



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Vitor Pessoa Caminha

**Caracterização morfométrica de uma microbacia hidrográfica na cidade de Mossoró-
RN**

MOSSORÓ

2024

Vitor Pessoa Caminha

**Caracterização morfométrica de uma microbacia hidrográfica na cidade de Mossoró-
RN**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Paulo Cesar Moura da Silva,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C183c Caminha, Vitor Pessoa.
Caracterização morfométrica de uma microbacia
hidrográfica na cidade de Mossoró-RN / Vitor
Pessoa Caminha. - 2024.
52 f. : il.

Orientador: Paulo César Moura da Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. drenagem urbana. 2. escoamento superficial.
3. impermeabilização do solo. 4. inundações
urbanas. 5. geoprocessamento. I. Moura da Silva,
Paulo César, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Vitor Pessoa Caminha

Caracterização morfométrica de uma microbacia hidrográfica na cidade de Mossoró

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 24 /outubro /2024.

BANCA EXAMINADORA

Paulo César Moura da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

Daniela da Costa Leite Coelho, Prof. Dra. (UFERSA)

Membro Examinador

Felipe Augusto Dantas de Oliveira, Engenheiro Civil.

(Prefeitura Municipal de Mossoró)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Sem o apoio e a colaboração de cada um, essa conquista não teria sido possível.

Agradeço, em especial, à minha esposa Pamella, pelo suporte incondicional e pela participação ativa ao longo de toda a elaboração deste estudo. Sua parceria foi essencial em cada etapa do processo.

Minha gratidão também à minha família, pelo apoio constante e encorajamento em todos os momentos. Agradeço ao meu pai Solerne, à minha mãe Cristine, e ao meu irmão Mateus, por sempre acreditarem em mim e me motivarem a seguir em frente.

Ao meu orientador Professor Paulo César, registro meus sinceros agradecimentos por todo o suporte, paciência e valiosa orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meu agradecimento à banca avaliadora, composta pelo engenheiro civil Felipe Augusto e pela professora Daniela Leite, pela disponibilidade e pelas contribuições enriquecedoras que certamente acrescentaram muito a este projeto.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

A gestão sustentável dos recursos hídricos é um desafio crescente em face das mudanças climáticas e da urbanização acelerada que impactam diretamente a dinâmica das bacias hidrográficas. Com base nesse contexto, este estudo buscou apresentar a delimitação e análise morfométrica de uma microbacia urbana localizada na bacia 04, no município de Mossoró, estado brasileiro do Rio Grande do Norte, destacando seus aspectos hidrológicos e geométricos. A microbacia em questão foi delimitada com base em um Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido através da plataforma ALOS PALSAR, onde foi possível evidenciar elementos como as curvas de nível, cursos d'água e ponto de exutório, com o uso do software de geoprocessamento livre e gratuito Qgis, e dos algoritmos do GRASS. Nossos resultados revelaram uma área total de drenagem de 67,12 hectares (671,210m²), com um perímetro de 5.339 metros. A análise evidenciou uma ocupação urbana de 93,93%, indicando um solo amplamente impermeabilizado e com uma maior propensão ao escoamento superficial e alagamentos. O estudo destacou ainda, através do coeficiente de compactidade, que a microbacia possui uma forma menos compacta e com maior dispersão de escoamento. O fator de forma caracterizou a bacia como alongada, o que retarda o fluxo e minimiza picos de vazão imediatos. O índice de circularidade e a razão de alongação reforçam a característica alongada da microbacia, contribuindo para um escoamento lento. Ademais, as características altimétricas associadas a declividade, indicaram que a bacia está inserida em um terreno plano. A rede de drenagem da microbacia possui um único curso d'água principal, e o tempo de concentração calculado (35,43 minutos) sugere uma resposta rápida em eventos de chuva intensa. Por fim, os dados indicaram que as características encontradas para esta microbacia urbana podem sobrecarregar as estruturas de drenagem e refletem nos frequentes eventos de alagamento vivenciados na região a qual a microbacia está inserida.

Palavras-chave: drenagem urbana; escoamento superficial; impermeabilização do solo; inundações urbanas; geoprocessamento.

ABSTRACT

Sustainable water resource management is a growing challenge in the face of climate change and accelerated urbanization that directly impact the dynamics of watersheds. Based on this context, this study sought to present the delimitation and morphometric analysis of an urban microbasin located in basin 04, in the municipality of Mossoró, Brazilian state of Rio Grande do Norte, highlighting its hydrological and geometric aspects. The microbasin in question was delimited based on a Digital Elevation Model (DEM) obtained through the ALOS PALSAR platform, where it was possible to highlight elements such as contour lines, watercourses and outlet points, with the use of the free and open source geoprocessing software Qgis, and GRASS algorithms. Our results revealed a total drainage area of 67.12 hectares (671,210 m²), with a perimeter of 5,339 meters. The analysis showed an urban occupation of 93.93%, indicating a largely impermeable soil with a greater propensity for surface runoff and flooding. The study also highlighted, through the compactness coefficient, that the microbasin has a less compact shape and greater runoff dispersion. The shape factor characterized the basin as elongated, which slows the flow and minimizes immediate flow peaks. The circularity index and the elongation ratio reinforce the elongated characteristic of the microbasin, contributing to a slow flow. Furthermore, the altimetric characteristics associated with the slope indicated that the basin is located on flat terrain. The drainage network of the microbasin has a single main watercourse, and the calculated concentration time (35.43 minutes) suggests a rapid response in heavy rain events. Finally, the data indicated that the characteristics found for this urban microbasin can overload the drainage structures and are reflected in the frequent flooding events experienced in the region in which the microbasin is located.

Keywords: urban drainage; surface runoff; soil waterproofing; urban flooding; geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Divisão das Bacias Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil.	14
Figura 2: Padrões de drenagem de bacias hidrográficas: 1) dendrítico; 2) treliçado; 3) radial; 4) centrípeto; 5) retangular e 6) desorganizado.	16
Figura 3: Comparativo entre uma bacia hidrográfica inicialmente rural e após o processo de urbanização.	18
Figura 4: Municípios que pertencem a Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, RN, Brasil.	22
Figura 5: Bacias hidrográficas urbanas do município de Mossoró-RN, Brasil.	23
Figura 6: Fluxograma das etapas e comandos executados para delimitação da microbacia de estudo.	24
Figura 7: Vista da tela de execução para reprojeter camada vetorial.	25
Figura 8: Vista da tela de execução para recortar a camada vetorial para a área de Mossoró-RN.	26
Figura 9: Vista da tela de execução do algoritmo <i>r.fill.dir</i> do GRASS.	27
Figura 10: Vista da tela de execução do algoritmo <i>r.watershed</i> .	28
Figura 11: Vista da tela de execução do algoritmo <i>r.thin</i> .	29
Figura 12: Vista da tela de execução do comando Contorno para extração das curvas de nível da área de estudo.	30
Figura 13: Ponto de exutório da microbacia hidrográfica do estudo.	31
Figura 14: Vista da tela de execução do algoritmo <i>r.water.outlet</i> para delimitação da microbacia em estudo.	32
Figura 15: Vista da tela de execução do algoritmo <i>r.to.vect</i> para conversão do arquivo de raster para vetorial.	33
Figura 16: Vista da tela de execução do algoritmo <i>r.generalize</i> .	34
Figura 17: Mapa da microbacia hidrográfica urbana delimitada, localizada em Mossoró-RN.	40
Figura 18 – Sistema de drenagem no ponto de exutório.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de C, segundo adaptação do critério de Fruhling, adotados pela prefeitura de São Paulo.	39
Tabela 2: Caracterização geométrica da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.	42
Tabela 3 - Interpretação do coeficiente de compacidade (Kc) da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.....	42
Tabela 4 - Interpretação do fator de forma ou coeficiente de forma da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.....	43
Tabela 5 - Características do Relevo da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.	44
Tabela 6 - Características da rede de drenagem da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN..	44
Tabela 7 - Estimativa da intensidade da chuva máxima para diferentes tempos de retorno para a microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.....	45
Tabela 8 - Estimativa da vazão de escoamento superficial para diferentes tempos de retorno para a microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.....	46

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	11
2.OBJETIVOS	12
2.2. Objetivo geral.....	12
2.3. Objetivos específicos	12
3.REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1. Bacias Hidrográficas.....	13
3.2. Sub-bacias e Microbacias Hidrográficas.....	14
3.3. Morfometria de Bacias Hidrográficas.....	15
3.4. Ocupação do Solo e os Impactos da Urbanização nas Bacias de Drenagem	17
3.5. Ferramentas de Geoprocessamento.....	19
4.MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1. Caracterização da área de estudo	21
4.2. Coleta de dados.....	23
4.2.1. Delimitação da Microbacia a partir de um MDE	25
4.2.2. Parâmetros Morfométricos da Microbacia.....	34
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. Delimitação da microbacia hidrográfica urbana em estudo no município de Mossoró-RN.....	40
5.2. Morfometria da microbacia hidrográfica urbana em estudo no município de Mossoró-RN.....	42
5.2.1. Características Geométricas	42
5.2.2. Características do relevo	43
5.2.3. Características da rede de drenagem	44
5.2.4. Intensidade da chuva	45
5.2.5. Vazão de escoamento superficial	46
6.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos é um desafio crescente em face das mudanças climáticas e da urbanização acelerada que impactam diretamente a dinâmica das bacias hidrográficas. A bacia hidrográfica é uma unidade natural de captação e escoamento das águas pluviais, definida por divisores topográficos, esta desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico (TUCCI, 1997). Neste contexto, a compreensão das características morfométricas, das interações entre os componentes físicos e bióticos das bacias hidrográficas, associados aos efeitos da ocupação do solo se tornam essenciais para a formulação de estratégias de gestão de águas pluviais (PORTO; PORTO, 2008).

No contexto das áreas urbanas, a compreensão da morfometria e da ocupação do solo é essencial para mitigar os impactos adversos da urbanização, como enchentes, erosões e degradação da qualidade da água (TUCCI, 2007; SILVA; TROLEIS, 2019). Nesse sentido, a delimitação e o estudo das sub-bacias e microbacias são ferramentas indispensáveis para o planejamento territorial e a formulação de estratégias eficientes de manejo hídrico e ambiental (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Neste sentido, a utilização de ferramentas de geoprocessamento, como Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Modelos Digitais de Elevação (MDE), possibilitam uma análise mais precisa das características morfométricas e da ocupação do solo, oferecendo subsídios para o planejamento de estruturas de drenagem e mitigação dos impactos da urbanização (TUCCI, 2007; VEIGA et al. 2020; BARBOSA et al. 2022).

Diante desse cenário, este estudo buscou analisar a dinâmica hidrológica e morfométrica de uma microbacia de drenagem urbana localizada no município de Mossoró, estado brasileiro do Rio Grande do Norte (RN), integrante da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró. A partir da delimitação da microbacia e da aplicação de índices morfométricos, o estudo visou identificar os principais fatores que influenciam o escoamento superficial na área estudada, e consequentemente as áreas mais afetadas com alagamentos, e relacioná-los aos impactos da urbanização, através do uso de tecnologias de geoprocessamento.

2. OBJETIVOS

2.2.Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a microbacia hidrográfica 04, na zona urbana do município de Mossoró-RN, utilizando técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dados do satélite ALOS PALSAR de alta resolução altimétrica. A caracterização inclui aspectos morfométricos, como a configuração, dimensões da bacia, relevo e sistema de drenagem.

2.3.Objetivos específicos

1. Realizar a análise morfométrica, quantificando parâmetros como área da bacia, comprimento dos cursos d'água, densidade de drenagem e índices de forma, que ajudam a compreender a forma e as características físicas da bacia;
2. Caracterizar o relevo, identificando e mapeando as variações altimétricas dentro da bacia, considerando aspectos como altitude e declividade.
3. Indicar as áreas mais afetadas pelas possíveis áreas não drenadas na região da bacia de drenagem.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

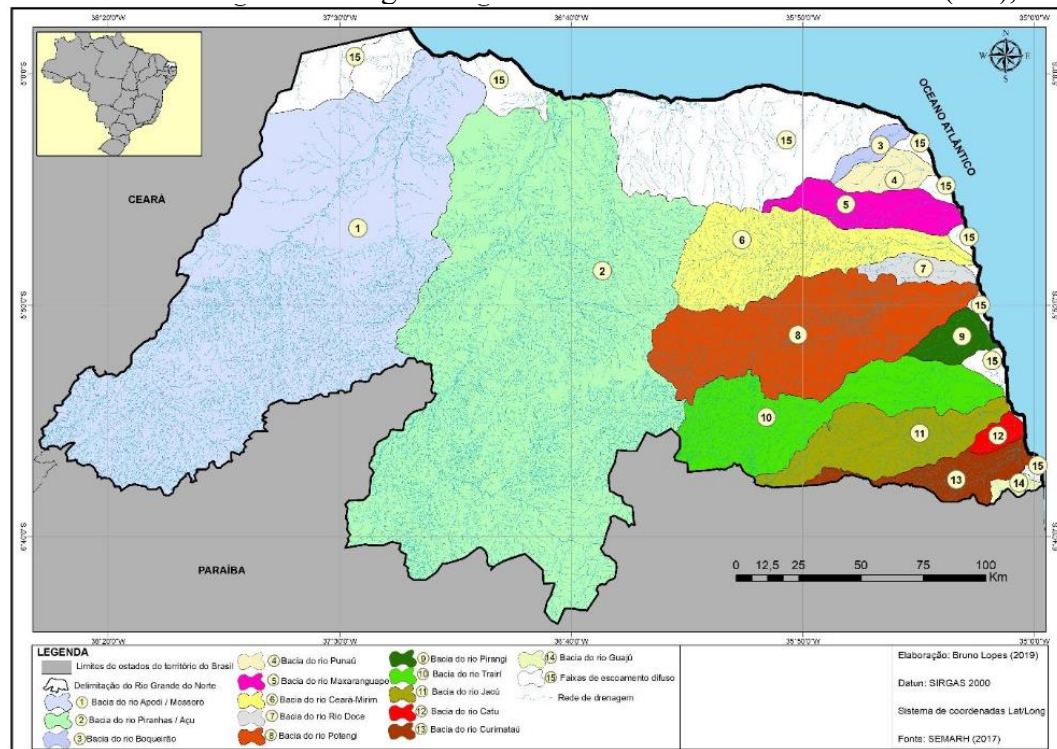
3.1. Bacias Hidrográficas

Bacias hidrográficas são áreas delimitadas por divisores de água, onde toda a precipitação é direcionada para um ponto de menor altitude, o exutório (AZEVEDO; BARBOSA, 2011). Compostas por um rio principal e seus afluentes (BARRELLA, 2001), essas bacias funcionam como sistemas de drenagem, captando, armazenando e escoando a água. A dinâmica da bacia é influenciada por fatores físicos, climáticos e ações antrópicas, como a topografia, o tipo de solo e a cobertura do terreno, sejam áreas vegetadas ou impermeáveis (TUCCI, 2001).

A presença de vegetação, por exemplo, aumenta a capacidade de infiltração, reduzindo o escoamento superficial e ajudando no controle da erosão e na manutenção da qualidade da água (VILLELA; MATTOS, 1975). Dessa forma, o equilíbrio entre a entrada de água, por meio das chuvas, e sua saída pelo exutório define a funcionalidade das bacias e sub-bacias hidrográficas, que podem ser interconectadas em sistemas fluviais mais complexos.

No Brasil, a divisão territorial macro foi organizada em 12 Regiões Hidrográficas, refletindo a diversidade dos recursos hídricos do país. No âmbito regional, o estado do Rio Grande do Norte (RN) conta com 14 bacias hidrográficas (Figura 1), cada uma com características específicas. Dentre elas, destacam-se a Bacia Apodi/Mossoró e a Bacia Piranhas/Açu (SILVA; TROLEIS, 2019).

Figura 1: Divisão das Bacias Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil.



Fonte: Silva; Troleis, 2019.

A separação entre bacias hidrográficas é definida por divisores de água, que direcionam o escoamento para diferentes sistemas fluviais e atribuem a cada bacia características únicas em termos de morfologia, área de drenagem e hierarquia pluvial (VILLELA; MATTOS, 1975). Essas particularidades influenciam diretamente a gestão dos recursos hídricos e a formulação de estratégias de planejamento no estado, promovendo o uso sustentável da água e a prevenção de problemas relacionados ao escoamento superficial (SILVA; TROLEIS, 2019). Cabe salientar que a escolha da escala de análise, variando de grandes bacias a microbacias, dependerá do problema a ser tratado (PORTO; PORTO, 2008).

3.2. Sub-bacias e Microbacias Hidrográficas

As sub-bacias hidrográficas são muitas vezes delimitadas através de sua extensão (CECÍLIO; REIS, 2006), sendo definida como uma área drenada por um curso d'água principal, com dimensões que variam entre 100 km² e 700 km². Já as microbacias são áreas menores dentro da sub-bacia, possuindo menos de 100 km² de extensão (FAUSTINO, 1996). Estas são especialmente sensíveis a chuvas intensas de curta duração e às alterações no uso do solo, como a cobertura vegetal. Assim, mudanças na quantidade e qualidade da água escoada são mais perceptíveis nas microbacias do que nas bacias maiores (LIMA; ZAKIA, 2000).

A delimitação de microbacias é fundamental para o planejamento da drenagem urbana, pois permite identificar problemas locais, como inundações e erosão, o que possibilita priorizar intervenções e alocar recursos de forma mais eficaz (MENDES; SANTOS, 2022; TUCCI, 2008). Além disso, esse processo facilita o planejamento de infraestrutura de drenagem, como galerias e bueiros, adaptando essas soluções às características específicas de cada área (CHRISTOFIDIS et al., 2019).

A morfometria das microbacias, que analisa suas formas e dimensões, é crucial para entender o escoamento hídrico e a resposta a eventos de precipitação. Características morfométricas, como o formato, a inclinação e a densidade de drenagem, influenciam a eficiência do escoamento e a suscetibilidade a erosões e inundações (LACERDA et al., 2019), contribuindo para um planejamento mais eficaz e sustentável na gestão dos recursos hídricos (NOBRE et al., 2019).

3.3. Morfometria de Bacias Hidrográficas

A caracterização física de bacias hidrográficas é fundamental para prever seu comportamento hidrológico, desempenhando um papel crucial no manejo dos recursos hídricos e no planejamento ambiental. A morfometria, utilizando métodos matemáticos, quantifica as formas e configurações da superfície da bacia por meio de índices divididos em três categorias principais: geométricos, da rede de drenagem e do relevo (CAMPANHARO, 2010).

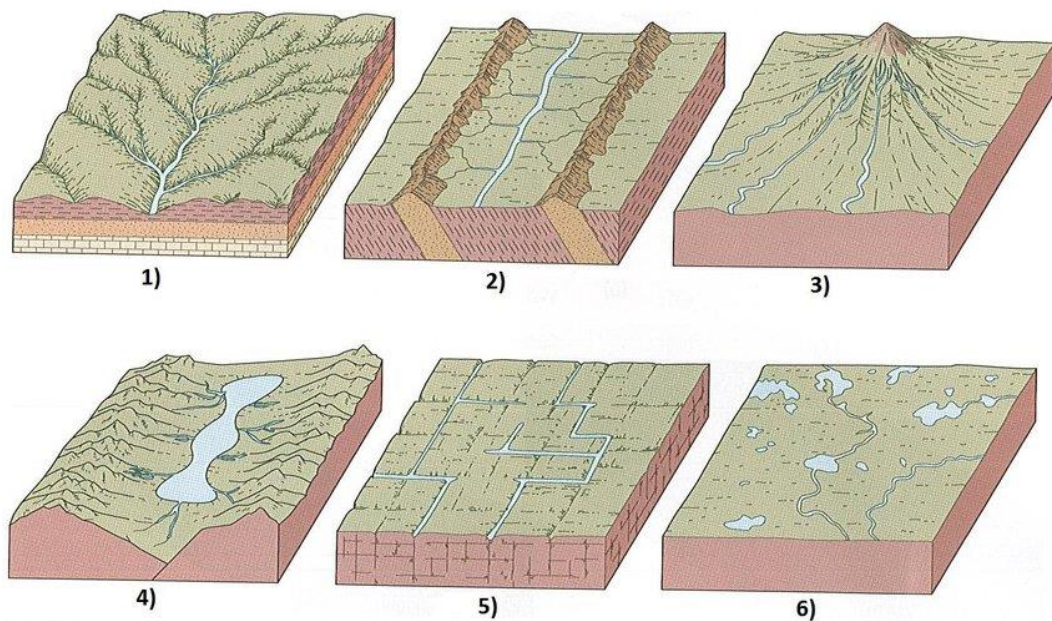
No âmbito geométrico, parâmetros como área, perímetro, comprimento e fator de compactidade são essenciais para descrever a geometria da bacia. O tempo de concentração (T_c), definido como o período que a água precipitada leva para alcançar o ponto de exutório (SANTOS; FERREIRA, 2003), e o fator de forma, que relaciona a largura ao comprimento da bacia (VILLELA; MATTOS, 1975), são métricas indispensáveis para o planejamento e a gestão hidrológica. Esses indicadores são especialmente importantes na avaliação do risco de enchentes, principalmente em microbacias, que são mais compactas e apresentam respostas mais rápidas a eventos de precipitação, resultando em picos de cheia mais acentuados (VILLELA; MATTOS, 1975).

Além da geometria da bacia, a dinâmica do escoamento hídrico também é influenciada pela configuração da rede de drenagem, que é caracterizada por elementos como densidade de drenagem, ordem dos rios e padrão de drenagem. A densidade de drenagem, conforme Horton (1945), expressa a razão entre o comprimento total dos canais e a área da bacia, influenciando o escoamento superficial e o risco de erosão.

Uma densidade de drenagem elevada sugere que a bacia possui uma rede de canais mais complexa e extensa, o que pode resultar em um escoamento mais rápido e eficiente da água pluvial. Isso, por sua vez, pode aumentar o risco de inundações, especialmente em áreas urbanizadas, onde o escoamento superficial é frequentemente acelerado (TUCCI, 2007).

Por outro lado, uma densidade de drenagem mais baixa pode indicar uma bacia com uma rede de drenagem menos desenvolvida, o que geralmente está associado a um escoamento mais lento e uma maior capacidade de absorção de água pelo solo. Complementando o impacto da densidade de drenagem, outros aspectos da rede hidrográfica, como a hierarquia dos cursos d'água e o padrão de drenagem, também são fundamentais para a dinâmica do escoamento. A hierarquia dos cursos d'água é definida pelas ordens dos rios, conforme Strahler (1957), enquanto o padrão de drenagem (Figura 2), que pode ser dendrítico, treliçado, radial, centrípeto, retangular ou desorganizado, fornece informações cruciais sobre a geologia e a topografia da bacia (GABLER et al., 2007). Esses fatores interagem para moldar como a água escoou pela bacia, influenciando tanto a velocidade quanto a distribuição do escoamento superficial.

Figura 2: Padrões de drenagem de bacias hidrográficas: 1) dendrítico; 2) treliçado; 3) radial; 4) centrípeto; 5) retangular e 6) desorganizado.



Fonte: Gabler et al. (2007).

Quanto ao relevo, a declividade média e amplitude altimétrica são fundamentais para compreender os processos hidrológicos. A declividade média, conforme Horton (1945), afeta

diretamente o escoamento e os processos erosivos, sendo que bacias mais íngremes escoam água mais rapidamente, aumentando o risco de erosão. Já amplitude altimétrica, é marcada pela variação entre a altitude máxima e altitude mínima na bacia (TEODORO et al., 2007). Esse comportamento do relevo, em interação com outros fatores morfométricos, é crucial para a análise do escoamento na bacia.

A análise morfométrica avalia quantitativamente as interações entre a fisiografia e a dinâmica hidrológica, proporcionando uma compreensão mais detalhada da dinâmica fluvial e de suas relações com os componentes físicos e bióticos da bacia (FARIA et al., 2009). Índices morfométricos são ferramentas cruciais para prevenir eventos hidrometeorológicos, como enchentes e secas, e para identificar áreas propensas à erosão, sendo essenciais no planejamento e gestão territorial, tanto em áreas urbanas quanto rurais (LINDNER et al., 2007).

Portanto, a caracterização morfométrica de uma bacia é o ponto de partida para estudos sobre sua dinâmica ambiental, facilitando o manejo sustentável de seus recursos naturais. Villela e Mattos (1975) enfatizam que as características físicas da bacia são determinantes para entender seu comportamento hidrológico, dada a forte interdependência com o ciclo hidrológico. Essas informações permitem a estimativa de parâmetros hidrológicos em áreas com dados escassos, aprimorando o planejamento e a gestão ambiental.

3.4. Ocupação do Solo e os Impactos da Urbanização nas Bacias de Drenagem

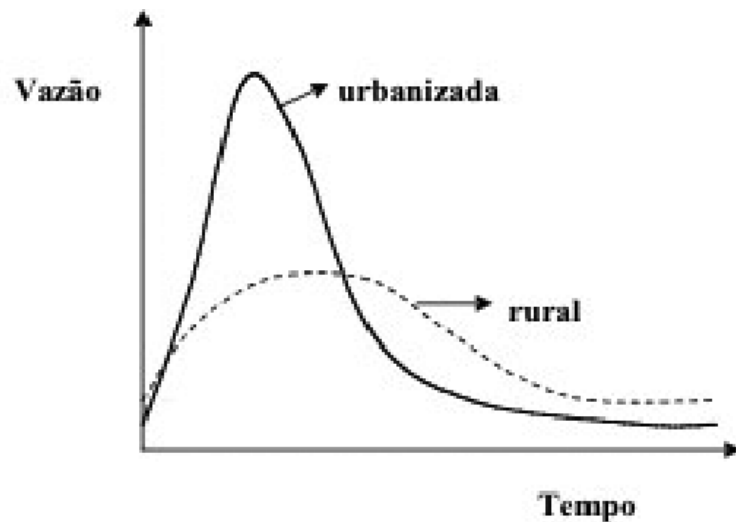
A urbanização exerce uma profunda influência sobre as bacias de drenagem, alterando significativamente sua dinâmica hidrológica e gerando uma série de impactos ambientais adversos. Entre as mudanças no ambiente, destacam-se as modificações no ciclo hidrológico e nas características naturais da drenagem, as quais podem resultar em problemas como inundações, assoreamento e erosão (TUCCI, 2002; GUERRA; MENDONÇA, 2010).

Um dos impactos mais visíveis da urbanização é o aumento da impermeabilização do solo. Com a expansão de áreas pavimentadas, como ruas, calçadas e edificações, a capacidade de infiltração de água no solo diminui drasticamente (TUCCI, 2003). Isso resulta em um maior volume de escoamento superficial, que, somado à redução da infiltração e ao escoamento concentrado em sistemas de drenagem artificial, intensifica o risco de enchentes em áreas urbanas (TUCCI, 2007).

Consequentemente, os picos de cheia ocorrem de maneira mais rápida e intensa, sobrecarregando os sistemas de drenagem e aumentando os danos a infraestruturas e comunidades. Além disso, há um aumento significativo das vazões máximas (Figura 3),

multiplicando tanto o volume quanto a frequência das cheias, em razão da maior capacidade de escoamento através de condutos e canais, e da impermeabilização das superfícies (TUCCI, 2008).

Figura 3: Comparativo entre uma bacia hidrográfica inicialmente rural e após o processo de urbanização.



Fonte: Tucci, 2008.

Além disso, a urbanização provoca mudanças no padrão de escoamento das bacias (TUCCI, 2007). A substituição da vegetação natural por superfícies impermeáveis altera o ciclo hidrológico, reduzindo a evapotranspiração e modificando a distribuição temporal do escoamento (TUCCI, 2003; BOTELHO; SILVA, 2010).

Essas mudanças contribuem para um aumento da velocidade do escoamento superficial, potencializando processos erosivos tanto no solo quanto nas margens dos corpos hídricos (BOTELHO; SILVA, 2010). O transporte acelerado de sedimentos e poluentes também pode causar o assoreamento de rios e córregos, reduzindo sua capacidade de armazenamento e aumentando a vulnerabilidade a inundações (SANTOS et al., 2019).

A degradação da qualidade da água é outro problema recorrente em áreas urbanizadas (CARVALHO et al., 2015; MENEZES et al., 2016). A remoção da cobertura vegetal, a introdução de superfícies impermeáveis e a construção de sistemas de drenagem contribuem para o transporte de poluentes, como metais pesados, resíduos sólidos, produtos químicos e esgoto, diretamente para os corpos hídricos (BEZERRA; BATISTA; SILVA, 2018). Sem a filtragem natural que o solo e a vegetação proporcionam, a concentração de poluentes aumenta,

afetando não apenas a biodiversidade aquática, mas também a saúde humana e a disponibilidade de água potável (SANTOS et al., 2019).

Dessa forma, os impactos da urbanização nas bacias de drenagem são significativos, exigindo medidas de planejamento urbano e gestão integrada dos recursos hídricos para minimizar seus efeitos. A adoção de estratégias de desenvolvimento sustentável, como a implementação de infraestruturas verdes e técnicas de drenagem urbana, podem mitigar os impactos negativos e promover uma melhor convivência entre o ambiente construído e os sistemas naturais.

3.5. Ferramentas de Geoprocessamento

As técnicas de drenagem aplicadas a bacias hidrográficas têm evoluído significativamente com o uso de ferramentas de geoprocessamento, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Essas tecnologias possibilitam análises mais detalhadas da dinâmica hidrológica e da ocupação do solo, fornecendo subsídios essenciais para o planejamento urbano e a gestão dos recursos hídricos (VEIGA et al., 2020; BARBOSA et al., 2022).

Uma das principais aplicações do SIG é a utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE), que representam a superfície do terreno em alta resolução, permitindo a visualização e análise das características do relevo, como a declividade e a direção do escoamento superficial. Com o auxílio de MDEs, é possível identificar automaticamente as áreas de drenagem e delimitar as bacias hidrográficas com precisão. Além disso, quando aplica-se o MDE, é possível realizar a subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2022). Essas informações são fundamentais para a modelagem hidrológica e para o dimensionamento de sistemas de drenagem, especialmente em áreas urbanizadas onde as características topográficas são alteradas pela ocupação do solo (TUCCI, 2007).

Uma ferramenta amplamente utilizada no processamento de MDEs e na análise de bacias hidrográficas é o QGIS, um software livre e de código aberto, que oferece diversos *plugins* para modelagem hidrológica e análise espacial, permitindo a extração automática da rede de drenagem, calcular áreas de contribuição e realizar a análise da capacidade de infiltração e escoamento (COSTA; SOUZA; SILVA, 2016).

O ALOS PALSAR, um satélite japonês lançado em 2006, complementa essas análises ao fornecer dados de radar de abertura sintética (SAR) de alta resolução, permitindo monitorar

a umidade do solo e a estrutura da cobertura terrestre, mesmo em condições de baixa visibilidade.

Além de delimitar as bacias, o SIG também é essencial para analisar a ocupação do solo e os seus impactos nas dinâmicas hídricas (CAMINHA; SILVA, 2023). A integração de imagens de satélite, como as do ALOS PALSAR (MENDES, 2022), e dados de ocupação do solo permite identificar áreas impermeabilizadas, como pavimentações e edificações, e quantificar sua extensão (CAMINHA; SILVA, 2023). A partir dessas análises, é possível estimar o aumento no escoamento superficial, avaliar os riscos de enchentes e desenvolver estratégias de mitigação, como a implementação de infraestruturas verdes e a recuperação de áreas degradadas (FRITZEN; BINDA, 2011).

Dessa forma, o uso de ferramentas de geoprocessamento, como os MDEs, o QGIS e as imagens do ALOS PALSAR, proporciona uma visão integrada da dinâmica das bacias hidrográficas e de sua relação com o uso e ocupação do solo. Essas ferramentas são essenciais para a gestão sustentável das bacias e para o desenvolvimento de soluções baseadas em infraestrutura e drenagem urbana, minimizando os impactos negativos da urbanização e promovendo uma convivência mais equilibrada com o ambiente natural.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

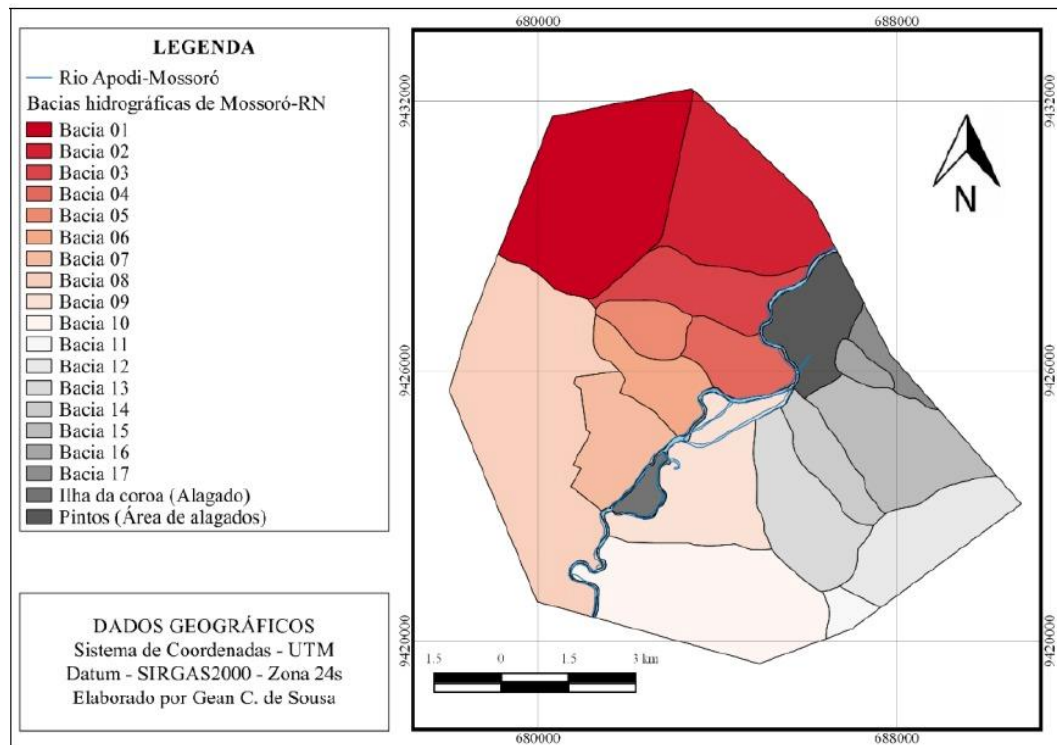
A área de estudo do presente trabalho está inserida em uma sub-bacia hidrográfica urbana localizada no município de Mossoró, no estado brasileiro do Rio Grande do Norte (RN), que faz parte da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró.

Esta bacia está situada na mesorregião do Oeste Potiguar, abrangendo uma área total de aproximadamente 14.276 km², o que corresponde a 26,8% do território do estado (Figura 4). A bacia hidrográfica Apodi-Mossoró é a maior bacia genuinamente potiguar, onde estão cadastrados 618 açudes, totalizando um volume de armazenamento de 469.714.600 km³, o que equivale a 27,4% dos açudes e 10,7% dos volumes de água acumulados no Estado, conforme dados da Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH, 2020).

Possuindo grande relevância socioeconômica, é a segunda maior bacia do estado, com uma área drenada de aproximadamente 15.500 km². Suas atividades econômicas predominantes incluem a extração de petróleo, a produção de sal marinho, a agricultura e fruticultura irrigada, a pecuária extensiva e a mineração de calcário, o que reflete sua importância no desenvolvimento regional. Esses setores têm impacto direto sobre os recursos hídricos e a gestão ambiental, exigindo um monitoramento constante, principalmente em áreas urbanizadas onde o crescimento populacional e a expansão das atividades econômicas aumentam a pressão sobre a bacia (CARVALHO et al., 2011).

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é semiárido, do tipo BSw^h, caracterizado por chuvas escassas e irregulares. A precipitação média anual é de 695,8 mm, e as temperaturas médias anuais giram em torno de 27,4°C, com mínimas de 21°C e máximas de 36°C. A umidade relativa do ar segue um comportamento sazonal semelhante à precipitação, variando ao longo do ano e influenciando o regime hídrico da região, principalmente em períodos de seca prolongada (ROCHA, 2015).

Figura 5: Bacias hidrográficas urbanas do município de Mossoró-RN, Brasil.



Fonte: Sousa (2017).

4.2. Coleta de dados

Neste trabalho, foram utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDE) como base principal para a delimitação da microbacia hidrográfica em estudo. Os dados foram obtidos gratuitamente através da plataforma *Alaska Satellite Facility* (ASF). Especificamente, foi utilizado o MDE gerado pelo sensor *ALOS PALSAR* (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), conhecido por fornecer imagens de radar de alta resolução, com uma precisão espacial de 12,5 metros.

A escolha do ALOS PALSAR se deu devido à sua capacidade de gerar dados topográficos de alta qualidade, mesmo em áreas com cobertura de vegetação densa ou em condições meteorológicas adversas, como a presença de nuvens, uma vez que o radar de abertura sintética opera independentemente das condições de luz e clima. Esse fator foi fundamental para a região estudada, onde a interferência de nuvens poderia comprometer a qualidade das imagens ópticas.

Dentre as diversas imagens disponíveis para a área de interesse, foi selecionada aquela que apresentava a melhor qualidade para a análise morfométrica. A cena escolhida foi a “AP_27189_FBS_F7080_RTI”, capturada no dia 3 de março de 2011. A escolha dessa imagem

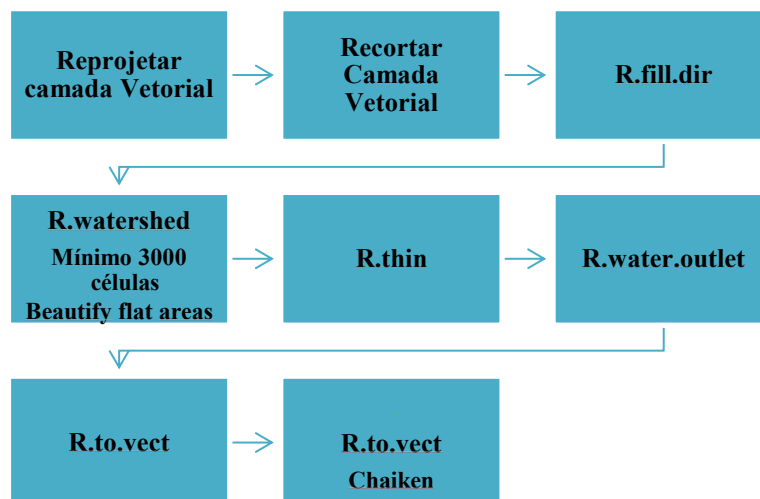
considerou integridade dos dados topográficos em relação à época de coleta, garantindo uma representação fiel das características do relevo da microbacia naquele período.

Como a imagem do ALOS PALSAR cobre uma área geográfica extensa em comparação com a área de estudo específica da microbacia, foi necessário realizar um recorte da cena original para otimizar o processamento dos dados e focar apenas na região de interesse. Para isso, utilizou-se uma máscara vetorial no formato *shapefile* (.shp), que permitiu delimitar com precisão a área a ser analisada.

O *shapefile* utilizado foi obtido através do banco de dados geográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), contendo a delimitação administrativa dos municípios do estado do Rio Grande do Norte. Este arquivo vetorial foi escolhido devido à sua confiabilidade e ampla utilização em análises geoespaciais no Brasil, garantindo uma correspondência precisa com a área de estudo (IBGE, 2024).

Para o processamento das imagens e a delimitação da microbacia, foi utilizado o software de geoprocessamento livre e gratuito QGIS, versão 3.34 (QGIS, 2023), que pode ser baixado gratuitamente no site oficial. O QGIS foi escolhido por disponibilizar ferramentas adequadas para análises geoespaciais, incluindo a manipulação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e a realização de cálculos morfométricos. Durante o processamento, foi definida a projeção cartográfica do banco de dados e projeto utilizando o sistema de coordenadas plantas, com código EPSG:32724, correspondente ao Datum WGS 84, projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 24 Sul. A delimitação da microbacia de interesse na pesquisa seguiu um passo a passo resumido na imagem abaixo e detalhado no subitem 4.2.1.

Figura 6: Fluxograma das etapas e comandos executados para delimitação da microbacia de estudo.

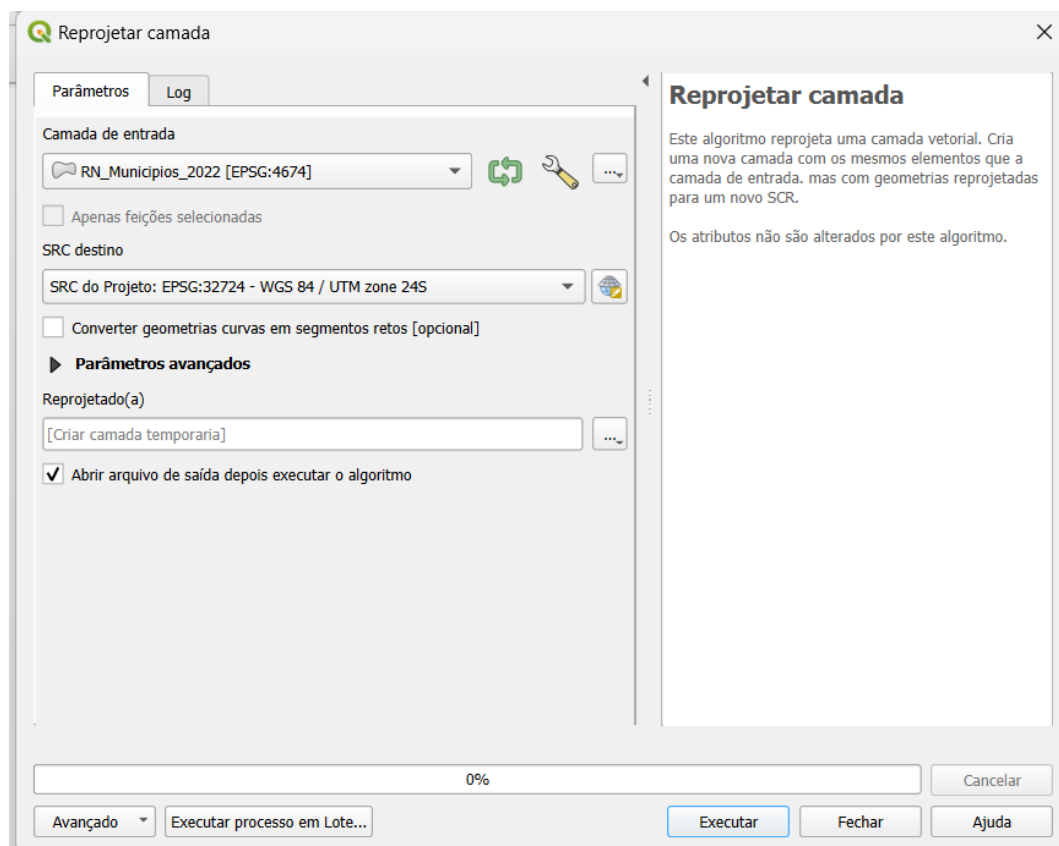


Fonte: Autoria própria, 2024.

4.2.1. Delimitação da Microbacia a partir de um MDE

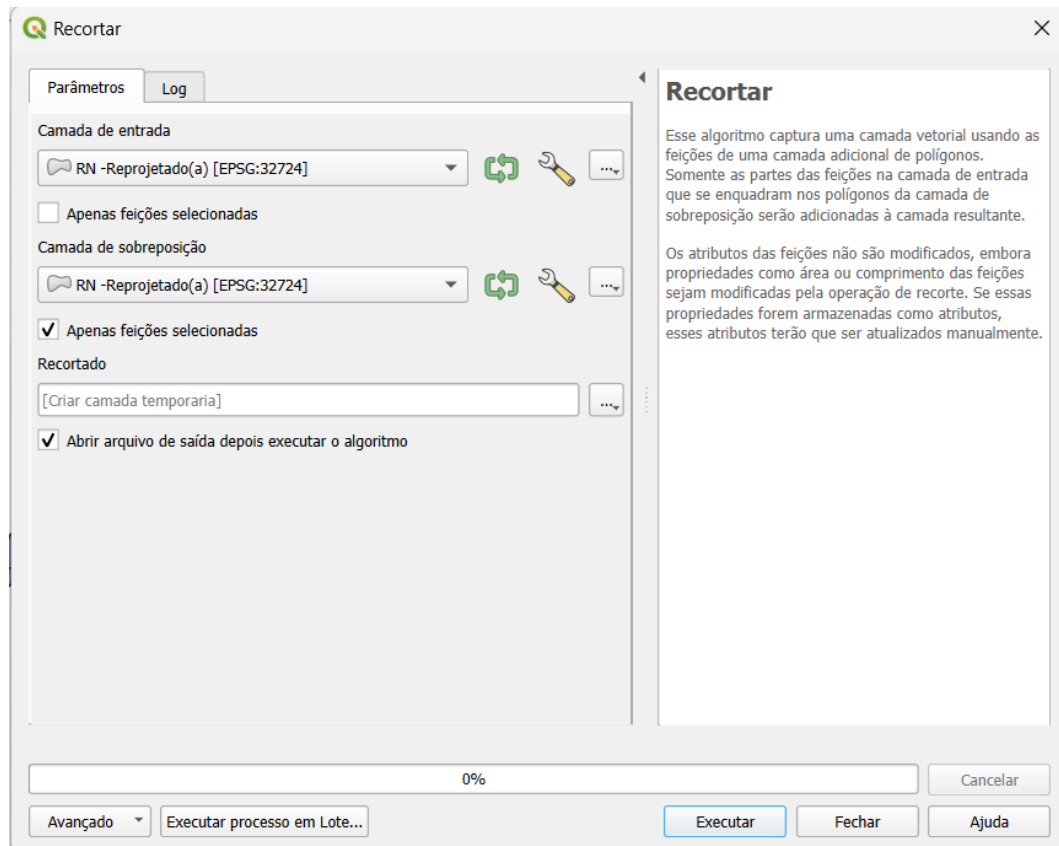
Para realizar a delimitação da microbacia de interesse na pesquisa, o primeiro passo após adicionar a camada vetorial com os limites dos municípios do estado do Rio Grande do Norte e a cena “*AP_27189_FBS_F7080_RT1*”, foi reprojetar a camada vetorial para que assim ficasse no mesmo tipo de projeção da camada raster (Figura 6). Logo após, foi identificado qual a área correspondente ao município de Mossoró. A partir da ferramenta de recortar raster (Figura 7), realizou-se o recorte para manter apenas a área de Mossoró, nomeando essa camada como “*MDE – AP 27189 – Recortado*”, facilitando a identificação e otimizando os processamentos posteriores. .

Figura 7: Vista da tela de execução para reprojetar camada vetorial.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 8: Vista da tela de execução para recortar a camada vetorial para a área de Mossoró-RN.

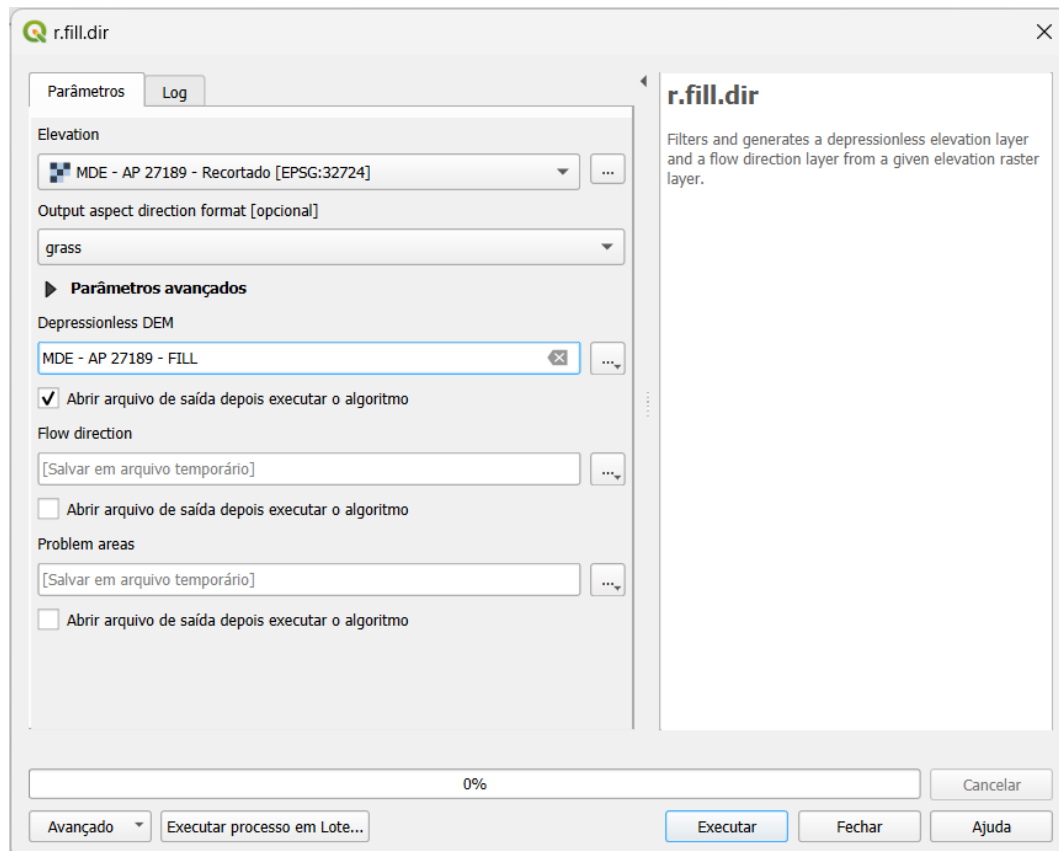


Fonte: Autoria própria, 2024.

A etapa seguinte consistiu no uso do Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) licenciado sob a GPL (software livre), amplamente utilizado para processamento de dados raster e vetoriais, além de oferecer ferramentas de processamento de imagens digitais. Esse sistema foi acessado por meio do QGIS.

Para garantir a precisão na delimitação da microbacia, empregou-se a função *r.fill.dir* (Figura 8), cujo objetivo é preencher depressões (*sinks*) presentes no MDE e calcular a direção de fluxo. São consideradas depressões, áreas de baixa elevação sem saída natural que podem interromper o escoamento superficial, comprometendo a análise hidrológica. A função *r.fill.dir* ajustou automaticamente a elevação dessas áreas, permitindo a continuidade do fluxo de água. O resultado gerado foi um raster aprimorado, essencial para a análise do comportamento hidrológico da microbacia e a definição precisa da rede de drenagem.

Figura 9: Vista da tela de execução do algoritmo *r.fill.dir* do GRASS.



Fonte: Autoria própria, 2024.

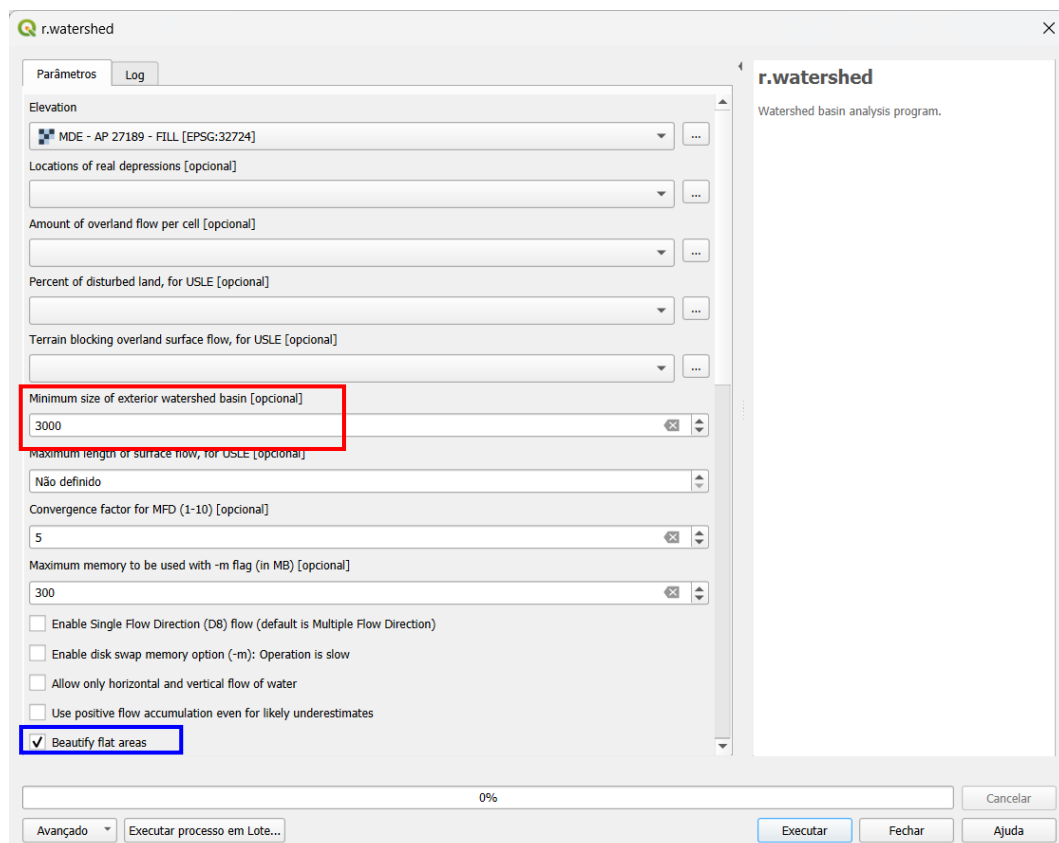
Com o novo raster gerado, foi utilizada a função *r.watershed* para calcular os segmentos de fluxo e a direção da drenagem. Nos parâmetros opcionais, foi selecionado o “*Tamanho Mínimo da Bacia Externa*” (*Minimum size for exterior basin*) (Figura 9). Esse parâmetro define o tamanho mínimo, em número de células, para que uma bacia hidrográfica seja considerada na saída dos resultados. Qualquer bacia com tamanho inferior ao valor especificado é ignorada, o que ajuda a filtrar pequenas bacias que podem representar ruído ou serem irrelevantes para a análise hidrológica.

Cada célula do raster representa uma área no terreno, dependendo da resolução do MDE. No caso em questão, a célula possui 12,5 metros, correspondendo a uma área de 156,25 m². O valor de 3.000 foi definido para o parâmetro “*Minimum size for exterior basin*” o que significa que bacias com menos de 3.000 células, ou uma área inferior a 468.750 m² (46,875 hectares), foram desconsideradas na análise. Esse valor foi obtido por meio de diversas tentativas, visando aperfeiçoar a delimitação da microbacia estudada, garantindo maior precisão no resultado.

Além disso, foi utilizado o parâmetro opcional “*Embelezar Áreas Planas (Beautify flat areas)*” (Figura 9) para ajustar o modo como o *r.watershed* processa áreas de elevação constante, onde o fluxo de água pode ser indefinido. Áreas planas frequentemente representam

um desafio em MDEs, pois, sem um gradiente de elevação claro, o caminho do escoamento superficial pode se tornar incerto. Com a opção habilitada, o *r.watershed* aplica uma técnica que ajusta essas regiões, resultando em uma rede de drenagem mais contínua e visualmente aprimorada. Isso contribui para uma representação mais realista do comportamento hidrológico, especialmente em terrenos com relevo suavemente inclinado ou predominantemente plano.

Figura 10: Vista da tela de execução do algoritmo *r.watershed*.



Fonte: Autoria própria, 2024.

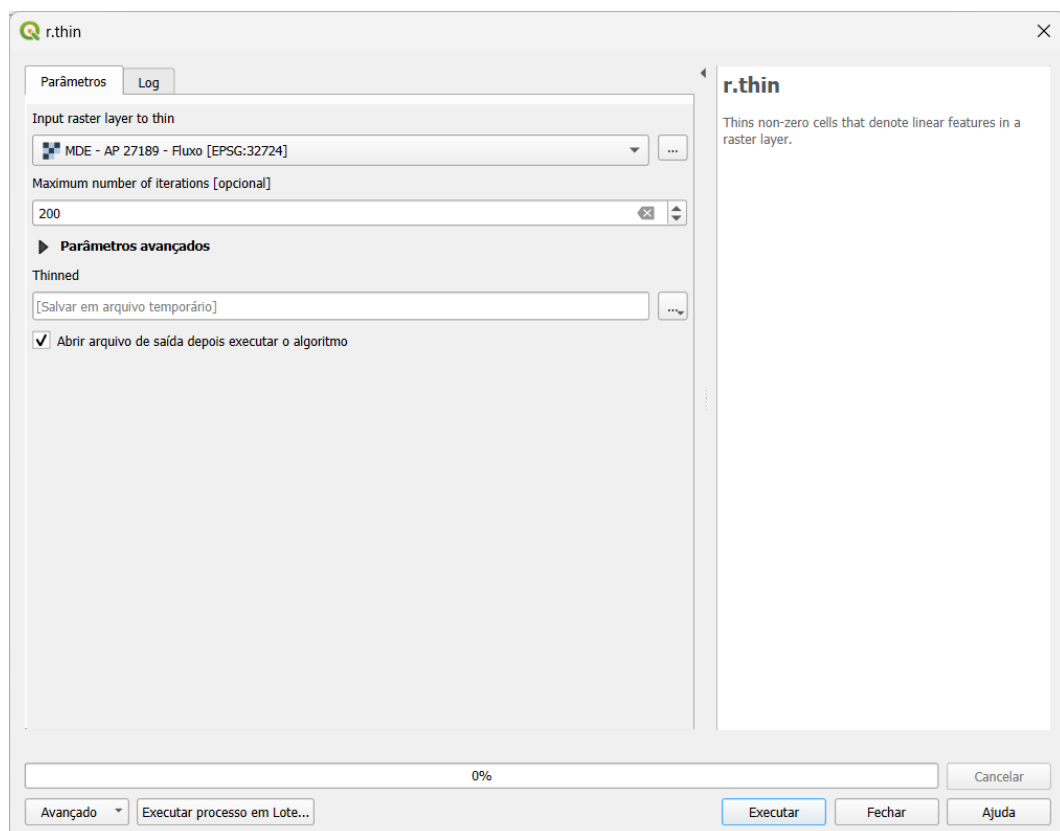
O algoritmo gerou uma camada raster que indica a direção do fluxo de água, a partir de cada célula principal, levando em consideração a declividade das células vizinhas. A determinação da direção foi feita utilizando o gradiente de elevação para identificar a rota de menor resistência, mapeando precisamente o escoamento da água ao longo da área. Dessa forma, assegurando que o fluxo siga o caminho mais adequado, em resposta às características topográficas do relevo.

Além de calcular a direção do fluxo, o algoritmo também gera os segmentos de fluxo, que indicam a quantidade de células que contribuem para o escoamento de uma célula específica. Esta informação foi essencial para a criação de uma nova camada raster de

acumulação de fluxo, que permite identificar áreas com maior concentração de água, como vales e canais de drenagem. Células que recebem uma maior quantidade de contribuições representam pontos de convergência do escoamento superficial.

O passo seguinte foi a aplicação do algoritmo *r.thin* (Figura 10), que afina as linhas de drenagem, reduzindo-as para uma espessura unitária (um pixel). Isso simplificou a visualização e a análise, mantendo a conectividade e as ramificações das linhas de fluxo. Dessa forma, a estrutura da rede de drenagem pode permanecer intacta, facilitando medições de comprimento dos segmentos de fluxo e outras análises morfométricas da bacia hidrográfica.

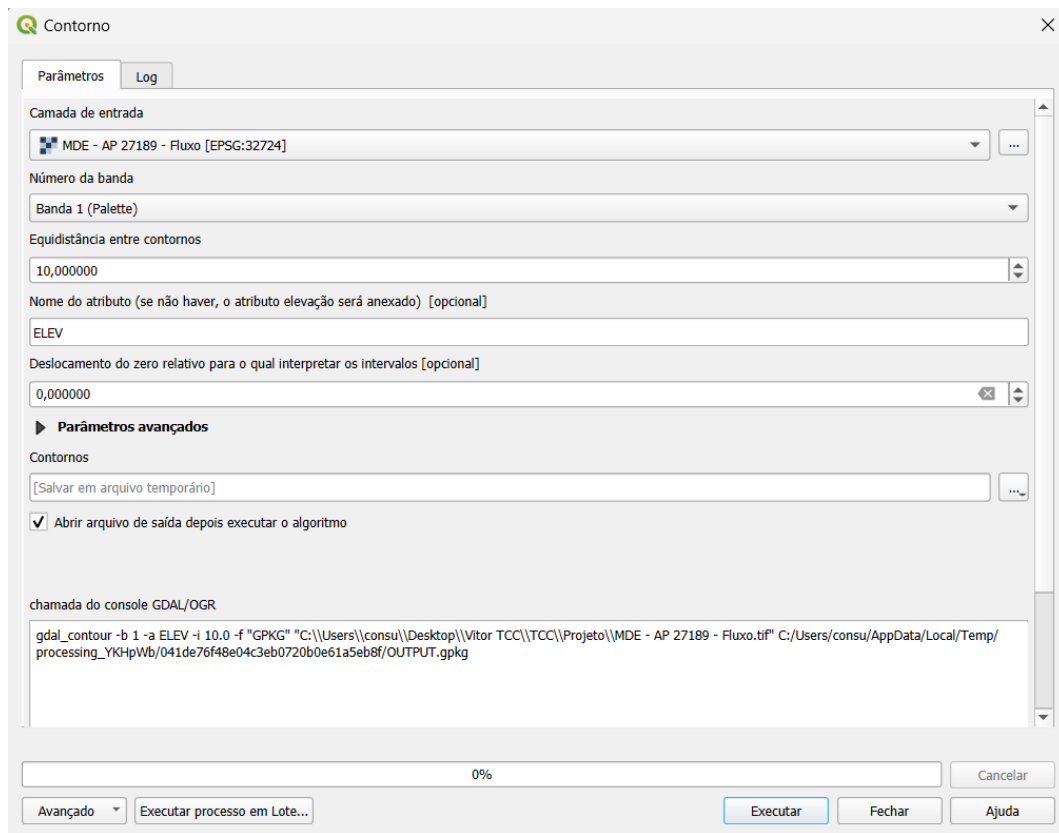
Figura 11: Vista da tela de execução do algoritmo *r.thin*.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para identificar o exutório da microbacia em questão, foi necessário determinar as curvas de nível da área de estudo. Utilizando o raster *MDE – AP 27189* recortado, extraiu-se as curvas de nível com intervalo de 1 metro (Figura 11). A escolha desse valor se deu devido à baixa variação altimétrica da região, o que permitiu uma melhor visualização da topografia local, auxiliando na identificação do ponto mais adequado para considerar como exutório.

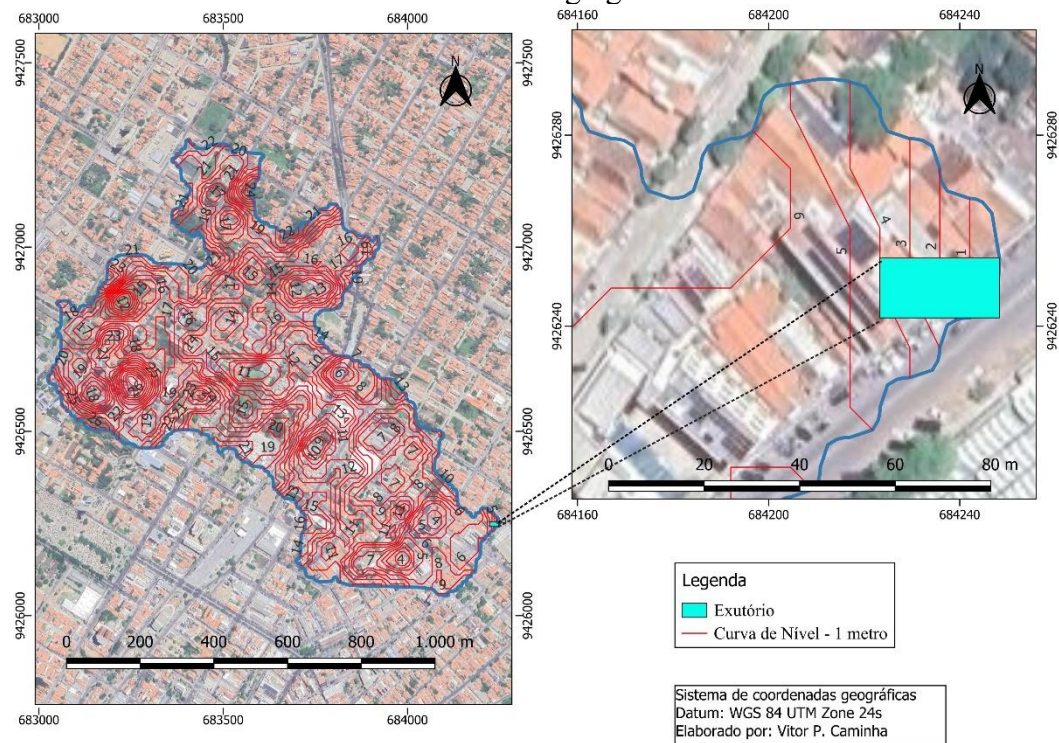
Figura 12: Vista da tela de execução do comando Contorno para extração das curvas de nível da área de estudo.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Com base nos segmentos de fluxo e nas curvas de nível geradas, foi possível identificar com precisão a cota mais baixa da área de estudo, o que permitiu determinar o ponto de exutório da microbacia, o qual pode ser identificado pelo destaque na cor azul da Figura 12. O exutório, sendo o ponto de saída natural das águas da bacia, é crucial para a delimitação da área drenada.

Figura 13: Ponto de exutório da microbacia hidrográfica do estudo.



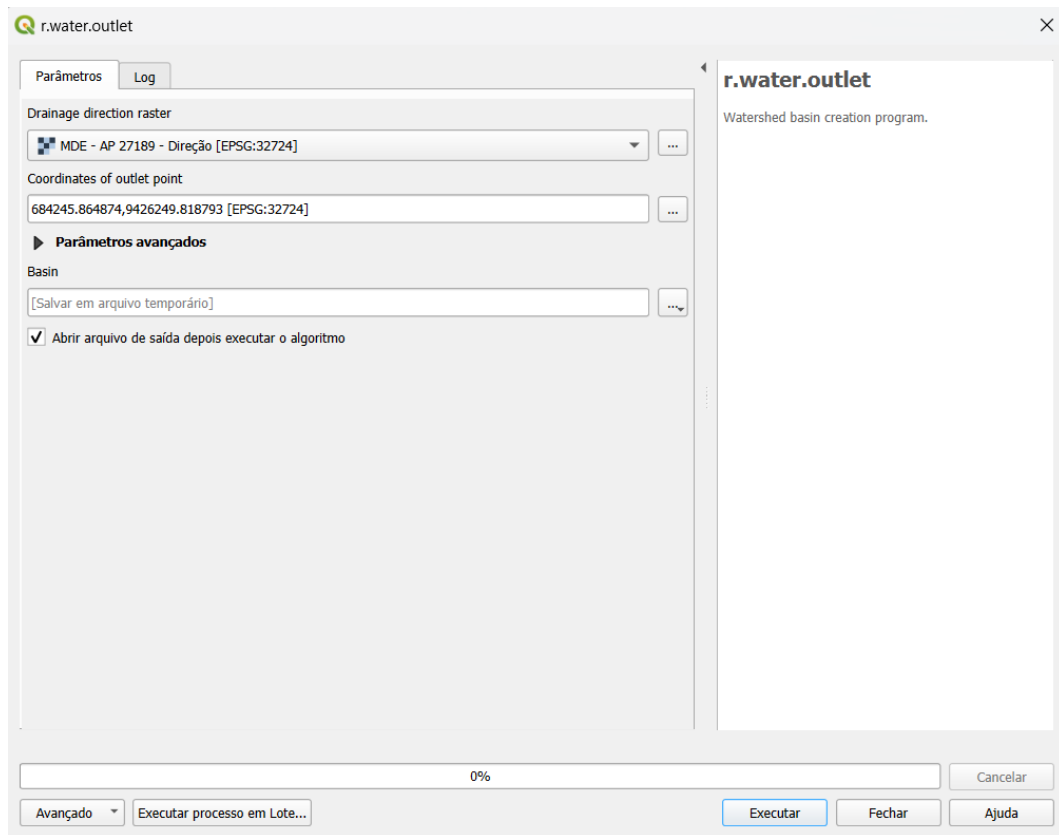
Fonte: Autoria própria, 2024.

A definição do ponto de exutório, realizada a partir do MDE e com o uso das técnicas previamente mencionadas, demonstrou-se condizente com a realidade observada *in loco*. Tal correspondência ratifica a acurácia dos métodos aplicados, evidenciando a confiabilidade das análises geoespaciais conduzidas para caracterização da microbacia.

Após a identificação da menor cota, foi realizada a delimitação da microbacia utilizando o algoritmo *r.water.outlet* (Figura 13).

Esse processo começou com a seleção do arquivo raster de direção de fluxo, previamente gerado pelo algoritmo *r.watershed*, para calcular a direção preferencial do escoamento das águas na superfície. Em seguida, foi determinado o ponto de exutório da microbacia, localizado nas coordenadas geográficas 5°11'19.15" de latitude Sul e 37°20'15.84" de longitude Oeste. Com base nesse ponto, o *r.water.outlet* delimitou automaticamente a área da microbacia a montante, ou seja, toda a região cuja água esco naturalmente para o exutório.

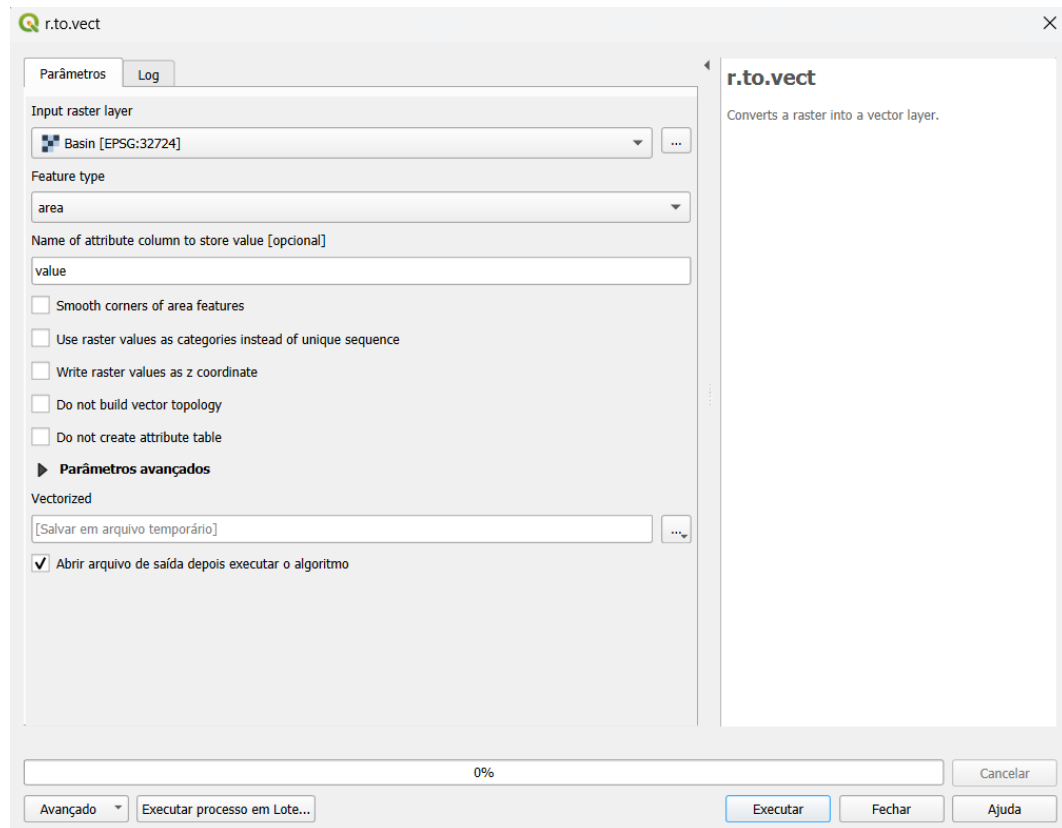
Figura 14: Vista da tela de execução do algoritmo *r.water.outlet* para delimitação da microbacia em estudo.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir da delimitação da microbacia, realizou-se a conversão do arquivo de raster para vetorial. A conversão se deu pois, enquanto as imagens raster, compostas por pixels, têm resolução fixa, os dados vetoriais utilizam pontos, linhas e polígonos. Portanto, proporcionando maior precisão e escalabilidade na representação de formas e limites geográficos. Isso permite que os vetores sejam ampliados ou reduzidos sem perda de qualidade ou detalhes. Além disso, os arquivos vetoriais são mais leves e possibilitam análises espaciais mais rápidas e eficientes, como cálculos de áreas, perímetros e intersecções entre camadas. Para essa conversão, foi utilizado o algoritmo *r.to.vect* (Figura 14).

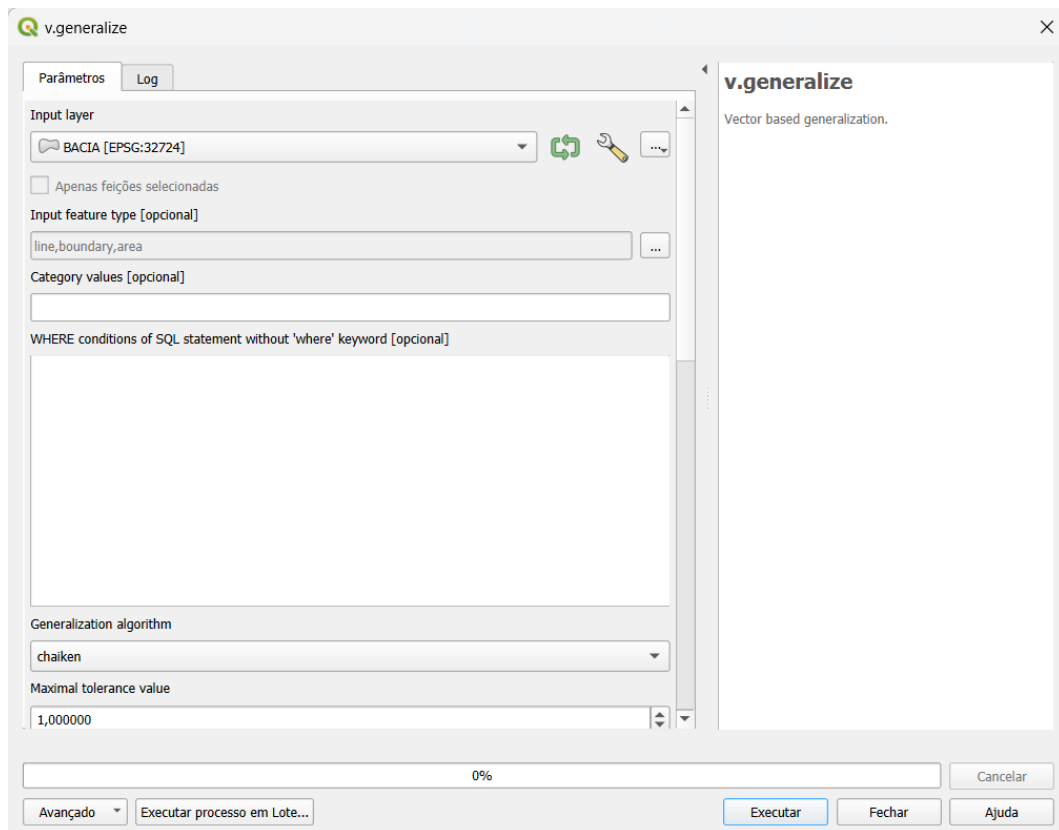
Figura 15: Vista da tela de execução do algoritmo *r.to.vect* para conversão do arquivo de raster para vetorial.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Após a conversão da delimitação da microbacia para um arquivo vetorial, foi aplicado o algoritmo *v.generalize* no QGIS, utilizando o método de generalização "*Chaiken*" (Figura 15). Esse algoritmo foi selecionado devido à sua capacidade de suavizar as bordas e reduzir a complexidade dos polígonos, proporcionando uma representação mais fluida e visualmente coerente da microbacia. A suavização realizada pelo método *Chaiken* ajusta as linhas do contorno, tornando-as mais suaves sem comprometer a precisão geográfica dos dados.

Figura 16: Vista da tela de execução do algoritmo *r.generalize*.



Fonte: Autoria própria, 2024.

4.2.2. Parâmetros Morfométricos da Microbacia

Com a microbacia delimitada, foi possível calcular todos seus parâmetros morfométricos. Usando a calculadora de atributos, pode-se encontrar a área, perímetro da microbacia e comprimento do curso de igual. Nessa pesquisa, os parâmetros morfométricos para a delimitação da microbacia estudada foram divididos nas três categorias classificadas por Tonello (2005) como sendo: características geométricas, características do relevo e características de rede de drenagem.

4.2.2.1. Características Geométricas

O coeficiente de compacidade (K_c), proposto por Gravelius (1914), foi o primeiro parâmetro físico calculado para avaliar a forma de uma bacia hidrográfica (Equação 1). Esse índice adimensional compara a forma da bacia com a de um círculo perfeito, sendo que seu valor varia conforme o grau de irregularidade da bacia. Quanto mais irregular a forma da bacia, maior será o valor de K_c . Um coeficiente igual a 1 indica que a bacia é perfeitamente circular,

enquanto bacias mais alongadas apresentam valores de K_c significativamente maiores que 1, refletindo uma forma menos compacta (VILLELA; MATTOS, 1975).

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Onde: P = Perímetro da bacia hidrográfica; e,

A= Área da bacia hidrográfica.

Em seguida, foi calculado o fator de forma (K_f), que compara a forma da bacia hidrográfica à de um retângulo (Equação 2). Bacias com valores mais baixos de K_f são menos propensas a enchentes, quando comparadas a outras de tamanho similar, mas com um fator de forma mais elevado (VILLELA; MATTOS, 1975). Isso ocorre porque uma bacia com K_f maior tende a concentrar o escoamento mais rapidamente, aumentando o risco de inundações.

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

Onde: A= Área da bacia hidrográfica

L = máximo comprimento da bacia hidrográfica a partir do ponto de exutório.

O índice de circularidade (I_c), assim como o coeficiente de compacidade (K_c), aproxima-se de 1 à medida que a bacia adquire uma forma mais circular, e diminui conforme a bacia se torna mais alongada (ANDRADE et al., 2008). Esse índice pode ser determinado pela Equação 3, apresentada a seguir. Quanto mais próximo de 1 estiver o valor de I_c , mais circular será a bacia, enquanto valores menores indicam uma forma mais alongada e irregular.

$$I_c = 12,57 * \frac{A}{P^2} \quad (3)$$

Onde: A = Área da bacia hidrográfica

P = Perímetro da bacia hidrográfica

A razão de alongação (R_e) é um parâmetro morfométrico que quantifica o alongamento de uma bacia hidrográfica em comparação com um círculo que pode determinado pela Equação

4. Esse índice ajuda a entender se a bacia tende a concentrar ou dispersar o escoamento superficial. Valores de Re próximos a 1 indicam uma forma quase circular, associada a escoamento mais rápido e maior risco de enchentes. Já valores menores indicam uma bacia alongada, com escoamento mais disperso, reduzindo o risco de inundações súbitas (MOSCA, 2003).

$$Re = 1,128 * \left(\frac{At^{0,5}}{L} \right) \quad (4)$$

Onde: At = área total de drenagem

L = máximo comprimento da bacia hidrográfica a partir do ponto de exutório.

A área não urbanizada foi delineada manualmente, a partir da criação um shapefile, em conjunto do complemento *HCMGIS* do QGIS. Este complemento permitiu a importação de imagens da base de dados do Google, facilitando a visualização.

Após a delimitação das áreas foi utilizada a calculadora de atributos para calcular a área não urbanizada, assim o cálculo da área urbanizada foi realizado a partir da diferença entre a área não urbanizada e a área total correspondente.

4.2.2.2. Características do Relevo

As altitudes máxima e mínima ao longo do curso do rio principal foram obtidas utilizando o plugin *Profile Tool* no QGIS, que permite a geração de perfis altimétricos detalhados. Com esses valores, foi possível calcular a altitude média, proporcionando uma visão geral da elevação predominante ao longo do rio. Além disso, determinou-se a amplitude altimétrica, que é a diferença entre a altitude máxima e mínima.

A declividade do curso do rio foi obtida relacionando a diferença de altitude (amplitude altimétrica) com o comprimento total do curso d'água determinado pela Equação 5 (CHRISTOFOLETTI, 1980).

$$S = \frac{\Delta H}{C_p} \quad (5)$$

Onde: ΔH = Amplitude Altimétrica

C_p = Comprimento do curso d'água principal

A declividade do terreno foi classificada em cinco categorias distintas, com base nos percentuais de inclinação. Essas classes incluem: plano (0 a 3%), suave ondulado (3 a 8%), ondulado (8 a 20%), forte ondulado (20 a 45%) e montanhoso (45 a 75%). Esta categorização segue a classificação estabelecida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979), que fornece uma estrutura para compreender as variações de relevo e suas implicações na gestão de recursos naturais e no planejamento ambiental.

4.2.2.3. Características da Rede de Drenagem

Para determinar o comprimento do curso do rio, foi utilizado o QGIS e traçado manualmente o fluxo, com base nas curvas de nível. Esse método possibilitou a identificação do caminho natural de escoamento da água, considerando as inclinações do terreno e as variações altimétricas. Vale destacar que, em áreas urbanizadas, o escoamento superficial é majoritariamente influenciado por superfícies pavimentadas, que modificam o fluxo hídrico. Portanto, ao delinear o curso do rio, foram consideradas tanto as características topográficas quanto as intervenções urbanas que impactam o escoamento.

De acordo com Oliveira et al. (2010), a densidade de drenagem (Dd) é um indicador crucial que reflete o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem em uma bacia hidrográfica. Esse parâmetro é obtido pela relação entre o comprimento total dos canais de drenagem e a área da bacia, sendo expressa em unidades de comprimento por unidade de área. O índice foi determinado utilizando-se a Equação 6, proposta por Christofoletti (1980).

$$Dd = \frac{Lc}{At} \quad (6)$$

Onde: Lc = Comprimento total dos canais de água

At = Área total de drenagem

A densidade hidrográfica (Dh), expressa pela Equação 7, é um parâmetro que quantifica a relação entre o número de canais de drenagem e a área total de uma bacia hidrográfica. Essa medida é expressa geralmente em número de canais por unidade de área e é fundamental para avaliar a complexidade e a eficiência do sistema de drenagem de uma região. Bacias com alta densidade hidrográfica tendem a ter uma rede de canais mais densa, o que pode resultar em um escoamento mais rápido da água, aumentando o risco de inundações, especialmente em áreas urbanizadas. Por outro lado, bacias com baixa densidade hidrográfica frequentemente

apresentam uma rede de drenagem mais esparsa, o que pode facilitar a infiltração da água no solo e, portanto, reduzir a probabilidade de eventos de cheia (CHRISTOFOLETTI, 1980)..

$$Dh = \frac{N}{At} \quad (7)$$

Onde: N = Número de canais de 1ª ordem

At = Área total de drenagem

De acordo com Tucci (2007), o tempo de concentração (tc) é definido como o tempo necessário para que a precipitação que contribui no ponto mais distante da bacia percorra toda a sua extensão e chegue até o ponto de saída (SANTOS, 2003). Para calcular tempo de concentração da precipitação foi utilizado a fórmula de Califórnia Higways and Public Works (Culverts Practice) proposto por Kirpich (1940), conforme Equação 8.

$$tc = 57 * \left(\frac{Lc^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (8)$$

Onde: Lc = comprimento do curso de água principal em quilômetros

ΔH = Amplitude Altimétrica

Para determinar a intensidade de chuva foi usado a equação IDF (intensidade, duração e frequência) com os parâmetros adotados por Santos (2015), demonstrado na Equação 9.

$$i = \frac{752,889 * TR^{0,221}}{(TC + 9,778)^{0,741}} \quad (9)$$

Onde:

Para o cálculo da vazão de escoamento superficial, optou-se pelo Método Racional, uma escolha considerando as características da microbacia hidrográfica em questão, que abrange uma área relativamente pequena. Esse método é amplamente utilizado em microbacias devido à sua simplicidade e eficácia em descrever o comportamento da vazão frente a eventos de precipitação, especialmente em áreas urbanizadas. Vale salientar que, segundo Tucci (1995) o método racional é recomendado para bacias com áreas inferiores a 2 km².

O Método Racional baseia-se em uma equação que relaciona a intensidade da precipitação, a área da bacia e o coeficiente de escoamento, conforme exposto na Equação 10.

Dessa forma, ele fornece uma estimativa direta da vazão máxima que a microbacia pode gerar durante um evento chuvoso.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (10)$$

Onde: C = Coeficiente de escoamento

I = intensidade da chuva

A= Área total de drenagem

Vale salientar que, o valor do coeficiente de escoamento varia de acordo com o solo e a cobertura vegetal em cada bacia hidrográfica. Portanto, é possível encontrar tabelas adotadas por órgãos nacionais e internacionais que estabelecem valores aproximados para o coeficiente em função da ocupação do solo. Essas tabelas podem ser utilizadas como referência para a estimativa da vazão de pico em bacias com ocupações similares. Portanto, a área de contribuição da bacia foi classificada quanto ao uso e ocupação do solo de acordo com a metodologia proposta por Wilken (1978).

Tabela 1: Valores de C, segundo adaptação do critério de Fruhling, adotados pela prefeitura de São Paulo.

Zonas	C
Edificações muito densas: áreas centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70-0,95
Edificações não muito densas: área adjacente ao centro, de menor densidade de habitantes, porém com ruas e calçadas pavimentadas	0,60-0,70
Edificações com pouca superfície livre: áreas residenciais com construções cerradas e ruas pavimentadas	0,50-0,60
Edificações com muitas superfícies livres: áreas residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,25-0,50
Subúrbios com alguma edificação: áreas de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção	0,10-0,25
Matas, parques e campo de esportes: áreas rurais, verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados e campos de esporte sem pavimentação	0,05-0,20

Fonte: Adaptado de Wilken, 1978.

Cabe informar que, na determinação das áreas urbanizadas e não urbanizadas, foi adotado o valor de 0,75 para o coeficiente de escoamento superficial.

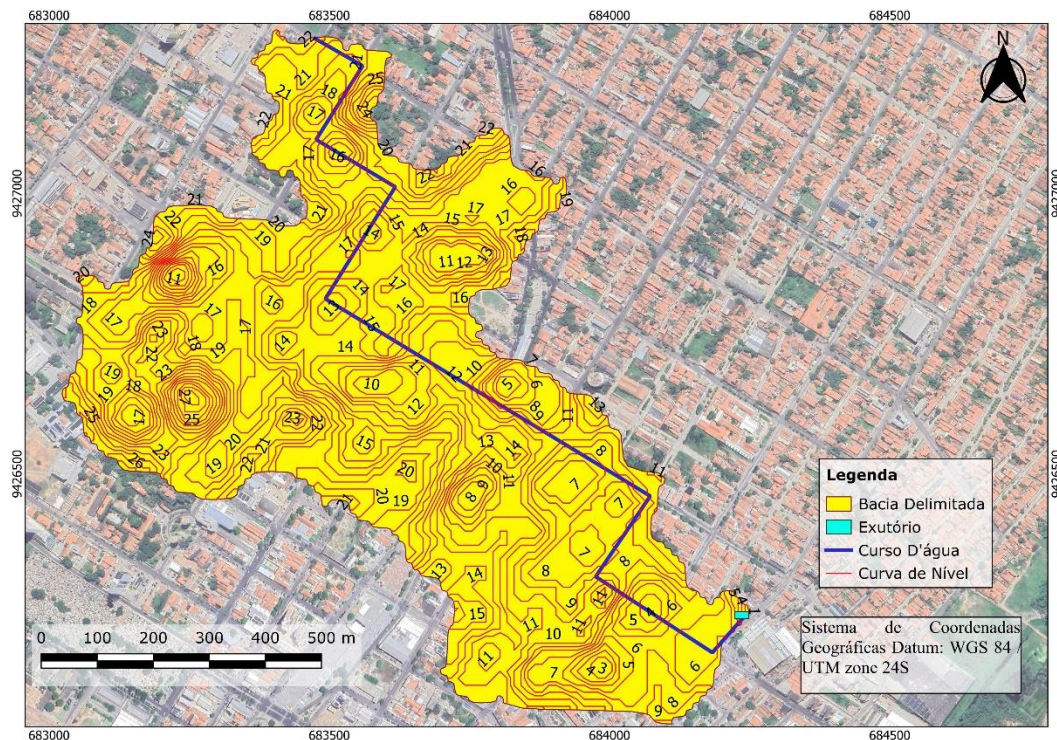
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Delimitação da microbacia hidrográfica urbana em estudo no município de Mossoró-RN

A com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), foi possível realizar a delimitação da microbacia urbana de interesse (Figura 16), localizada na cidade de Mossoró-RN. Na Figura 16 a seguir é possível visualizar claramente os elementos relevantes para a análise hidrológica, sendo eles:

1. **Área delimitada:** Representada em rosa, evidenciando a extensão e os limites da microbacia;
2. **Curvas de nível:** Exibidas em linhas vermelhas, com variação altimétrica de 1 metro, fornecendo a indicação do relevo e da inclinação do terreno;
3. **Curso d'água:** Representado por uma linha azul, marcando o trajeto preferencial do escoamento superficial;
4. **Ponto de exutório:** Local identificado onde ocorre a concentração e saída do fluxo de água da microbacia.

Figura 17: Mapa da microbacia hidrográfica urbana delimitada, localizada em Mossoró-RN.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A área em questão está localizada na rua Marechal Deodoro, no bairro Bom Jardim, próxima à Central de Abastecimento “Prefeito Raimundo Soares” (Cobal). Este ponto recebe uma considerável parcela do escoamento superficial da região, resultando em alagamentos frequentes, situação já registrada historicamente.

Para mitigar os impactos, foi implementado um sistema de drenagem, composto por uma canaleta direcionando o fluxo para o outro lado da via e conduzindo-o a um bueiro (Figura 18). Embora essa intervenção tenha reduzido os efeitos de enchentes menores, em eventos de precipitação mais intensa, o sistema torna-se insuficiente, resultando em inundações. Assim, destaca-se a necessidade de um planejamento urbano mais efetivo e de uma gestão de águas pluviais voltada a essa área, visando prevenir novos alagamentos e garantir maior resiliência frente a eventos extremos.

Figura 18 – Sistema de drenagem no ponto de exutório.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Ademais, a análise das curvas de nível indica a presença de zonas de concentração de água em trechos depressivos, onde a água se acumula por falta de uma conexão direta com o curso d'água principal, dificultando o escoamento até o exutório. Essas áreas atuam como zonas de retenção natural, intensificando o risco de alagamentos localizados, principalmente em

períodos de chuvas intensas, quando a capacidade de infiltração do solo urbanizado é insuficiente para conter o volume precipitado.

5.2. Morfometria da microbacia hidrográfica urbana em estudo no município de Mossoró-RN

5.2.1. Características Geométricas

A microbacia hidrográfica analisada possui uma área total de drenagem de 671.210 m² (ou 67,12 ha) e um perímetro de 5.339 m. Esses dados refletem a extensão da bacia e sua capacidade de captar e escoar as águas superficiais.

Conforme detalhado na Tabela 2, as áreas urbanizadas correspondem a 93,93% da totalidade da microbacia, evidenciando um cenário de alta impermeabilização do solo. Essa elevada porcentagem de urbanização, aliada à escassa representação de áreas não-urbanizadas, sugere uma redução significativa na capacidade de infiltração do solo. Como consequência, observou-se uma tendência ao aumento do escoamento superficial, o que pode elevar o risco de alagamentos em decorrência de eventos de chuvas intensas.

Tabela 2: Caracterização geométrica da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.

Parâmetro Morfométrico	Total
Area total de Drenagem (m ²)	671.210
Area Urbanizada (m ²)	630.467
Area não-urbanizada (m ²)	40.743
Perimetro total (m)	5.339
Coefficiente de Compacidade	1,82
Fator de Forma	0,20
Indice de circularidade	0,30
Razão de alongação	0,51

Fonte: Autoria própria, 2024.

O coeficiente de compacidade de 1,82 indica que a microbacia tem uma forma menos compacta do que um círculo ideal (que teria valor 1). Quanto mais compacta a bacia, mais rapidamente a água converge para os pontos de escoamento.

Tabela 3 - Interpretação do coeficiente de compacidade (Kc) da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.

Valor de Kc	Interpretação
1,00 a 1,25	Bacia com alta propensão a grandes enchentes
1,25 a 1,50	Bacia com tendência mediana a grandes enchentes
> 1,50	Bacia não sujeita a grandes enchentes

Fonte: OLIVEIRA *et al.*, (2012); adaptado por BACK (2014).

O fator de forma calculado foi de 0,20, e sua função é indicar a proporção entre a área da bacia e o quadrado do comprimento do curso d'água principal. Valores próximos de 1 indicam uma bacia mais circular, enquanto valores menores sugerem uma forma alongada (Tabela 4). No caso desta microbacia, o valor mensurado demonstra que ela é estreita e alongada, o que significa que o escoamento será lento e gradual. Segundo Villela e Mattos (1975) esse tipo de forma tende a retardar a chegada das águas aos pontos de saída, o que pode reduzir picos de vazão imediatos, embora também possa prolongar o período de escoamento.

Tabela 4 - Interpretação do fator de forma ou coeficiente de forma da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.

Valor de Kf	Interpretação
1,00 a 0,75	Bacia Sujeita a enchentes
0,75 a 0,50	Bacia com tendência mediana a enchentes
< 0,50	Bacia não sujeita a enchentes

Fonte: Back (2014).

Quanto ao índice de circularidade, que foi calculado em 0,30, esse valor confirma que a microbacia apresenta uma forma irregular e alongada, distante da configuração circular ideal, que propiciaria um escoamento mais rápido e eficiente. Assim, esse índice sugere que a água levará mais tempo para alcançar as saídas naturais ou artificiais da bacia, o que pode representar uma vantagem ao mitigar picos de cheia instantâneos.

Com relação a razão de alongação, este parâmetro compara o diâmetro equivalente de um círculo com a mesma área da bacia ao comprimento máximo do seu curso d'água principal. Assim, valores próximos a 1 indicam uma bacia mais circular, favorecendo os processos de inundação (SCHUMM, 1956), enquanto valores inferiores sugerem um maior alongamento. Considerando que a microbacia delimitada apresenta um valor de 0,51, e que valores superiores a este indicam uma tendência a uma forma mais circular, conclui-se que a microbacia em questão pode ser classificada como alongada (BACK, 2014).

5.2.2. Características do relevo

Os valores obtidos referentes às altitudes máximas e mínimas da bacia resultam em uma amplitude altimétrica de 21 metros (Tabela 5), o que indica um relevo relativamente plano, sem grandes variações de elevação. Essa característica é corroborada pela altitude média calculada.

Segundo Elesbon et al. (2011), a velocidade de escoamento dos cursos d'água está diretamente relacionada à declividade dos canais fluviais: quanto maior a declividade, maior a

velocidade do escoamento, o que gera hidrogramas de enchente mais estreitos e pronunciados, com variações significativas nas vazões instantâneas.

A declividade da microbacia em questão é de apenas 0,01 m/m (ou 1%), caracterizando um terreno plano, de acordo com a classificação da Embrapa (1979), que considera terrenos com declividades inferiores a 3% como planos.

Tabela 5 - Características do Relevo da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.

Parâmetro Morfométrico	Total
Altitude Máxima do Curso do Rio (m)	22
Altitude Mínima do Curso do Rio (m)	1
Altitude Média do Curso do Rio (m)	11,5
Amplitude Altimétrica do Curso do Rio (m)	21
Declividade do Curso do rio (m/m)	0,01

Fonte: Autoria própria, 2024.

5.2.3. Características da rede de drenagem

A partir da caracterização da rede de drenagem da microbacia, foi possível identificar que o comprimento do curso d'água é idêntico ao comprimento total dos cursos d'água (Tabela 6), o que indica que a microbacia possui apenas um curso principal, sem ramificações expressivas. Isso sugere uma rede de drenagem simples, com baixa complexidade.

Tabela 6 - Características da rede de drenagem da microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.

Características da rede de drenagem	
Parâmetro Morfométrico	Total
Comprimento do Curso de Água (m)	1827,98
Comprimento total dos cursos de água (m)	1827,98
Densidade de Drenagem (km/km ²)	2,72
Densidade Hidrográfica (canais/km ²)	1,49
Tempo de Concentração (min)	35,43

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com relação a densidade de drenagem, esta é considerada uma das variáveis mais importantes na análise morfométrica das bacias de drenagem, pois representa o grau de dissecação topográfica em paisagens formadas pela atuação fluvial e expressa a quantidade de canais disponíveis para o escoamento, além do controle exercido pelas estruturas geológicas (CHRISTOFOLETTI, 1980). O valor calculado para a microbacia em estudo reflete sua capacidade de drenagem natural; pois quanto maior a densidade, mais eficiente é o escoamento superficial.

Segundo Villela e Mattos (1975), esse índice pode variar de 0,5 km/km² em bacias com drenagem pobre, a 3,5 km/km² em bacias com drenagem mais eficiente. Assim, a microbacia em questão apresenta uma capacidade de drenagem considerada média. Adicionalmente, a densidade hidrográfica da microbacia, que é de 1,49 canais/km², indica que a rede de drenagem não é excessivamente fragmentada, o que pode favorecer um fluxo mais concentrado no curso principal.

Por fim, o tempo de concentração observado foi relativamente curto, com duração de 35,43 minutos. Esse dado sugere que, em casos de chuva intensa, a resposta hidrológica da bacia será rápida, resultando em um aumento súbito do escoamento (PAVLOVIC; MOGLEN, 2008).

Nesse contexto, pode haver uma sobrecarga na drenagem, elevando o risco de alagamentos, especialmente se a infraestrutura não estiver adequada para absorver o volume de água gerado.

5.2.4. Intensidade da chuva

Com base na equação de intensidade-duração-frequência (IDF), que correlaciona a intensidade máxima da chuva com a duração (tempo de concentração) e a frequência das precipitações (tempo de retorno), considera-se o tempo de concentração como equivalente à frequência da precipitação. Essa abordagem assegura que toda a bacia contribua simultaneamente para o escoamento. A partir dessa formulação, foi possível calcular a intensidade da chuva para diferentes tempos de retorno (Tabela 7). A aplicação dessa equação é essencial em projetos hidráulicos e no manejo das águas pluviais, pois permite prever o comportamento de chuvas intensas e desenvolver soluções eficientes para mitigar alagamentos e inundações.

Tabela 7 - Estimativa da intensidade da chuva máxima para diferentes tempos de retorno para a microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN.

Tempo de retorno (Anos)	Intensidade da chuva (mm)
2	52,09
5	63,78
10	74,34
15	81,30
20	86,64
25	91,02
50	106,09
100	123,65

Fonte: Autoria própria, 2024.

É importante mencionar que para o cálculo das intensidades, foram utilizadas constantes de ajuste locais, que são parâmetros específicos para as condições climáticas e hidrológicas do município de Mossoró-RN, conforme definido por Santos (2015).

5.2.5. Vazão de escoamento superficial

O tamanho da bacia hidrográfica exerce um papel crucial na escolha da fórmula para estimar a vazão máxima gerada por uma chuva de intensidade uniforme. Em bacias menores, características locais, como topografia, uso e ocupação do solo, e cobertura vegetal, tendem a exercer uma influência maior sobre o comportamento hidrológico em comparação com bacias de maior porte (LIMA; ZAKIA, 2000).

Os valores obtidos (Tabela 8) para a microbacia em questão evidenciam que a vazão de escoamento é alta em relação à sua extensão. Corroborando esta afirmação, Caminha e Silva (2023) estudaram uma microbacia urbana 90% mais extensa do que a microbacia deste estudo, e os valores de vazão superficial encontrados foram similares aos obtidos neste trabalho. Esse fenômeno pode ser explicado principalmente pela extensa área impermeável que compõe a bacia (TUCCI, 2000).

Tabela 8 - Estimativa da vazão de escoamento superficial para diferentes tempos de retorno para a microbacia hidrográfica urbana de interesse, localizada em Mossoró-RN..

Tempo de retorno (Anos)	Vazão superficial (m³/s)
2	7,28
5	8,92
10	10,39
15	11,37
20	12,12
25	12,73
50	14,84
100	17,29

Fonte: Autoria própria, 2024.

Quando relacionadas as vazões ao tempo de retorno, é possível dimensionar de forma mais eficiente às estruturas de drenagem necessárias para escoar o volume de água pluvial gerado.

Estudos como este, que adotam uma abordagem integrada, fornecem subsídios para projetar sistemas de drenagem que atendam adequadamente às demandas hídricas, minimizando o risco de alagamentos e garantindo a eficácia do escoamento superficial.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da caracterização da microbacia hidrográfica urbana localizada em Mossoró-RN, foram identificadas características essenciais, como a área total, a ocupação do solo, a altimetria e a rede de drenagem, que são fundamentais para compreender o comportamento hidrológico da bacia durante períodos de precipitação intensa.

A análise revelou uma alta taxa de urbanização, com 93,93% da área impermeabilizada, o que favorece um aumento significativo do escoamento superficial e eleva o risco de alagamentos em regiões críticas, especialmente nas proximidades do exutório. Indicando que é crucial uma drenagem eficiente de forma a evitar inundações.

O estudo morfométrico também destacou que a forma alongada da microbacia, expressa por índices como o fator de forma, fator de compactidade, índice de circularidade e a razão de alongação, contribuem para a lentidão do escoamento, tendo uma declividade média de apenas 1% mostrando que o relevo é predominantemente plano.

As áreas de retenção identificadas ao longo da microbacia, onde a água se acumula sem um caminho eficiente para o curso principal, representam pontos críticos que exigem atenção especial em projetos de drenagem das águas pluviais. Essas zonas de acumulação podem intensificar o risco de alagamentos, especialmente em eventos extremos, e precisam ser consideradas nas estratégias de gerenciamento hídrico.

Em relação à rede de drenagem, a microbacia apresenta uma estrutura simples e limitada, com curso d'água de aproximadamente 1,8 km, consistindo apenas de um canal. A resolução utilizada do ALOS PALSAR não foi suficiente para gerar um canal como em outras microbacias da região, levando à necessidade de empregar as curvas de nível para determinar o curso d'água da bacia.

Com uma área total de cerca de 67 hectares, a vazão superficial na microbacia é elevada, considerando sua extensão. Esse padrão se deve, em grande parte, à alta taxa de impermeabilização do solo. Dessa forma, a implementação de soluções que promovam uma gestão adequada das águas pluviais é essencial.

Embora a abordagem integrada demonstre as características da microbacia e aponte os efeitos decorrentes dessas características, recomenda-se a realização de um estudo mais detalhado para o dimensionamento das estruturas de drenagem. A área banhada pela microbacia é um dos pontos com os maiores índices de alagamentos na cidade de Mossoró; portanto, recomenda-se um estudo com precisão robusta (abaixo de 1 metro) para dimensionar estruturas de drenagem eficientes, capazes de suportar não apenas as condições normais de precipitação,

mas também eventos extremos, proporcionando uma solução sustentável a longo prazo para a gestão das águas pluviais.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, N. L. R. de; XAVIER, F. V.; ALVES, É. C. R. de F. et al. Caracterização morfométrica e pluviométrica da bacia do Rio Manso – MT. **Geociências**, v. 27, n. 2, p. 237-248, 2008.
- AZEVEDO, H. A. M. A. & BARBOSA, R. P. Gestão de recursos hídricos no Distrito Federal: uma análise da gestão dos Comitês de Bacia Hidrográfica. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 5, n. 13, p. 162-182, 2011.
- BACK, A. J. **Bacias hidrográficas: classificação e caracterização física**. Florianópolis: Epagri, 2014. 162 p.
- BARBOZA, E. N. et al. **Caracterização hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana no Ceará utilizando Sistema de Informações Geográficas–SIG**. Research, Society and Development, v. 11, n. 2, p. e40811225440- e40811225440, 2022.
- BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. *In*: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- CAMINHA, V. P.; DA SILVA, P. C. M. **Análise espaço-temporal de uma sub-bacia urbana, considerando os impactos da sua ocupação**. 2023. Monografia (Graduação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.
- CAMPANHARO, W. A. **Diagnóstico físico da bacia do rio Santa Maria do Doce-ES**. 2010. 66 f. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2010.
- CARVALHO, R. G.; KELTING, F. M. S.; SILVA, E. V. Indicadores socioeconômicos e gestão ambiental nos municípios da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, RN. **Revista Sociedade e Natureza (Online)**, v. 23, n. 1, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/sn/v23n1/12.pdf>.
- CECILIO, R. A.; REIS, E. F. Apostila didática: manejo de bacias hidrográficas. **Universidade Federal do Espírito Santo**, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural, 2006. 10p.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2. ed., 1980.
- ELESBON, A. A. A.; GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D.; OLIVEIRA, I. C. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus – Brasil. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 3, p. 281-288, set. 2011.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos, Rio de Janeiro, 1979. 83 p.
- GABLER, R. E.; PETERSEN, J. F.; TRAPASSO, L. M. **Essentials of Physical Geography**. 8. ed. Canada: Thomson Brooks/Cole, 2007. p. 491.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. Erosão dos solos e a questão ambiental. In: **GUERRA, A. J. T.; VITTE, A. C. (Orgs.). Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2010.

GRAVELIUS, H. Flusskunde. Goschen Verlag, Berlin, 1914. **Morphometry of drainage basins**. Elsevier, Amsterdam.

HENRY-SILVA, G.G.; CAMARGO, A. F. **A bacia do rio Apodi-Mossoró: aspectos ambientais, sociais e econômicos de uma bacia hidrográfica no semiárido do Rio Grande do Norte**. São Carlos: RiMa, 2022.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc America Bulletin*, v.3, n.56, 1945

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de mapas do IBGE**. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>.

KIRPICH, T. P. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Journal of Civil Engineering**, v. 10, n. 6, p. 362, 1940.

LACERDA, G. L.; FIRMINO, L. D.; SÁ, A. C. et al. Caracterização morfométrica: estudo de caso da bacia hidrográfica do Riacho dos Grossos, Paraíba, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, p. 362-376, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6008/CBPC21796858.2019.002.0030>.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: **RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p. 33-43.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. dos. **Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar?** Rio de Janeiro: Ipea, 2022. (Texto para Discussão, n. 2791).

MENEZES, J. P. C.; BITTENCOURT, R. P.; FARIAS, M. S.; BELLO, I. P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L. F. C. **Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 519-534, jul./set. 2016.

MOSCA, A. A. de O. **Caracterização hidrológica de duas microbacias visando à identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas**. 2003. 120 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais, Área de Concentração: Conservação de Ecossistemas Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

NOBRE, N. C.; SILVA, C. M.; SANTANA, J. S.; SILVA, W. A. Caracterização morfométrica, climática e de uso do solo da bacia hidrográfica do Rio Farinha-MA. **Acta Iguazu**, p. 11-34, 2019.

OLIVEIRA, P. T. S. de; ALVES SOBRINHO, T.; STEFFEN, J. L.; RODRIGUES, D. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2010.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, 22(63), 43–60, 2008. doi:10.1590/s0103-40142008000200004.

QGIS 3.34. Baixar o QGIS. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html.

ROCHA, A. B. **Proposta metodológica de gestão dos espaços-riscos de inundações urbanas em Mossoró-RN**. 2015. 171 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

SANTOS, J. B.; FERREIRA, L. V. Drenagem urbana. **Viçosa: Universidade Federal de Viçosa**, 2003.

SANTOS, W. D. O. **Máximas intensidades e índices de erosividade de chuvas para o Rio Grande do Norte**. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SCHUMM, S. A. **Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy**. Geological Society of America Bulletin, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (SEMARH). **Bacias hidrográficas: Apodi-Mossoró (RN)**. Disponível em: <http://www.semarh.rn.gov.br>.

SILVA, B. L.; TROLEIS, A. L. A estrutura hídrica do território do Rio Grande do Norte: uma análise sistêmica. **Sociedade e Território**, v. 31, n. 2, p. 73-96, 2019.

SOUSA, G. C. **Utilização de sistemas de retenção na fonte como forma de reduzir os efeitos do escoamento superficial no centro de Mossoró-RN**. 2017. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. Transactions of the American Geophysical Union, v. 38, p. 913-920, 1957.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007. DOI: <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236>

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Viçosa, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. [S.l.: s.n.], 1995.

TUCCI, C. E. **Água no meio urbano**. Águas Doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação, 2, 475-508, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5-27, jan./mar. 2002.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana**. Ciência e cultura, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas – desenvolvimento urbano. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

VEIGA, A. J. P. et al. **Análise do uso e cobertura da terra em Itapetinga no estado da Bahia, Brasil, com uso de Sensoriamento Remoto e SIG**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 9, p. 73928-73947, 2020.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.