1973,2             | 1953,1              |
| Comp. do rio principal | km              | 126,9              | 125,2              | 126,9               |

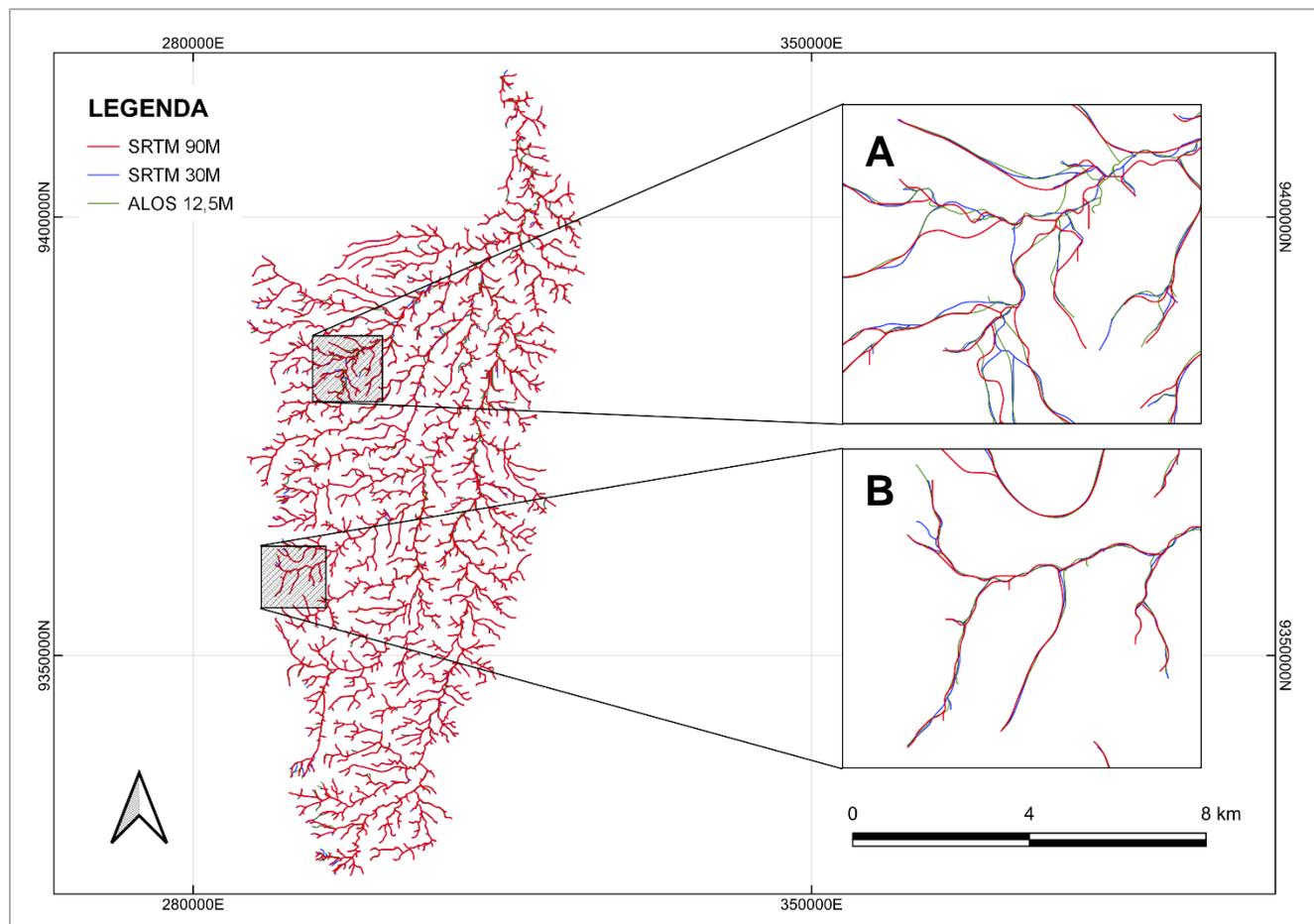
Fonte: elaboração própria

De acordo com os resultados obtidos, nota-se uma baixa variabilidade entre os valores da área. Fazendo o comparativo entre os MDEs, nota-se que a menor diferença foi observada entre o SRTM1 e SRTM3 (2,6 km<sup>2</sup>), modelos com média e baixa resolução, respectivamente. Já a maior diferença foi apontada entre o SRTM3 e ALOS (12,6 km<sup>2</sup>), de baixa e alta resolução, respectivamente. Por se tratar de uma bacia de média escala, as variações nos valores de área, em relação à RHSC, se mostram proporcionais ao tamanho da bacia, embora sejam consideravelmente menores.

Os valores do perímetro, por outro lado, apresentam valores consideravelmente próximos, apresentando baixa variabilidade entre os MDEs, com valores variando entre 276,0 e 277,3 metros, indicando uma amplitude de 1,24 quilômetros. O mesmo ocorre com os demais parâmetros, que apresentam resultados bastante convergentes.

As redes de drenagem, extraídas dos diferentes MDEs, foram sobrepostas em uma única imagem, no intuito de se visualizar as contraposições dos cursos d'água, nas diferentes resoluções. A bacia do açude Carnaubal, por se tratar de uma bacia de média escala, proporciona uma melhor visualização do traçado dos corpos hídricos, em relação à RHSC. O comparativo está exposto na Figura 12. É possível notar em alguns pontos específicos na região da bacia, locais em que os segmentos de fluxo divergem em uma maior proporção, como indica a Figura 12-A. Também é possível notar visualmente que, em regiões mais próximas das nascentes – ou extremidades – da bacia, há uma tendência maior a ocorrer discordâncias entre os fluxos dos diferentes MDEs, como ilustrado na Figura 12-B.

Figura 12 - Comparativo entre as redes de drenagem obtidos dos MDEs para a Bacia do açude Carnaubal



Fonte: elaboração própria

Para se realizar uma melhor análise da precisão dos resultados e da sua variabilidade entre os MDEs, bem como uma melhor visualização do comparativo entre os parâmetros, foram calculadas as variações entre os índices extraídos. Dessa forma, as tabelas 17, 18 e 19 apresentam os valores calculados de V1, V2 e V3, que relacionam os resultados obtidos através dos três MDEs estudados.

Tabela 17 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e SRTM3 na Bacia Carnaubal

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>Variação 1 (V1)</b> |
|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 2065,844           | 2068,437           | 0,1255%                |
| Perímetro (Km)           | 277,2676           | 276,9183           | 0,1260%                |
| Comp. dos Rios (Km)      | 1973,015434        | 1973,237477        | 0,0113%                |
| Comp. Rio Principal (Km) | 126,9257           | 125,2146           | 1,3481%                |

Fonte: elaboração própria

Tabela 18 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e ALOS na Bacia Carnaubal

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> | <b>Variação 2 (V2)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 2065,844           | 2055,818            | 0,4853%                |
| Perímetro (Km)           | 277,2676           | 276,0224            | 0,4491%                |
| Comp. dos Rios (Km)      | 1973,015434        | 1953,141605         | 1,0073%                |
| Comp. Rio Principal (Km) | 126,9257           | 126,8842389         | 0,0327%                |

Fonte: elaboração própria

Tabela 19 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM3 e ALOS na Bacia Carnaubal

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> | <b>Variação 3 (V3)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 2068,437           | 2055,818            | 0,6101%                |
| Perímetro (Km)           | 276,9183           | 276,0224            | 0,3235%                |
| Comp. dos Rios (Km)      | 1973,237477        | 1953,141605         | 1,0184%                |
| Comp. Rio Principal (Km) | 125,2146           | 126,8842389         | 1,3334%                |

Fonte: elaboração própria

Diante desses resultados, pode-se observar uma baixa variação referente ao perímetro, com uma variação média de 0,30%, e uma variação mínima de 0,12%, entre os MDEs de 30 e 90 metros. Esses valores demonstram-se consideravelmente menores, em comparação às variações de perímetro da RHSC, podendo ser justificados pela menor escala da bacia do Açude Carnaubal.

Já os valores de comprimento total dos rios e o comprimento do rio principal apresentam variações maiores, com variação máxima de 1,34% para o rio principal,

(calculados entre os MDES de 12,5 e 90 metros) e de 1,01% para a rede de drenagem (calculados entre os MDEs de 30 e 90 metros).

Dentre os resultados obtidos para a bacia do Açude Carnaubal, o parâmetro que obteve a maior variação média foi o comprimento do rio principal, com 0,90%, enquanto o perímetro obteve a menor, com 0,30%. Assim como ocorre na RHSC, esses valores, de modo geral, ainda apresentam valores de variação próximos ou inferiores a 1%, indicando uma baixa variabilidade e uma boa precisão nos resultados.

### **5.2.2 Índices morfométricos**

As propriedades morfométricas da Bacia do Açude Carnaubal, extraídas e calculadas dos diferentes MDEs são apresentadas na tabela 20. Nela estão expostos os dados obtidos através das equações e processos apresentados anteriormente, nas três resoluções de MDE estudadas neste trabalho.

Analisando os resultados calculados para os índices morfométricos, pode-se constatar, através dos valores médios para o coeficiente de compacidade (1,70) e fator de forma (0,13), que a bacia apresenta características de baixa propensão a enchentes. Os valores médios de densidade de drenagem (0,95) e índice de circularidade (0,34) indicam uma média densidade de drenagem e uma forma alongada da bacia. O valor médio do índice de sinuosidade (27,06%) indica que a bacia apresenta baixa sinuosidade dos cursos d'água, o que resulta em uma maior velocidade de escoamento.

Assim como na RHSC, a classificação dos índices foi realizada com base no cálculo dos valores médios de cada parâmetro, já que, devido à baixa variabilidade entre os MDEs, os resultados calculados individualmente não apresentariam diferenças entre os resultados obtidos.

Tabela 20 - Características Morfométricas obtidas para a Bacia do Açude Carnaubal

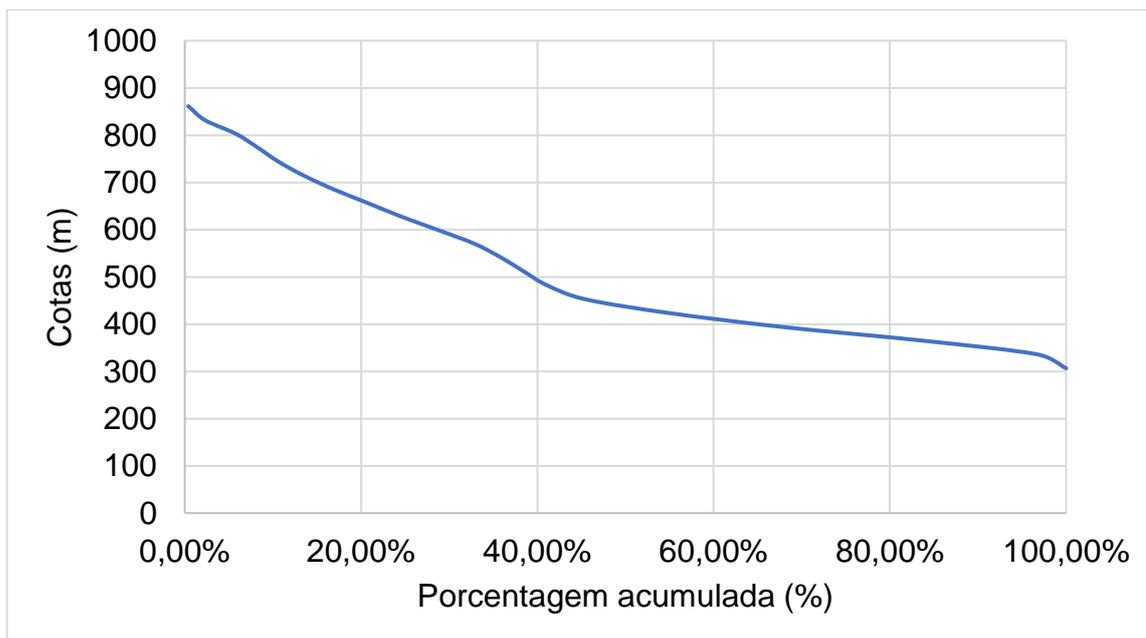
| <b>AÇUDE CARNAUBAL</b>            |              |                    |                    |                     |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| <b>ÍNDICE</b>                     | <b>Unid.</b> | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> |
| Densidade de drenagem - Dd        | Adim.        | 0,955              | 0,954              | 0,950               |
| Altitude máxima - Hmax            | m            | 876,0              | 876,0              | 876,0               |
| Altitude mínima - Hmin            | m            | 292,0              | 296,0              | 292,0               |
| Amplitude altimétrica - Hm        | m            | 584,0              | 580,0              | 584,0               |
| Relação de relevo - Rr            | Adim.        | 0,12849            | 0,12753            | 0,12880             |
| Índice de compacidade - IC        | Adim.        | 0,338              | 0,339              | 0,339               |
| Índice de sinuosidade - Is        | Adim.        | 27,443             | 26,309             | 27,420              |
| Coeficiente de manutenção - Cm    | Adim.        | 1047,049           | 1048,245           | 1052,570            |
| Coeficiente de compacidade - Kc   | Adim.        | 1,708              | 1,705              | 1,705               |
| Fator de forma - F                | Adim.        | 0,12823            | 0,13193            | 0,12769             |
| Índice de rugosidade - Ir         | Adim.        | 557,758            | 553,306            | 554,833             |
| Ext. média do escoamento sup. - I | Adim.        | 0,262              | 0,262              | 0,263               |
| Ordem de Strahler                 | Adim.        | 6                  | 6                  | 6                   |

Fonte: elaboração própria

### 5.2.3 Hipsometria

A altitude mínima e máxima encontradas na bacia foram de 292 e 876 metros, respectivamente, resultando em uma amplitude altimétrica de 584 metros, para os MDEs de 12,5 e 30 metros, e 580 metros para o MDE de 90 metros, visto que há uma ligeira diferença na altitude mínima. A bacia possui uma altitude média de 584 metros e a representação gráfica da curva hipsométrica está representada na Figura 13. Assim como na RHSC, por se tratar de valores muito próximos, não há alterações visuais entre as curvas obtidas para os MDEs, portanto, será apresentado a curva hipsométrica obtida através do MDE ALOS.

Figura 13 - Curva hipsométrica Açude Carnaubal, com base no MDE ALOS

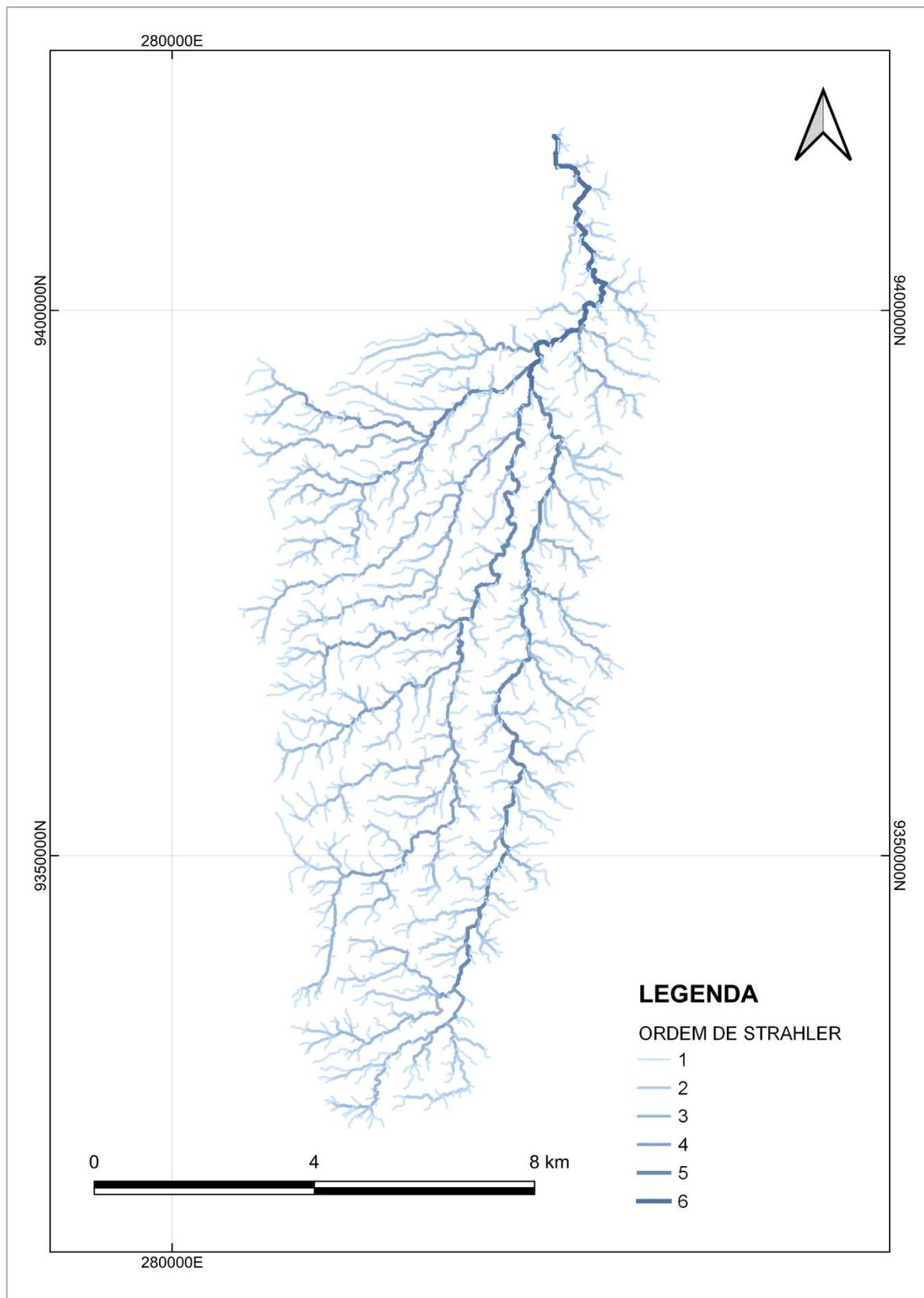


Fonte: elaboração própria

#### 5.2.4 Ordem dos rios

De acordo com a extração de rede de drenagem e análise automática dos cursos dos rios, pode-se constatar que a Bacia do Açude Carnaubal é uma bacia de sexta ordem, de acordo com a classificação de Strahler para a ordem dos cursos dos rios. A Hierarquização dos rios da bacia hidrográfica, extraída do MDE SRTM1 (30m) está representada na Figura 14. A classificação de Strahler para a ordem dos cursos dos rios é a mesma para os três MDEs, visto que não há alterações consideráveis entre as redes de drenagem que possam influenciar no seu resultado.

Figura 14 - Hierarquização dos rios da Bacia do Açude Carnaubal, processado pelo SRTM1 (30m)



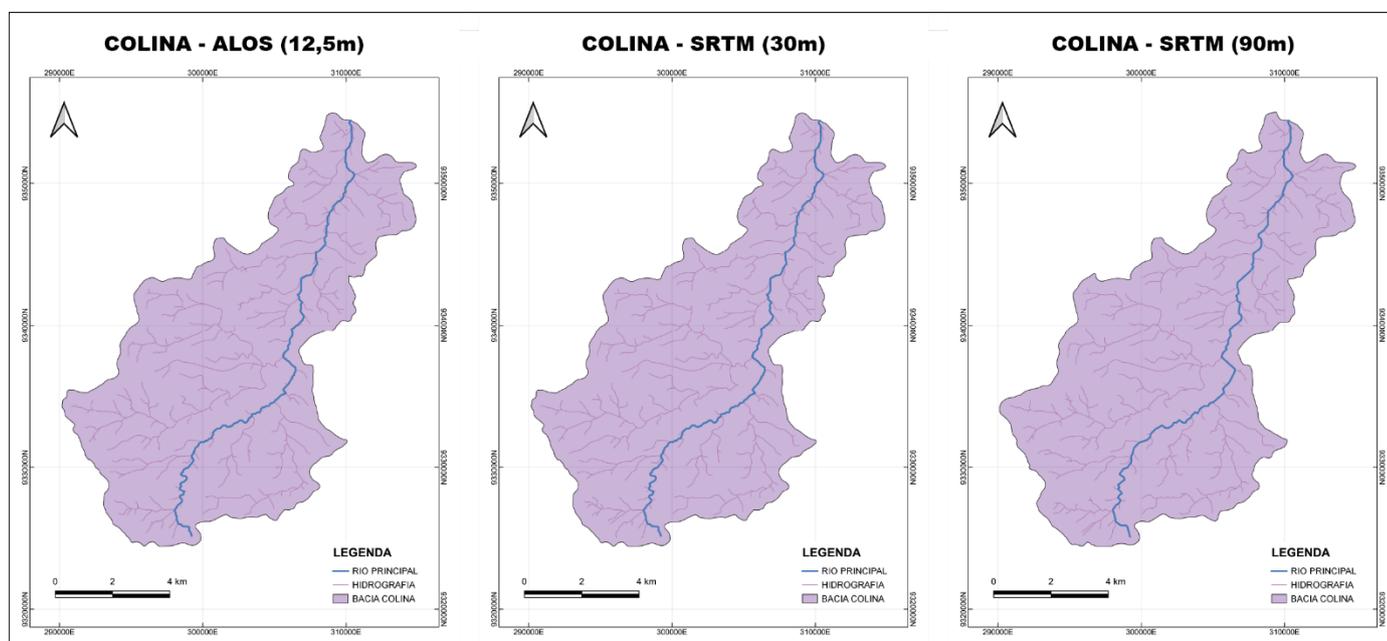
Fonte: elaboração própria

## 5.3 Açude Colina

### 5.3.1 Delimitação da bacia e rede de drenagem

Os resultados da delimitação automática da bacia hidrográfica do Açude Colina, bem como a extração de sua rede de drenagem, estão ilustrados na Figura 15. A imagem demonstra o comparativo visual entre os três resultados extraídos dos MDEs.

Figura 15 - Comparativo entre a delimitação da Bacia do Açude Colina para as diferentes resoluções de MDE



Fonte: elaboração própria

De maneira análoga às bacias anteriores, a bacia Colina também não apresenta diferenças visuais expressivas em sua delimitação, mesmo possuindo uma área consideravelmente maior, o que sugere que a escala da bacia não tem influência notável nos resultados da área e rede de drenagem, a primeiro momento. Os valores exatos de área, perímetro e comprimento dos rios, apresentados na Tabela 21, indicam uma semelhança considerável entre os MDEs.

É interessante observar que na comparação entre os MDEs de 12,5 e 30 metros, que são modelos de resoluções mais altas, os valores da área, perímetro e comprimento do rio principal apresentam valores praticamente iguais, com apenas

diferenças decimais entre si. Os valores do comprimento total da rede de drenagem apresentam uma variação ligeiramente maior, com valores variando entre 342,74 e 348,65 quilômetros.

Tabela 21 – Características geométricas da Bacia do Açude Colina

| <b>ÍNDICE</b>          | <b>Unid.</b>    | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> |
|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Área                   | Km <sup>2</sup> | 353,5353           | 356,8571           | 353,54              |
| Perímetro              | Km              | 107,09             | 106,68             | 107,09              |
| Comp. total dos rios   | Km              | 348,65             | 348,43             | 342,74              |
| Comp. do rio principal | Km              | 40,915             | 39,954             | 40,913              |

Fonte: elaboração própria

De modo geral, a bacia apresenta variações percentuais significativamente pequenas, principalmente ao considerar as diferenças numéricas entre os MDEs. Dentre os parâmetros geométricos calculados, o perímetro detém a menor variação média (0,26%) enquanto o comprimento do rio principal detém a maior variabilidade (1,59%). As tabelas 22 a 24 apresentam os valores calculados de V1, V2 e V3, que relacionam os resultados obtidos através dos três MDEs estudados.

Tabela 22 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e SRTM3 na Bacia do Açude Colina

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>Variação 1 (V1)</b> |
|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 353,5353           | 356,8571           | 0,9396%                |
| Perímetro (Km)           | 107,0921879        | 106,6803           | 0,3846%                |
| Comp. dos Rios (Km)      | 348,6511624        | 348,430752         | 0,0632%                |
| Comp. Rio Principal (Km) | 40,91539           | 39,95397           | 2,3498%                |

Fonte: elaboração própria

Tabela 23 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM1 e ALOS na Bacia do Açude Colina

| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM1 (30m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> | <b>Variação 2 (V2)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 353,5353           | 353,5354            | 0,0000%                |
| Perímetro (Km)           | 107,0922           | 107,0922            | 0,0000%                |
| Comp. dos Rios (Km)      | 348,651            | 342,742             | 1,6948%                |
| Comp. Rio Principal (Km) | 40,915             | 40,913              | 0,0070%                |

Fonte: elaboração própria

Tabela 24 - Variações percentuais entre os valores obtidos para o SRTM3 e ALOS na Bacia do Açude Colina

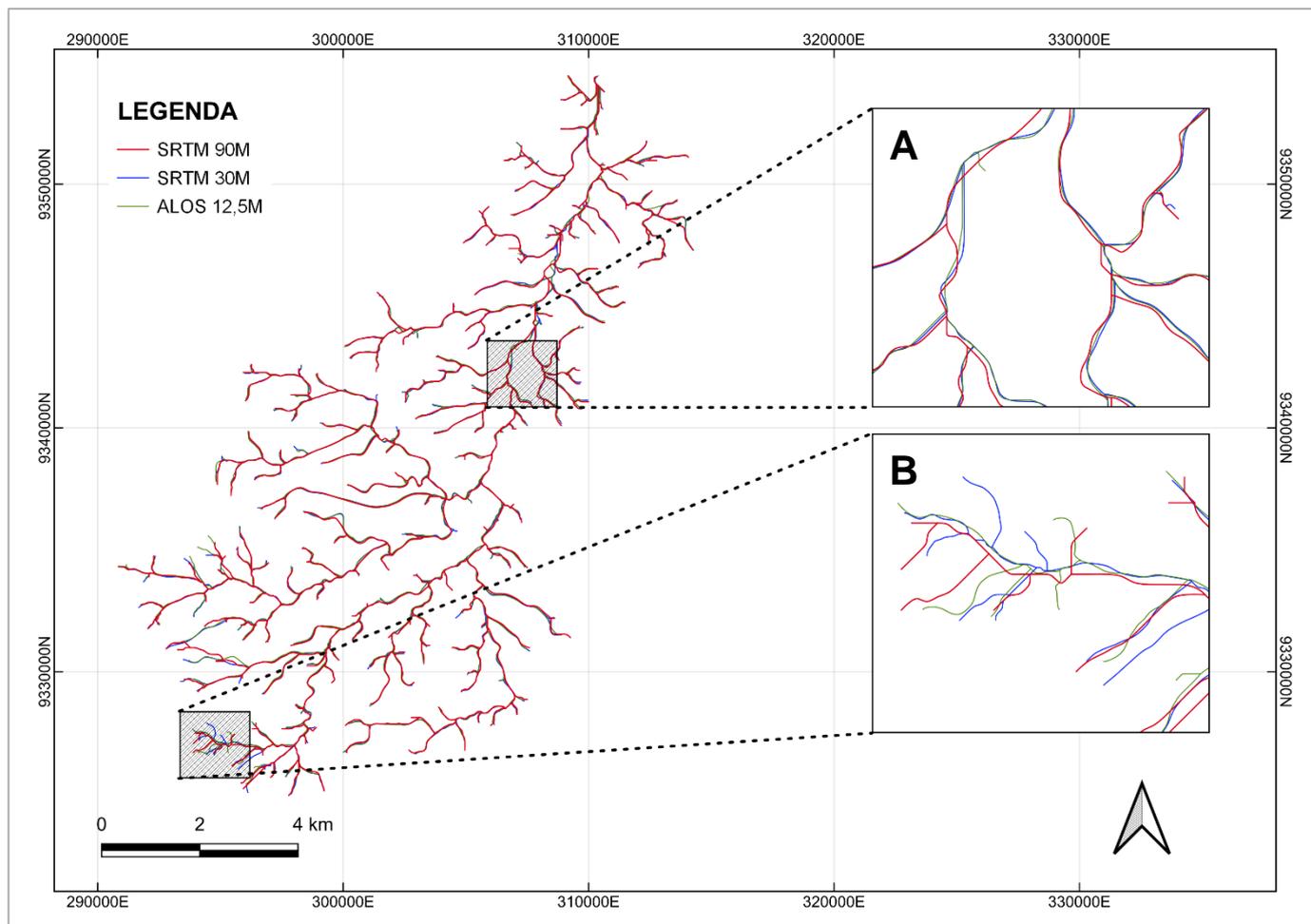
| <b>ÍNDICE</b>            | <b>SRTM3 (90m)</b> | <b>ALOS (12,5m)</b> | <b>Variação 3 (V3)</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Área (Km <sup>2</sup> )  | 356,857            | 353,535             | 0,9308%                |
| Perímetro (Km)           | 106,680            | 107,092             | 0,3861%                |
| Comp. dos Rios (Km)      | 348,431            | 342,742             | 1,6326%                |
| Comp. Rio Principal (Km) | 39,954             | 40,913              | 2,3991%                |

Fonte: elaboração própria

A bacia do açude Colina, por se tratar de uma bacia de escala pequena, ela proporciona um maior detalhamento do traçado dos corpos hídricos, possibilitando uma melhor visualização dos fluxos d'água, em relação à RHSC e Carnaubal. A sobreposição das redes de drenagem obtidas pelos MDEs está exposta na Figura 16.

Como observado na Figura 16-A, de maneira semelhante às bacias anteriores citadas neste trabalho, alguns pontos a jusante da bacia tendem a ter uma maior conformidade entre os traçados dos rios, enquanto que em pontos mais próximos às nascentes há uma maior discrepância entre os segmentos, como indicado na Figura 16-B. Pode-se notar, também, uma maior semelhança visual entre os traçados resultantes do SRTM (30m) e ALOS (12,5m), enquanto que o MDE de 90 metros apresenta uma ligeira discordância.

Figura 16 - Comparativo entre as redes de drenagem obtidos dos MDEs para a Bacia do açude Colina



Fonte: elaboração própria

### 5.3.2 Índices morfométricos

Como a bacia do Açude Colina, assim como a do Açude Carnaubal, são ambas microbacias pertencentes à Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús (RHSC), elas tendem, independentemente de suas escalas, a ter características morfométricas semelhantes. De acordo com os fatores morfométricos calculados, pode-se avaliar a bacia com características de média densidade de drenagem (0,977), índice de circularidade e sinuosidade médios de 0,39 e 22,90%, respectivamente, caracterizando a bacia como de forma alongada e classe II, indicando uma baixa sinuosidade da bacia. Os valores médios de fator de forma (0,21) e coeficiente de compacidade (1,59) indicam que a bacia possui baixa probabilidade de ocorrência de

enchentes. Os índices morfométricos calculados para a bacia Colina estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Características Morfométricas obtidas para a Bacia do Açude Colina

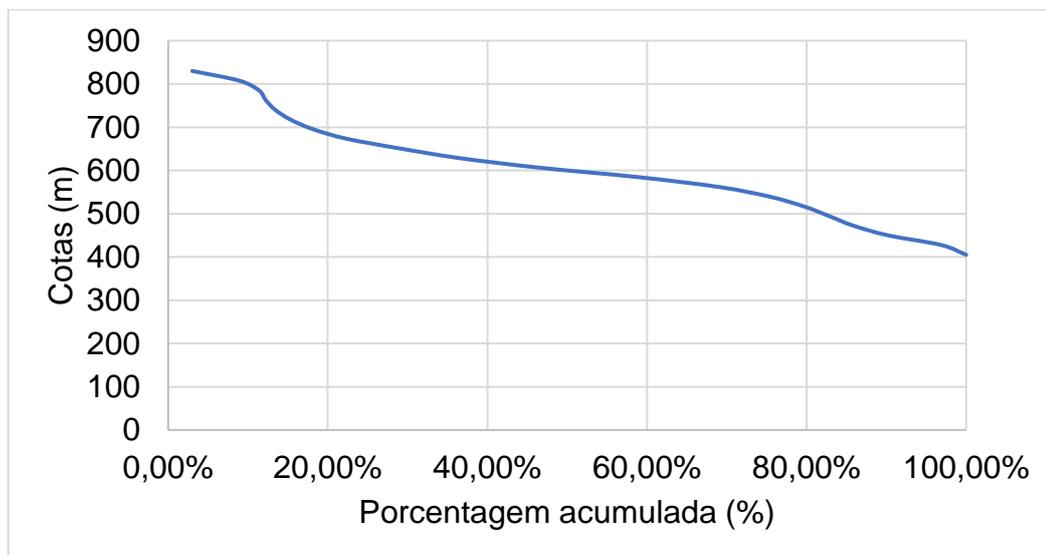
| ÍNDICE                            | Unid. | SRTM1 (30m) | SRTM3 (90m) | ALOS (12,5m) |
|-----------------------------------|-------|-------------|-------------|--------------|
| Densidade de drenagem - Dd        | Adim. | 0,986       | 0,976       | 0,969        |
| Altitude máxima - Hmax            | m     | 841,0       | 842,0       | 841,0        |
| Altitude mínima - Hmin            | m     | 394,0       | 394,0       | 394,0        |
| Amplitude altimétrica - Hm        | m     | 447,0       | 448,0       | 447,0        |
| Relação de relevo - Rr            | Adim. | 0,23773     | 0,23715     | 0,23773      |
| Índice de compacidade - IC        | Adim. | 0,387       | 0,394       | 0,387        |
| Índice de sinuosidade - Is        | Adim. | 31,271      | 31,325      | 31,285       |
| Coefficiente de manutenção - Cm   | Adim. | 23,571      | 21,598      | 23,531       |
| Coefficiente de compacidade - Kc  | Adim. | 1014,009    | 1024,184    | 1031,490     |
| Fator de forma - F                | Adim. | 1,595       | 1,581       | 1,595        |
| Índice de rugosidade - Ir         | Adim. | 0,21118     | 0,22355     | 0,21121      |
| Ext. média do escoamento sup. - I | Adim. | 440,825     | 437,422     | 433,354      |
| Ordem de Strahler                 | Adim. | 5           | 5           | 5            |

Fonte: elaboração própria

### 5.3.3 Hipsometria

O ponto de menor altitude da bacia, de acordo com os MDEs, foi de 394 metros, mesmo valor para os três MDEs, enquanto a altitude máxima foi de 842 metros para o SRTM3 e 841 metros para os demais MDEs, indicando uma amplitude altimétrica média de 447,3 metros. A altitude média calculada para a bacia é de 617,7 metros. Assim como nas bacias anteriores, não há diferenças significativas entre os valores de altitude para cada MDE. Dessa forma, as curvas hipsométricas demonstram-se semelhantes. Portanto, a representação da curva, com base no MDE ALOS está exposta na Figura 17.

Figura 17 - Curva hipsométrica Açude Colina, com base no MDE ALOS

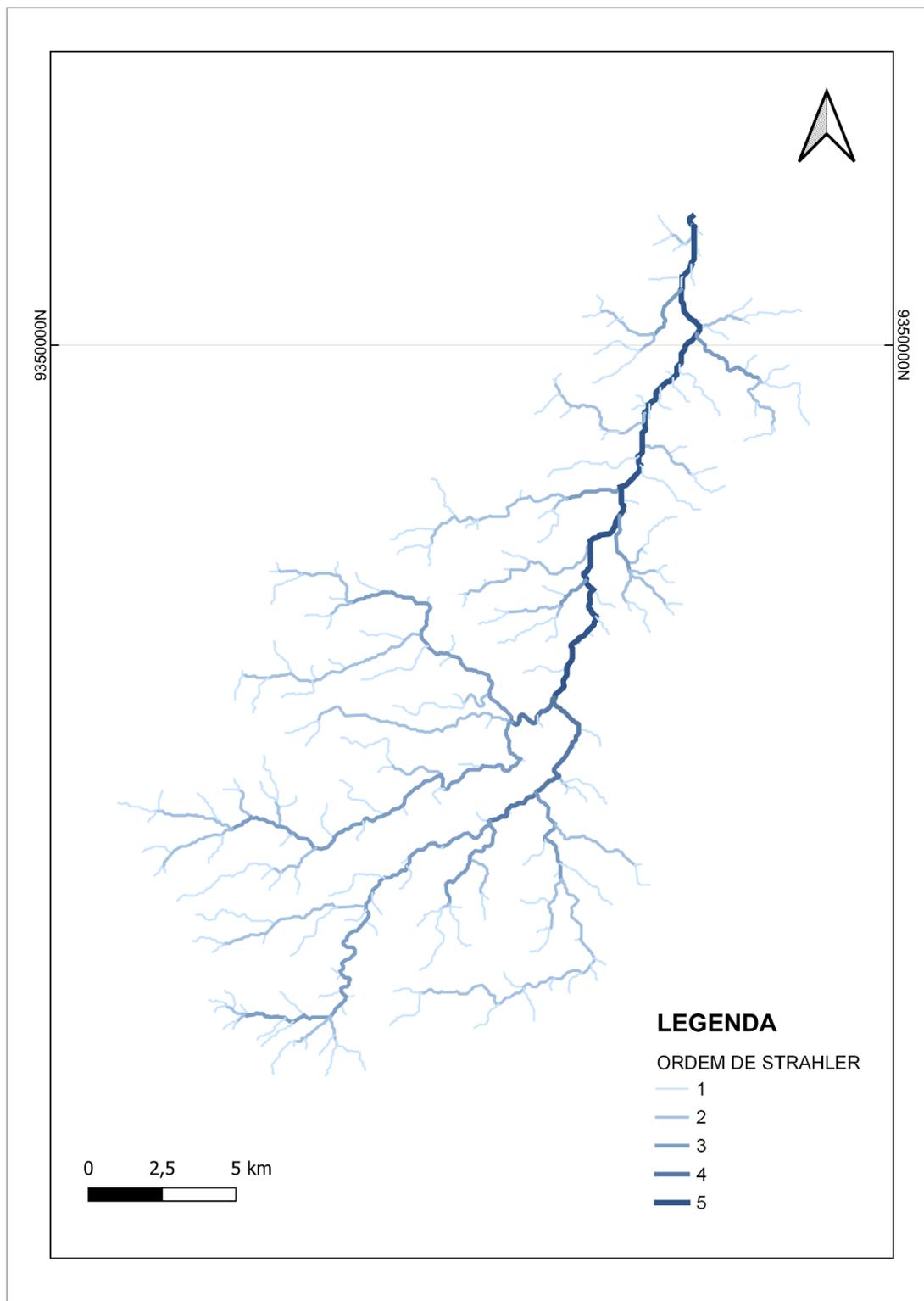


Fonte: elaboração própria

#### 5.3.4 Ordem dos rios

A Figura 18 representa a hierarquização fluvial e a classificação das ordens dos rios, de acordo com a classificação de Strahler, extraídas do MDE SRTM1 (30m). De acordo com essa análise, pode-se constatar que a bacia apresenta uma classificação de ordem 5. A classificação de Strahler para a ordem dos cursos dos rios é a mesma para os três MDEs, visto que não há alterações consideráveis entre as redes de drenagem que possam influenciar no seu resultado.

Figura 18 - Hierarquização dos rios da Bacia do Açude Colina, processado pelo SRTM1 (30m)



Fonte: elaboração própria

#### 5.4 Análise comparativa dos resultados

Após se obter os resultados da caracterização das bacias hidrográficas, considerando as três escalas diferentes e as três resoluções de MDE, foi possível observar alguns pontos relevantes em relação à caracterização morfométrica.

Dos valores obtidos para a delimitação das bacias, considerando as áreas de drenagem, perímetro e suas respectivas hidrografias, bem como a extração de seus corpos hídricos, nota-se uma proporcionalidade, em relação ao perímetro, com a escala das bacias. Há uma tendência de redução dos valores médios de variação desse parâmetro conforme são aplicados em bacias de menores áreas. Na bacia de maior escala (RHSC), pode-se apontar uma variação média do perímetro de 1,21% entre as diferentes resoluções de MDE, enquanto as bacias de média e pequena escala (Carnaubal e Colina) apresentam variações menores, de 0,30% e 0,26%, respectivamente. Porém, de modo geral, não se observam alterações expressivas entre os valores obtidos. As duas bacias menores, que possuem perímetros de até 300 quilômetros, possuem variações semelhantes, enquanto a bacia de maior escala, com perímetro acima de 600 quilômetros, apresenta valores mais representativos.

De todo modo, apesar de haver variações maiores na RHSC, as divergências entre os valores ainda se mostram ínfimas, do ponto de vista hidrológico. Ao se observar as três bacias, de forma geral, observam-se que todos os valores de variação obtidos se encontram abaixo de 2%, sugerindo que não há influência direta no cálculo dos índices morfométricos.

Em relação à área de drenagem, não se notou variações consideráveis entre as três bacias. A área da RHSC apresenta uma variação média de 0,50%, enquanto as bacias dos açudes Carnaubal e Colina apresentam variações de 0,41% e 0,62%. Os valores são suficientemente próximos, com diferenças percentuais de aproximadamente 0,1% entre si, indicando que também não há influência considerável da escala da bacia na obtenção da área de drenagem. Isso indica que, apesar de haver uma maior precisão na caracterização de bacias com menores escalas, não há diferença considerável que possa influenciar nos resultados finais.

De maneira oposta ao que ocorre à área e ao perímetro, os valores obtidos para o comprimento do curso do rio principal apresentam tendência a serem maiores em bacias de menor escala. Observando as variações médias, o comprimento do rio principal apresentou variação média de 0,40% para a RHSC e esse valor aumenta

conforme é calculado nas bacias menores (0,90% para a Carnaubal e 1,59% para a Colina). Nesse caso, há uma maior expressividade na diferença entre as variações, que demonstram ser inversamente proporcionais à escala da bacia, indicando uma maior precisão no traçado do rio na bacia de maior escala.

Diante dos três MDEs estudados, ao se fazer uma análise geral dos resultados obtidos entre os parâmetros geométricos, notou-se uma maior variação dos resultados no comparativo entre os MDEs SRTM1 (90m) e ALOS (12,5m), o que é justificável, devido à diferença entre as suas resoluções, que representam a baixa e alta resolução, respectivamente.

Os parâmetros morfométricos calculados para cada bacia apresentaram valores semelhantes e com baixa variabilidade, resultando em classificações morfométricas iguais para os diferentes MDEs, de acordo com os índices calculados. Isso implica que não houve influência direta da resolução na caracterização morfométrica da bacia, ocorrendo variação entre os seus valores, mas não influenciando diretamente nas características. Tal fato ocorre nas três escalas de bacias estudadas. Apesar de possuírem dimensões diferentes, as bacias, por se localizarem em uma mesma região hidrográfica, tendem a apresentar características hidrológicas e morfométricas semelhantes, como a baixa probabilidade de ocorrência de enchentes ou a média densidade de drenagem observada no estudo.

As variações V1 e V2, que representam as variações calculadas entre os MDEs de 30 e 90 metros e os MDEs de 30 e 12,5 metros, respectivamente, não apresentam diferenças expressivas entre si, com variações médias semelhantes entre suas comparações. Isso sugere que não há divergência expressiva entre os MDEs de maiores resoluções, ou seja, o MDE de 12,5 metros não apresenta, necessariamente, resultados mais precisos, em relação ao MDE de 30 metros.

O MDE de 30 metros apresenta baixas taxas de variações, tanto em relação à resolução alta, quanto à baixa, mostrando-se, assim, uma alternativa que pode ser considerada uma opção adequada para a realização da caracterização morfométrica das bacias hidrográficas, independentemente das escalas analisadas. O modelo de 30 metros apresenta proximidade tanto dos valores obtidos pelo MDE de 12,5 metros, como do MDE de 90 metros.

Diante dos resultados e analisando a variabilidade de cada comparativo, constata-se a eficiência do modelo na média resolução (30 metros). A resolução mais alta (ALOS), apesar de apresentar precisão ligeiramente maior, não aponta diferenças

expressivas em relação ao SRTM1, além de exigir mais tempo e um poder maior de processamento, por parte dos softwares SIG. Dessa forma, ao se analisar um contexto geral, além da análise quantitativa, é relevante citar o contexto em que se considera as etapas de geoprocessamento, coleta e análise dos dados, tornando o SRTM 30m uma alternativa viável, já que resulta em uma análise mais rápida e igualmente precisa dos dados da bacia hidrográfica, bem como sua devida caracterização morfométrica.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi realizar um comparativo acerca da influência da resolução espacial dos modelos digitais de elevação na caracterização morfométrica da RHSC. A premissa foi de que modelos com maiores resoluções, como o modelo ALOS, obteriam, necessariamente, resultados mais precisos e detalhados. Porém, é importante considerar todas as etapas do estudo, desde a coleta de dados, até o processamento computacional, levando em consideração o tempo de execução dos softwares, facilidade de acesso aos MDEs e poder de processamento computacional, por exemplo. Parâmetros como a escala das bacias hidrográficas analisadas também foram considerados.

De acordo com os resultados apresentados, pôde-se constatar que apesar de haver divergências e alterações entre os valores obtidos para as áreas de drenagem e outras características da bacia, elas não foram suficientemente grandes para que houvesse influência no resultado da caracterização das bacias.

Entretanto, de modo geral, ao se realizar o comparativo entre os valores de variação média entre os diferentes MDE, pôde-se constatar uma melhor eficiência dos resultados obtidos através do SRTM1, com resolução espacial de 30 metros. Tal fato se justifica pela boa precisão dos valores, bem como a proximidade dos resultados com o ALOS, tornando, assim, dispensável a utilização do MDE de 12,5 metros, considerando todas as etapas de processamento e obtenção de dados. De todo modo, tal influência deve ser considerada como uma fonte de incerteza adicional em estudos hidrológicos que dependam dessas variáveis.

A escala das bacias estudadas também não apresentou influência considerável nos valores obtidos. Porém, é relevante, para trabalhos futuros, analisar escalas ainda menores, considerando corpos d'água de magnitude inferiores aos estudados neste trabalho, com a possibilidade de haver variações mais significantes para tais bacias.

Desse modo, estudos de morfometrias de bacias hidrográficas devem ser criteriosos na seleção da imagem a ser utilizada como modelo digital de elevação. O presente trabalho utilizou de técnicas visuais e quantitativas para a realização da análise da eficiência dos MDEs na caracterização das bacias, utilizando valores médios de variação. Portanto, para trabalhos futuros sugere-se um maior aprofundamento acerca da comparação entre MDEs, com a utilização de técnicas

estatísticas mais rebuscadas, visando uma maior precisão dos resultados e assim, obter-se um maior enriquecimento de informações relacionadas à região hidrográfica e suas microbacias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BISPO, P. DA C.; VALERIANO, M. DE M.; KUPLICH, T. M. Relação entre as variáveis morfométricas extraídas de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e a vegetação do Parque Nacional de Brasília. p. 96–103, 2010.
- BUARQUE, N. M. S.; CARVALHO, S. M. DE C.; PEREIRA, M. DE O. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO AÇUDE COLINA, QUITERIANÓPOLIS, CEARÁ, BRASIL APÓS EVENTO DE FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Bento Gonçalves: 2013.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO**. São José dos Campos: [s.n.]. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- CARDOSO, C. A. et al. **CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DEBOSSAN, NOVA FRIBURGO, RJ 1**. Viçosa, MG: [s.n.].
- CEARÁ, S. DOS R. H. **INVENTÁRIO AMBIENTAL AÇUDE COLINA**. Fortaleza: [s.n.].
- CEARÁ, S. DOS R. H. **INVENTÁRIO AMBIENTAL AÇUDE CARNAUBAL**. Fortaleza Eixo Monitoramento Quantitativo e Qualitativo dos Recursos Hídricos, 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1980.
- COGERH. **CADERNO DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**. Fortaleza: [s.n.].
- COGERH. **DIAGNÓSTICO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**. [s.l: s.n.].
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: [s.n.].
- COSTA, R. C. A. **INDICADORES MORFOMÉTRICOS: UMA FERRAMENTA NO DIAGNÓSTICO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL**. [s.l: s.n.].
- CUNHA, E. R. DA; BACANI, V. M. Influência da resolução do MDE na caracterização morfométrica de bacia hidrográfica. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 59, p. 1029, 30 out. 2019.
- EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- ESRI, E. S. R. I. **Arc Hydro - GIS for water resources**. , 2022.
- FELIZARDO, L. M. **Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana**. Ilha Solteira: [s.n.].

- FERREIRA, N. C. **SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**. [s.l: s.n.].
- FILHO, J. L. **INTRODUÇÃO A SIG - SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**. Porto Alegre: [s.n.].
- FREITAS, A. DE S. **CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIUM - TO**. Palmas: [s.n.].
- GOMES, F. A. L. **CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FARINHAS-PB ATRAVÉS DE DADOS SRTM**. Areia: [s.n.].
- GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. DOS S. **APLICAÇÕES DOS MODELOS DE ELEVAÇÃO SRTM EM GEOMORFOLOGIA SRTM DEMs APPLICATIONS IN GEOMORPHOLOGY**. p. 73–83, 2008.
- GUARIZ, H. R. **Morfometria e Atributos Físicos do Solo da Microbacia do Córrego Jaqueira-Alegre, ES**. Alegre: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.livrosgratis.com.br>>.
- JÚNIOR, J. C. D. L. et al. **DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA SUB-BACIA DO RIACHO MADEIRA CORTADA, QUIXELÔ, CE**. **Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação - CONNEPI**, 2012.
- LIMA, I. M. DE M. F. **CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POTI IRACILDE MARIA DE MOURA FÉ LIMA**. [s.l: s.n.].
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento Em Recursos Hídricos: Princípios, Integração E Aplicação**. 2. ed. [s.l: s.n.]. v. 1
- NAMIKAWA, L. M. et al. **MODELAGEM NUMÉRICA DE TERRENO E APLICAÇÕES**. São José dos Campos: [s.n.].
- PEREIRA, E. et al. **COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE ELEVAÇÃO SRTM DE 30 E 90 M NA CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**. III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS. **Anais...Associação COMVERGIR Sustentável**, jun. 2017.
- RAMOS, F. et al. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 1989. v. 2
- RIBEIRO, D. DE A.; SANTOS, J. C. DOS. **TRÊS NOVAS METODOLOGIAS PARA HIERARQUIZAÇÃO DE BÁCIAS HIDROGRÁFICAS**. Os Modelos de: Cosme dos Santos e Daniel Ribeiro. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.
- SANTANA, V. P. S. et al. **ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA DO CHORÓ, MUNICÍPIO DE CHORÓ-CEARÁ**. **II Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro**, 2015.
- SANTOS, A. M. DOS et al. **Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil**. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

SCHNORR, G. G.; SCCOTI, A. A. V.; PETSCH, C. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ: CENTRO DO RIO GRANDE DO SUL. **REVISTA GEONORTE**, v. 12, n. 39, p. 44–63, 12 jul. 2021.

SILVA, C. R. P. DA et al. **Diferentes modelos digitais de elevação na caracterização física da bacia hidrográfica do Rio Nandico, MT, Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[www.scienciaplena.org.br051701-1](http://www.scienciaplena.org.br051701-1)>.

SILVA, Q. D. DA. **MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO DA ILHA DO MARANHÃO**. Presidente Prudente: [s.n.].

SILVA, F. D. M. DI. **ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS A PARTIR DE SENSORES ORBITAIS: ESTUDO DE CASO DA BACIA EXPERIMENTAL DO ALTO RIO JARDIM**. Planaltina: [s.n.].

SILVA, M. S. **Sistemas de Informações Geográficas: elementos para o desenvolvimento de bibliotecas digitais geográficas distribuídas**. 2006.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913, 1957.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia - Ciências e aplicação**. 1. ed. Porto Alegre: UFRS, 1993.

VALERIANO, M. DE M.; ROSSETTI, D. DE F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300–309, mar. 2012.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. [s.l: s.n.].