



UFRJ

Jandira Ferreira Novais Marmello

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM NOS TERRENOS DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NO NORTE FLUMINENSE**

Rio de Janeiro

2022

Jandira Ferreira Novais Marmello

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM NOS TERRENOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NO
NORTE FLUMINENSE

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,
apresentado como requisito necessário para
obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores: Prof. José Carlos Sícoli Seoane
Prof. Claudio Limeira Mello

Rio de Janeiro

2022

Marmello, Jandira Ferreira Novais

Extração automática de drenagem nos terrenos da
Formação Barreiras no Norte Fluminense/Jandira Ferreira Novais
Marmello – Rio de Janeiro: UFRJ/Instituto de Geociências, 2022.

61f

Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia –
Universidade Federal do Rio e Janeiro – UFRJ, Instituto de
Geociências, Departamento de Geologia, 2022

Palavras-chave: Formação Barreiras, GIS, Rio de Janeiro

Jandira Ferreira Novais Marmello

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM NOS TERRENOS DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NO NORTE FLUMINENSE**

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,
apresentado como requisito necessário para
obtenção do grau de Geólogo.

Aprovada em: _____, de _____ de 2022.

Orientador: José Carlos Sícoli Seoane (UFRJ)

Claudio Limeira Mello (UFRJ)

Dedico aos homens de minha vida:

Jefferson, Kauã e Isaac.

AGRADECIMENTOS

Muito obrigada,

A Deus porque Ele é minha rocha e minha fortaleza, é meu escudo, é meu amparo e meu Norte.

Aos meus pais que fizeram da fraqueza a força, que me ensinaram a honestidade, o bom senso, a resiliência, o bom humor e a esperança. Eu amo vocês mais do que sou capaz de dizer.

Aos meus nove irmãos que sempre acreditaram em mim e me levantaram nos dias difíceis.

Ao Jefferson, parceiro de todas as horas, que nunca me deixou faltar o abraço, o olhar compreensivo e comprometido, um lar especial cheio de conforto e gratidão. Permanecemos, não desistimos, perdoamos e cremos. Obrigada pelo comprometimento mútuo com o amor responsável, por nutrir junto comigo o bonito e o real do casamento. Vamos para sempre, juntos, dançar a dança da perseverança.

Ao Kauã e ao Isaac por serem sempre minha força e meu impulso para conquistar o impossível, pelos abraços e beijos espontâneos, por serem tão especiais, tão carinhosos e tão bondosos.

Ao meu orientador José Carlos Sicoli Seoane, pela força genuína. Agradeço pelo constante incentivo e confiança, além de todo aprendizado proporcionado, decisivos em minha formação acadêmica e ética. Obrigada pelo estímulo criativo, intelectual, emocional e logístico.

Ao meu segundo orientador, Claudio Limeira Mello, pela compreensão e paciência, pelas correções, por me ensinar, por ter desempenhado a função de meu orientador com dedicação e amizade. Agradeço também pelos anos como meu orientador acadêmico.

Aos meus professores que me ensinaram e me ajudaram a apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

À Universidade Federal de Mato Grosso e à Universidade Federal do Rio de Janeiro essenciais no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

Às pessoas com as quais convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Aos meus amigos de todos os momentos, Dominga, Érica, Mikeias, Estela, Jorge, Diego, Silbene, Grazi, Suellen, Fernanda, Mônica, Roberto, Nívia e Jeferson, pela amizade e apoio. Eu amo vocês e jamais vou me esquecer de que vocês estavam lá!

Mas, pergunta agora às alimárias, e cada uma delas te ensinará; e às aves dos céus, e elas te farão saber; ou fala com a terra, e ela te ensinará; até os peixes do mar te contarão. Quem não entende, por todas estas coisas, que a mão do Senhor fez isto?

Jó 2:7-9

RESUMO

MARMELLO, Jandira Ferreira Novais. **Extração automática de drenagem nos terrenos da Formação Barreiras no norte fluminense**. 2021, 59 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A rede de drenagem é um componente essencial para as pesquisas geológicas, especialmente em geomorfologia, hidrologia e no planejamento e gestão dos recursos naturais. No entanto, a rede de drenagem é, em geral, o elemento que apresenta as mais significativas imprecisões em uma base cartográfica, em função de fatores diversos que interferem em seu processo de produção. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo geral realizar a extração automática de drenagem de duas microbacias sobre terrenos da Formação Barreiras na região norte do Rio de Janeiro, a partir de um mosaico de MDE e avaliar o produto gerado comparando-o com a fotointerpretação de imagens de satélite disponíveis nas bases *online* do *Google Earth*. Uma vez que a extração de drenagens em terrenos planos é um desafio, a escolha dos terrenos da Formação Barreiras como área de estudo deveu-se ao fato de serem planos com uma significativa densidade de drenagens. Como objetivo específico, essa pesquisa propõe-se a realizar a comparação visual entre as bases de drenagem, aplicando os parâmetros de densidade de drenagem e ordem hierárquica dos canais fluviais, com a fotointerpretação de imagens de satélite. Para a realização desses objetivos foram utilizados um mosaico de MDE de escala 1:25.000 e imagens de satélites, sendo a extração automática das drenagens realizada no programa ArcGIS. Como resultado, as drenagens geradas e as drenagens fotointerpretadas são bastante semelhantes, porém com algumas diferenças significativas. Para se atenuar as diferenças encontradas, devem-se, portanto, ser consideradas as características geomorfológicas da bacia de interesse pois afetam distintamente o desempenho dos algoritmos, causando discrepâncias relevantes na geração de drenagem.

Palavras-chave: Formação Barreiras. GIS. Rio de Janeiro.

ABSTRACT

MARMELLO, Jandira Ferreira Novais. Automatic extraction of drainage in the lands of the Barreiras formation in the north of Rio de Janeiro. 2020, 61 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

The drainage network is an essential component for geological research, especially in geomorphology, hydrology and not natural resource planning and management. However, the drainage network is, in general, the element that presents as the most significant inaccuracies in a cartographic base, due to several factors that interfere in its production process. In this sense, the general objective of this work was to perform the automatic acquisition of two watersheds on a mosaic of the Barreiras Formation in the northern region of Rio de Janeiro, from the evaluation region of the generated product, comparing it with a photointerpretation of available satellite images. in Google Earth's online databases. Since the plans for the formation of drainage plans in land is a challenge, the choice of the Barreiras lands as a study area was due to the fact that they have a significant density of drainages. As specific, this research intends to carry out a visual comparison between the drainage bases, the drainage density parameters and the architectural order of the fluvial channels, with a photointerpretation of images. For the accomplishment of these objectives, a mosaic of MDE 1:25,000 scale and satellite images were used, being an automatic sending of the drainages carried out in ArcGIS. As a result, the drainage photos produced are quite significant, but with some significant differences. To mitigate the differences, they must therefore be considered from the probability of being projected as distinct geomorphological features, designed to stand out, therefore, from the magnitude of the relevant features, in the generation of features.

Keywords: Barriers Formation. GIS Rio de Janeiro.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Mapa geológico simplificado da área destacando a principal ocorrência da Formação Barreiras na região Norte Fluminense e as principais drenagens..... | 16 |
| Figura 2 - Mapa tectônico do Sudeste brasileiro, de acordo com Riccomini et al. (2004), com destaque para a localização da área de estudo..... | 17 |
| Figura 3 - - Seção estrutural..... | 18 |
| Figura 4 – Mapa Geológico da região..... | 20 |
| Figura 05 - Platô terciário | 22 |
| Figura 6 - Mapa de domínio geomorfológico da área de pesquisa modificado de Mapa de domínio Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro de CPRM. | 22 |
| Figura 7 – Mapa geomorfológico..... | 23 |
| Figura 8 - Geração de produtos | 28 |
| Figura 09 – Modelo Numérico de Terreno | 29 |
| Figura 10 – Aplicação do <i>Flow Direction</i> na área de estudo..... | 30 |
| Figura 11 – Modelo de Fluxo Acumulado..... | 32 |
| Figura 12 – flow accumulation..... | 33 |
| Figura 13: Ordem dos canais segundo Sthraler (1952) modificado de Monteiro e Bueno (2012). | 34 |
| Figura 14 – Hierarquização da drenagem extraída automaticamente | 34 |
| Figura 15 – Erro de drenagens em corpos d’água..... | 36 |
| Figura 16 – Quadrados formados na extração automática na drenagem. | 36 |
| Figura 17 A e B. A -Duas drenagens de primeira ordem inexistentes na drenagem. B– Uma drenagem de primeira ordem inexistente na drenagem. | 37 |
| Figura 18 – A e B. A – Drenagem adequada na drenagem. B – A drenagem central mostra uma drenagem gerada bem maior do que a drenagem observada pela imagem de satélite. | |

| | |
|--|--|
| Figura 19 - Drenagem gerada passando onde na imagem de satélite mostra construções de casas. 38 | |
| Figura 20 - Drenagem mal posicionadas..... 38 | |
| Figura 21- Drenagens menores do que a vista pelas imagens de satélite. 39 | |

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1. OBJETIVOS | 14 |
| 2. ANÁLISE DE DRENAGEM EM SIG | 15 |
| 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 23 |
| 3.1. LOCALIZAÇÃO..... | 23 |
| 3.2. GEOLOGIA REGIONAL | 24 |
| 3.3. GEOMORFOLOGIA..... | 30 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 35 |
| 4.1. MATERIAIS..... | 35 |
| 4.2. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM À PARTIR DO MDE | 36 |
| 4.3. ANÁLISE COMPARATIVA COM A INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS | 40 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 6. CONCLUSÃO | 53 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

1. INTRODUÇÃO

A rede de drenagem de uma área determina o trajeto de escoamento da água de acordo com diversos fatores, sendo o relevo da região o principal. Quando ainda não existiam os modelos digitais de representação da superfície, o mapeamento da rede de drenagem era apenas feito pelo fotointérprete a partir da restituição aerofotogramétrica, norteadas pelos fundamentos da estereoscopia (Santos & Francisco, 2011). Essa é uma metodologia que usa imagens capturadas de um objeto em diferentes ângulos, o que permite a percepção das dimensões de altura, largura e profundidade – percepção tridimensional (Coutinho *et al.*, 2007).

Conforme foram evoluindo as geotecnologias e surgiram ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), passou-se a utilizar o processamento automático de Modelos Digitais de Elevação (MDE) do terreno, a partir de algoritmos, para a extração e a análise de drenagem de bacias hidrográficas, bem como atividades de planejamento de território e outras (Burrough & McDonnell, 1998; Mendes & Cirilo, 2001; Miranda, 2005). Tal método vem recentemente ganhando espaço com a utilização de MDE obtidos por satélites orbitais (Melgaço *et al.*, 2005).

A rede de drenagem é um componente essencial para as pesquisas em geomorfologia, hidrologia e no planejamento e gestão dos recursos naturais. A extração automática de drenagens consiste, assim, em uma importante ferramenta em apoio a esses estudos, que necessitam de uma precisão cartográfica adequada no mapeamento da drenagem, com uma extração que se aproxime o máximo possível da drenagem *in loco*.

No entanto, Sampaio & Augustin (2014) alertam que a rede de drenagem é, em geral, o elemento que apresenta as mais significativas imprecisões em uma base cartográfica, em função de fatores diversos que interferem em seu processo de produção como diferenças de escala, de declividade, de resolução e tratamentos de *sinks*. A extração da rede de drenagem (seja manual ou automática) é ainda mais imprecisa em áreas de relevo plano porque possuem sutis desvios altimétricos e são poucos os trabalhos científicos que avaliam a capacidade do processamento automático da rede de drenagem em descrever corretamente a realidade de campo.

Nesse sentido, considerando-se que os terrenos sedimentares, por serem mais planos, são áreas favoráveis para se testar o método de extração automática de drenagem, foi selecionada para o desenvolvimento do presente estudo a área de ocorrência da Formação Barreiras (unidade sedimentar cenozoica) na região norte do Rio de Janeiro.

No tocante à abordagem, este estudo é qualitativo, pois analisa de forma empírica e não numérica o tema em questão.

Quanto à sua natureza, este estudo enquadra-se como pesquisa exploratória, porque visa proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. (Gerhard *et al.*, 2009).

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo aqui apresentado é realizar a extração automática de drenagem sobre terrenos da Formação Barreiras na região norte do Rio de Janeiro, a partir de um mosaico de MDE (de escala 1:25.000) produzidos pelo IBGE e disponíveis no *site*, e avaliar o produto gerado comparando-o com a fotointerpretação de imagens de satélite disponíveis nas bases *do Google Earth*.

Como objetivo específico, essa pesquisa propõe-se a realizar a comparação visual entre as bases de drenagem, aplicando os parâmetros de densidade de drenagem e ordem hierárquica dos canais fluviais, com a fotointerpretação de imagens de satélite.

2. ANÁLISE DE DRENAGEM EM SIG

A análise da rede de drenagem é uma metodologia empregada para a caracterização geológica, hidrológica e geomorfológica de uma determinada região.

Freitas *et al.* (2013) destacam o papel essencial da bacia de drenagem na evolução do relevo, pois os cursos de água são importantes modeladores da paisagem e delineiam o relevo da superfície terrestre. Dessa forma, a análise das feições geomorfológicas, principalmente no que tange à sua evolução, envolve necessariamente a análise de drenagem.

O estudo da rede de drenagem é muito útil para a interpretação geológica, particularmente em áreas de baixo relevo (Howard, 1967), auxiliando na identificação dos controles litológicos e estruturais. Howard (1967) destaca, em particular, que a análise das anomalias de drenagem é muito relevante, pois elas indicam desvios dos controles geológicos ou topográficos regionais. Ressalta ainda a importância da análise da rede de drenagem para o estudo sobre a interferência dos mecanismos tectônicos. Como os fluxos de água são agentes morfogenéticos muito ativos na gênese da paisagem e, também, como se justapõem a toda e qualquer deformação do relevo por processos tectônicos de intensidades variáveis, torna-se muito importante a sua análise (Freitas & Furrier, 2011).

Muitos estudos geomorfológicos, a partir da década de 60, buscaram relacionar as vertentes e seus canais com base na investigação exaustiva de parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas (Christofoletti, 1970; Morisawa, 1962; Zavoianu, 1985).

Christofoletti (1970) afirma que o início da utilização dos processos sistemáticos para medir as formas de relevo ocorreu no século XIX, particularmente na Alemanha, Áustria e Suíça. Salientou ainda que a análise de aspectos da drenagem, relevo e geologia pode levar ao entendimento de várias questões associadas à dinâmica ambiental local. Entretanto, cabe acrescentar que os índices verificados na análise morfométrica, por si só, não sintetizam a dinâmica de uma bacia hidrográfica, já que sofrem intensa modificação temporal.

Morisawa (1962) estudou a geomorfologia quantitativa de algumas bacias hidrográficas no platô dos Apalaches e observou que, em bacias cujo uso e ocupação do solo eram similares, a erosão e o escoamento fluvial foram mais intensos nas bacias de formato com tendência à circularidade em comparação com as de formato mais alongado. Dessa forma, concluiu que o índice de circularidade de uma bacia influencia na intensidade das enchentes e na quantidade de remoção de seus sedimentos.

Zavoianu (1985) afirma que a evolução de qualquer paisagem em nosso planeta e, portanto, de qualquer drenagem, é o resultado de interações entre os fluxos de matéria e energia entrando e se movendo dentro de seus limites e a resistência da superfície topográfica. Sob condições normais, a precipitação é a principal fonte de matéria e a radiação solar é a principal fonte de energia. A resistência da superfície topográfica é determinada pela altitude, sua altitude, a resistência à erosão das rochas constituintes, a porcentagem de cobertura vegetal, presença de uma camada de solo, etc. As relações entre esses fatores e suas distribuições no tempo e no espaço governam em grande parte a evolução e o estado atual da drenagem. O aspecto qualitativo dessas relações é bastante conhecido e foi analisado em detalhes na literatura, mas a análise quantitativa era muito mais difícil, devido a observações insuficientes e falta de um método unificado. Atualmente, com as ferramentas proporcionadas pelas plataformas GIS atuais, isso se tornou mais viável.

A precisão dos dados de modelos digitais de elevação tem sido corroborada de diferentes formas por vários pesquisadores (Jarvis *et al.*, 2004; Kocak *et al.*, 2005; Rodriguez *et al.*, 2006; Smith & Sandwell, 2003; Sun *et al.*, 2003). Apesar disso, pesquisas realizadas por Falorni *et al.* (2005) e Kaab (2005) apontam que tal exatidão está sujeita à topografia local, apontando menos equívocos em dados referentes a terrenos com relevo íngreme ou montanhoso. Tais defeitos (ou artefatos) nos MDE são chamados de *sinks* que, conforme Mendes & Cirilo (2001), denotam-se por áreas cercadas de elevações em cotas superiores, semelhantes a uma depressão. A primeira etapa de tratamento da matriz de altitudes consiste em preencher essas pequenas depressões. Quando se aplica os padrões da hidrogeologia, sedimentologia e de poluentes de diversas origens, essas depressões ou *sinks* funcionam como obstáculos ao escoamento (Alves *et al.*, 2010).

Nesse contexto, particular ênfase tem sido dada à geomorfometria com relação à extração de parâmetros em bacias hidrográficas a partir de MDE. Segundo Alves Sobrinho *et al.* (2010), o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de técnicas de delimitação automática de bacias hidrográficas têm sido objeto de estudo em várias partes do mundo. Tais técnicas são implementadas em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), promovendo resultados relevantes, conforme verificado nos trabalhos de Mark (1984), Band (1986), Fairfield & Leymarie (1991), Ferreira (1997), Tarboton *et al.* (1991), Tarboton (1997), Verdin & Verdin (1999), Wilson & Gallant (2000), Turcotte *et al.* (2001), Vogt *et al.* (2003), Jordan & Schott (2005) e Merkel *et al.* (2008).

A representação da hidrografia é fundamental porque é utilizada em diversas análises como a de modelagem do terreno, em gestão de recursos naturais e ambientais, em estudos

hidrológicos, etc. A rede de drenagem proporciona um arranjo para todas as formas de relevo em uma carta topográfica, apontando o predomínio de uma forma de relevo em determinada área e, por vezes, o melhor conhecimento de um fenômeno em substituição ao de outras características (Ferreira, 1997).

Band (1986) atenta-se para a delimitação de bacias hidrográficas, aplica o geoprocessamento à abordagem paramétrica para compreensão do meio físico, descreve uma abordagem para extrair automaticamente, mapear e codificar a estrutura espacial das bacias de drenagem a partir de arquivos de elevação de varredura padrão.

Mark (1984) ocupa-se com a extração da rede de drenagem, aperfeiçoando os métodos até então empregados. Esse autor percebeu que os MDE podem ter depressões (*sinks*), que são os pontos em maior profundidade do que todos os pontos ao seu redor. Tais depressões atrapalham as análises relativas à extração da drenagem, em especial a identificação da direção do fluxo. O número de depressões e do fluxo acumulado é inversamente proporcional a resolução do MDE. Às vezes, o fluxo não segue a direção real do escoamento do terreno e as linhas de drenagens podem vir a ser desviadas para sub-bacias, gerando a necessidade de correção. Em alguns casos, é preciso estar atento, principalmente nos MDE de alta resolução, que conseguem representar depressões menores, pois algumas depressões reais, como lagos e planícies de inundação, podem ser removidas.

A correção dessas depressões se dá inicialmente com matrizes de 3x3 células. A célula central terá sua altitude elevada até a menor altitude de uma das células vizinhas (Mark, 1984). Se após esse procedimento, as depressões ainda continuarem, então aumentam-se as matrizes até que sejam corrigidas (Jenson & Domingue, 1988). Entretanto, cabe acrescentar que esse procedimento pode resultar em grandes áreas planas, tornando difícil a identificação da direção do fluxo (Grimaldi *et al.*, 2007). Essa é a metodologia mais empregada pelos *softwares* disponíveis na atualidade, havendo, como exemplo, o *fillsinks* do ESRI ArcGIS, o qual leva em consideração as altitudes dos *pixels* vizinhos, corrige os erros e gera, dessa forma, dados mais consistentes (Oliveira *et al.*, 2010).

No MDE, os aspectos da rede de drenagem estão sujeitos ao sentido da nascentes do canal porque elas são determinadas sobretudo pela morfometria e topologia da rede de drenagem, o que sugere dependência com essas nascentes. Desse modo, a identificação das nascentes, é um fator crítico para a extração representativa da rede de drenagem em MDE (Tarboton *et al.*, 1991) bem como para todo sistema de gestão de recursos hídricos.

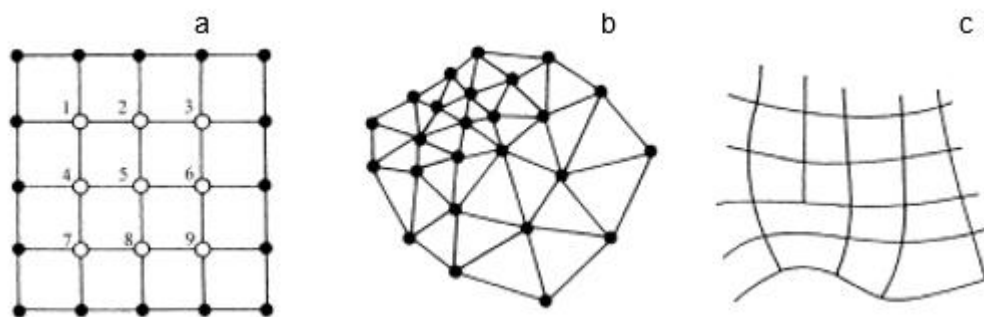
Tarboton (1997) criou um método para simular direções de fluxo, embasado em faces triangulares cujas direções de fluxo são de 0° e 360°, chamado Dinf, que determina uma única

direção de fluxo para cada pixel na direção descendente do declive mais íngreme, tendo por base oito facetas triangulares organizadas por cima de um bloco de grade (3 x 3). Esse procedimento define uma rede drenagem de modo simples e gera automaticamente redes conectadas. Para Fairfield & Leymarie (1991), há uma falha nos algoritmos que deduzem a rede de drenagem a partir de um modelo digital de elevação (MDE), pois os canais de água fluem em linhas paralelas nas direções preferenciais da amostragem.

Verdin & Verdin (1999) desenvolveram um sistema topológico para a delimitação e codificação de bacias hidrográficas. Eles propuseram um sistema de referência abrangente para as bacias hidrográficas como um suporte ao gerenciamento de bacias hidrográficas, à pesquisa de mudanças globais e à busca de desenvolvimento sustentável, baseado no controle topográfico e na topologia da rede fluvial. Tais características tornam o sistema adequado para a implementação e uso com modelos de elevação digital (MDEs) e sistema de informações geográficas.

Wilson & Gallant (2000) apontam que os dados de elevação digital são organizados em três estruturas de dados (Figura 1) - (a) grades regulares, (b) redes irregulares trianguladas e (c) contornos, dependendo da fonte e/ou método preferido de análise.

Figura 1 - Métodos de estruturação de uma rede de dados de elevação: (a) rede quadrada mostrando uma submatriz móvel 3 por 3 centrada no nó 5; (b) rede irregular triangulada; e (c) rede baseada em contorno



Fonte: Wilson & Gallant (2000).

Hutchinson (1989) enfatiza a abordagem morfológica para a interpolação de modelos de elevação digital de grade regular (MDEs) a partir de pontos de dados de elevação específicos da superfície e linhas de fluxo selecionadas. Tal abordagem deu origem a um procedimento de interpolação computacional eficiente, que associa a minimização de uma rugosidade específica do terreno a um algoritmo automático de aplicação de drenagem.

O *Austrália National University DEM (ANUDEM)*, idealizado por Hutchinson (1989), é um algoritmo de aplicação de drenagem que remove falsas depressões, produzindo MDEs que podem ser usados com vantagem em estudos de processos hidrológicos. Este algoritmo, que utiliza uma técnica iterativa de interpolação por diferenças finitas, foi projetado para ter a

eficiência de métodos de interpolação local, como o IDW, sem perder a continuidade da superfície, o que aumenta significativamente a precisão dos MDEs interpolados a partir de dados de elevação específicos de superfície esparsos, mas bem escolhidos. Além disso, facilita a detecção de erros nos dados de elevação que não seriam detectados por meios estatísticos mais convencionais e forma uma sólida base física para a generalização cartográfica.

Para Moore *et al.* (1991), os modelos de elevação digital (MDE) de grade quadrada surgiram como os mais amplamente utilizados em estrutura de dados durante a década passada devido à sua simplicidade (ou seja, matrizes de elevação simples que registram relações topológicas entre pontos de dados implicitamente) e facilidade de implementação do computador (Wilson & Gallant, 2000). Estas vantagens compensam pelo menos três desvantagens. Primeira, o tamanho da malha da grade frequentemente afeta os requisitos de armazenamento, a eficiência computacional e a qualidade dos resultados (Moore *et al.* 1991).

Segunda, as grades quadradas não conseguem lidar com mudanças bruscas de elevação com facilidade e geralmente ignoram importantes detalhes da superfície da Terra em áreas planas (Wilson & Gallant, 2000). No entanto, vale ressaltar que muitos dos problemas em áreas planas ocorrem porque o Serviço Geológico dos EUA (USGS) e outros persistiam até a década de 90 em registrar elevações em metros inteiros. Terceiro, no computador, caminhos de fluxo ascendentes tendem a zigzaguear pela paisagem e aumentam a dificuldade de calcular com precisão áreas de captação específicas (Moore *et al.* 1991).

Vários desses obstáculos foram superados nos últimos anos, como a primeira e a terceira desvantagem, sendo a segunda a mais crítica. Não há motivo genérico para que os MDEs regulares não possam representar adequadamente áreas planas, desde que os atributos do terreno sejam calculados por um método que respeite a drenagem da superfície (Wilson & Gallant, 2000).

Modelos hidrológicos distribuídos requerem uma definição detalhada da estrutura interna de drenagem de uma bacia hidrográfica. A abordagem convencional para obter essa estrutura de drenagem é usar uma matriz de oito direções de fluxo (D8), derivada de um modelo de elevação digital (MDE) raster. No entanto, essa abordagem leva a uma estrutura de drenagem bastante grossa quando as estações de monitoramento ou medição precisam ser localizadas com precisão dentro de uma bacia hidrográfica. Isso se deve em grande parte às limitações da abordagem D8 e à falta de informações sobre áreas planas e sumidouros. Somente a abordagem D8 também não consegue diferenciar lagos de áreas simples (Turcotte *et al.*, 2001). O método tradicional de definição da direção de fluxo, conhecido como método D8 (oito direções de

fluxo), foi proposto por O'Callaghan & Mark (1984). Ele define o fluxo a partir de uma célula para uma de suas oito células vizinhas, na direção que apresentar maior declividade.

Para evitar esses problemas, uma nova abordagem foi desenvolvida, usando uma rede digital de rios e lagos (DRLN) como entrada, além do MDE. Essa nova abordagem permite um ajuste preciso entre o DRLN e a estrutura de drenagem modelada, representada por uma matriz de direção de fluxo e uma rede de cursos de água modelada. Mais importante, a identificação de lagos na rede modelada agora é possível. A abordagem proposta por Turcotte *et al.* (2001), amplamente fundamentada na abordagem D8, usa o DRLN para corrigir direções de fluxo modeladas e cálculos de rede. Para células MDE sobrepostas pelo DRLN, as direções de fluxo são determinadas usando apenas conexões DRLN. As direções de fluxo das outras células MDE são avaliadas com a abordagem D8, que usa um MDE que foi modificado em função da distância ao DRLN (Turcotte *et al.*, 2001)

As técnicas de delimitação de bacias são aplicadas em diversos métodos computacionais como GRASS, SAGA, TauDem, Otto-Pfastetter e ArcGIS, baseando-se no uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e desenvolvidos por vários pesquisadores como O'Callaghan & Mark (1984), Tarboton (1997), Pilesjö & Zhou (1997), Ramme & Kruger (2007), Fan & Collischonn (2009) e Silva *et al.* (2013).

Para O'Callaghan & Mark (1984), o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de técnicas de delimitação automática de bacias hidrográficas se tornam cada vez mais objetos de estudo de vários pesquisadores em diversas partes do mundo devido a sua aplicabilidade e a sua flexibilidade de adaptação. O método de delimitação automática proposto por O'Callaghan & Mark (1984) é capaz de lidar com depressões artificiais introduzidas nos dados de elevação por diferentes sistemas de coleta de dados. A extensão da rede de drenagem extraída pode ser controlada pelo critério de acúmulo de drenagem. Os resultados do método parecem ser comparáveis aos padrões de drenagem que podem ser interpretados visualmente a partir dos contornos dos dados de elevação. Tais técnicas são implementadas em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Pilesjö & Zhou (1997) comparam diferentes métodos para a estimativa de direções de drenagem e acumulações de fluxo de modelos de elevação digital (MDEs) em grade. Para testar a estabilidade de diferentes métodos, criaram vários MDEs com formas diferentes. Os testes nos diferentes MDEs indicam claramente que é inapropriado usar métodos baseados na suposição de drenagem para apenas uma das oito células vizinhas em um MDE. Dos métodos testados, o resultado mais satisfatório foi gerado quando a drenagem de uma célula foi distribuída proporcionalmente ao gradiente de inclinação em cada uma das oito direções

possíveis. No entanto, esse “algoritmo de direção de fluxo múltiplo” não lida corretamente com áreas planas, onde nenhuma inclinação pode ser calculada no MDE. Portanto, sugere-se combinar o “algoritmo de direção de fluxo múltiplo” com um novo algoritmo para estimar a distribuição de drenagem em áreas planas. É então possível estimar a acumulação de fluxo para cada célula em um modelo de elevação digital baseado na malha.

Segundo Tarboton (1997), com os Modelos Digitais de Elevação é possível definir os caminhos de fluxo, delimitar as bacias e calcular as áreas de contribuição, utilizando técnicas de geoprocessamento. Esse autor afirma que, dentre as várias etapas presentes no processamento de modelos digitais de elevação (MDE), a que demanda uma maior atenção é a remoção de depressões, que é a de maior complexidade em análises hidrológicas. Desde a década de 80, diversos métodos computacionais têm sido propostos para a solução deste problema, de maneira a garantir uma continuidade nas direções de fluxo para jusante e, apesar dos esforços para aperfeiçoar esse processo, ainda não existe uma solução que possa ser chamada de a melhor para o problema da remoção de depressões, escolhendo-se o algoritmo mais indicado para a área de pesquisa (Tarboton, 1997).

Ramme & Kruger (2007) utilizaram a metodologia de delineamento automático de bacias presente no pacote computacional ArcHydro com auxílio de geoprocessamento para estudo de uma área em Curitiba (PR). Após a coleta de dados, estes foram comparados com delimitações utilizadas pela SANEPAR em Curitiba. A execução dessa metodologia deve ser repetida quantas vezes forem necessárias para uma melhor extração de dados e diminuição do erro. A análise comparativa apresentou um erro menor que 1% na área da bacia estudada com o método de delineamento automático utilizando *software*.

Silva *et al.* (2008) abordam algoritmos para hierarquização de bacias hidrográficas, citando dentre eles o sistema de codificação Otto-Pfastetter. O sistema Otto-Pfastetter é um método que imbuete a topologia da rede do Código, tem aplicação global, é de fácil implementação computacional e, conseqüentemente, interagir bem com Sistemas de Informação Geográfica – SIG.

Fan & Collischonn (2013) afirmam que fazer representação do relevo de uma área de pesquisa ou trabalho requer cada vez mais o uso computadores, uma vez que eles facilitam e fornecem o detalhamento necessário para os trabalhos em hidrologia. A aplicação vai desde a simples delimitação de bacia até a extração de informações necessárias de caracterização das bacias para a modelagem hidrológica. Obter a representação matricial do relevo no sistema Modelos Digitais de Elevação (MDE) se tornou a forma mais utilizada para fazer as análises de geomorfometria em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Com as informações do MDE,

cada elemento ou pixel tem um atributo referente ao valor de elevação do terreno em relação a um ponto de referência.

Fernández *et al.* (2011) estudaram a interação das variáveis envolvidas no processo de extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação utilizando o aplicativo SAGA GIS. Para isso, os autores usaram MDE, dados do Banco Geomorfométrico do Brasil e Topodata, que advém do refinamento de dados SRTM, de duas bacias de relevos convexos do Estado de São Paulo e de depósitos aluviais de relevo plano do Estado de Rondônia. Como resultado, o estudo concluiu que os algoritmos apresentam diferentes relações entre as características geomorfométricas da área analisada; as drenagens das bacias foram parecidas; no relevo plano, o resultado é melhor quando a filtragem é em média (3x3); e o autores ressaltam que a geomorfometria afeta o desempenho dos algoritmos.

Souza & Almeida (2014) testaram as diferenças entre os dados provenientes de ASTER GDEM, SRTM e TOPODATA, e compararam as drenagens extraídas para a área da bacia do Riacho do Saco, em Serra Talhada (PE), relacionando-as com a drenagem de referência a partir de informações morfométricas. O estudo, ao analisar os MDE gerados com base nos diferentes sensores utilizados, aponta que o ASTER GDEM se mostrou mais adequado para a extração automática da drenagem.

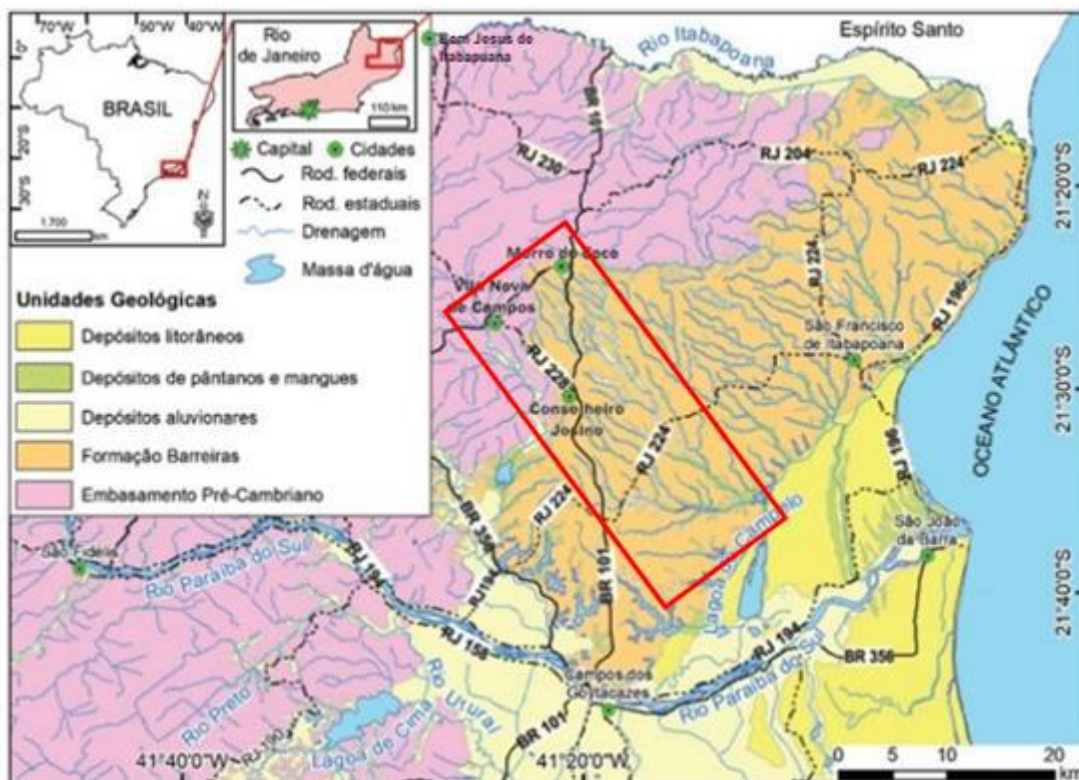
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada na região norte do estado do Rio de Janeiro, estendendo-se entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana, na divisa com o estado do Espírito Santo (Figura 2), abrangendo parcialmente os municípios de Campos dos Goytacazes e São Francisco de Itabapoana. Corresponde à principal área de ocorrência da Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro.

A área de interesse é coberta pelas seguintes cartas do IBGE (escala 1: 50.000): Morro do Coco, Barra Seca, Itabapoana e Travessão.

Figura 2 - Mapa geológico simplificado da região onde se localiza a área de estudo (retângulo em vermelho), no norte do estado do Rio de Janeiro (principal área de ocorrência da Formação Barreiras no estado) e as principais drenagens.



Fonte: a autora (2022).

As principais vias de acesso à área são (Figura 2): a rodovia BR 101, que atravessa de norte a sul a área de estudo, entre Campos dos Goytacazes e a divisa com o Espírito Santo; a rodovia RJ 224, que liga a BR 356 na altura da Usina Sapucaia, em Campos dos Goytacazes, ao distrito de São Francisco de Itabapoana; a rodovia RJ 196, entre a sede do município de São

Francisco de Itabapoana e o distrito de Barra de Itabapoana; e a rodovia RJ 204, entre a localidade de Morro do Coco e a RJ 224. A área dispõe ainda de diversas estradas vicinais.

3.2. GEOLOGIA REGIONAL

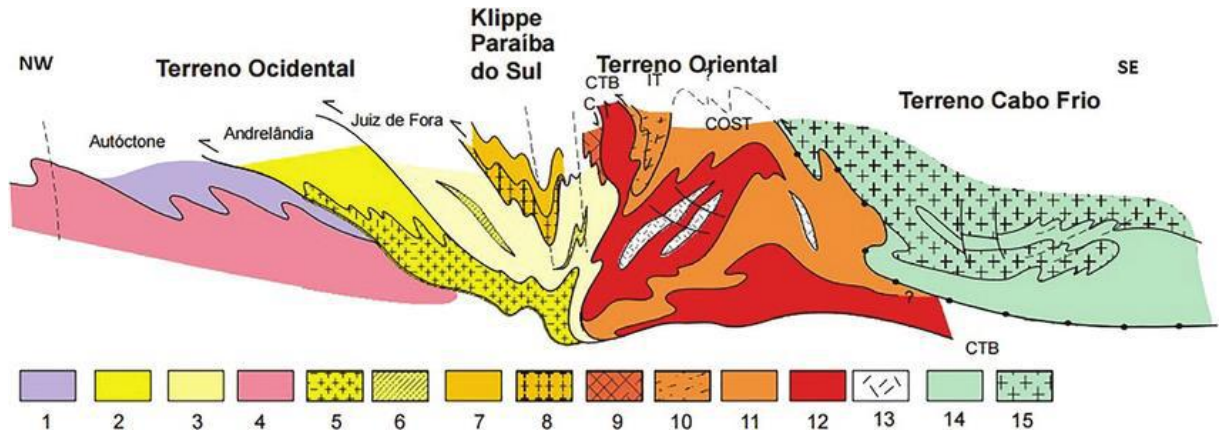
A área de estudo é composta predominantemente por terrenos sedimentares cenozoicos da Formação Barreiras, apresentando também rochas do embasamento cristalino pré-cambriano e sedimentos quaternários, principalmente relacionados à planície costeira desenvolvida na desembocadura do rio Paraíba do Sul (Figura 2).

Os terrenos do embasamento pré-cambriano inserem-se no contexto do Orógeno Ribeira (Heilbron *et al.*, 2000), conforme figuras 3 e 4, de idade neoproterozoica a eopaleozoica, que resultou da amalgamação do paleocontinente Gondwana Ocidental. O Orógeno Ribeira é subdividido em quatro terrenos tectonoestratigráficos, cujos limites estão associados a falhas de empurrão ou zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas: Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental (amalgamados há ca 580 Ma) e Cabo Frio (amalgamado aos demais há ca. 520 Ma). A área de estudo está parcialmente inserida no Terreno Oriental (embasamento cristalino), mas a maioria corresponde ao terreno de sedimentos cenozoicos indiferenciados, sendo identificadas várias litologias associadas a rochas metamórficas de alto grau, predominantemente gnaisses e migmatitos, assim como corpos de rochas granitoides interpostos (Figura 5), com *trend* estrutural NE-SW. Ocorrem, ainda, lentes de quartzitos, rochas calcissilicáticas, anfibolitos e metabasitos.

Figura 3 - Mapa tectônico do Sudeste brasileiro, com destaque para a localização da área de estudo.



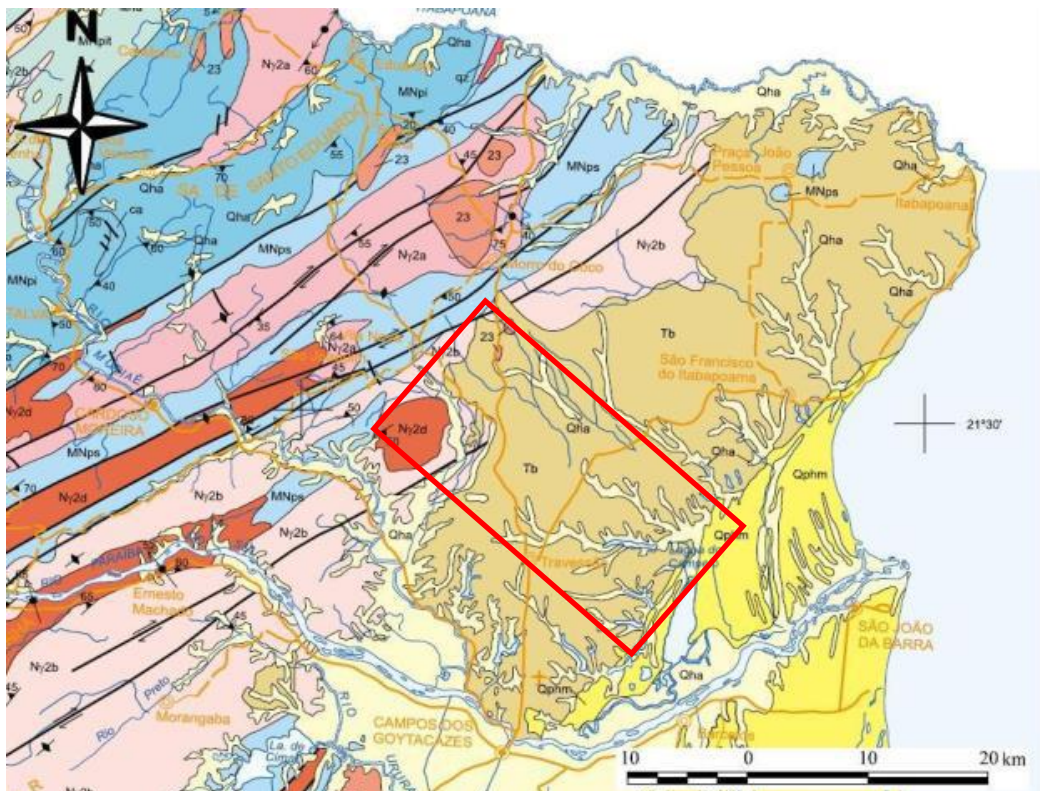
Figura 4 - Seção estrutural composta do Orógeno Ribeira com a relação entre os diferentes terrenos e domínios estruturais.

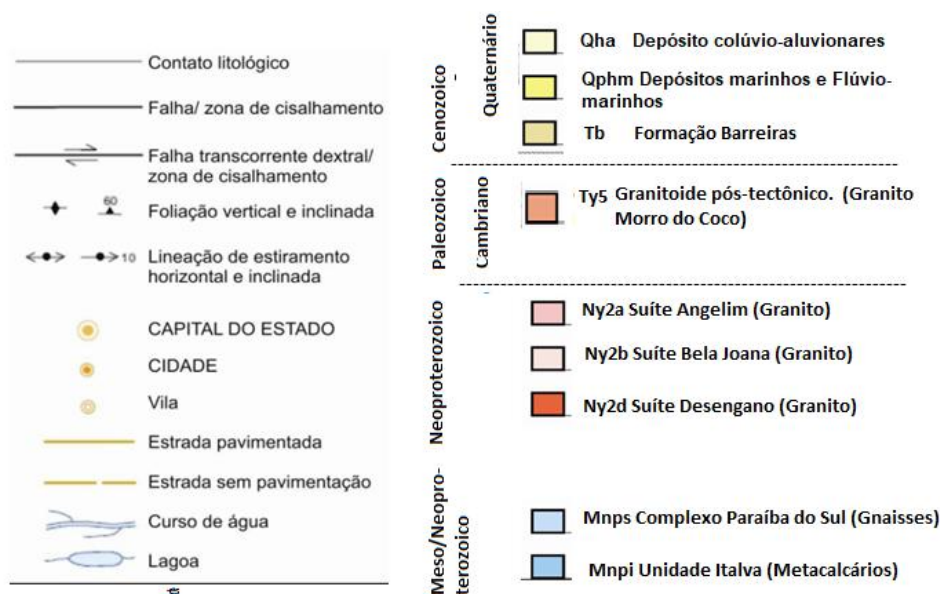


Fonte: Heilbron *et al.* (2004).

Na legenda da figura 4, tem-se: Terreno Ocidental (1-6): 1 a 3 - Megassequência Andrelândia nos domínios Autóctone, Andrelândia e Juiz de Fora; 4 a 6 - Associações do embasamento (complexos Barbacena, Mantiqueira e Juiz de Fora); Terreno Paraíba do Sul (7-8): 7 - Grupo Paraíba do Sul; 8 - Complexo Quirino; Terreno Oriental (9-13): 9 - Sequência Cambuci; 10 - Sequência Italva; 11 - Sequência Costeiro; 12 - Arco Magmático Rio Negro; 13 - Granitos colisionais; Terreno Cabo Frio (14-15): 14 - Sequências Búzios e Palmital; 15 - Complexo Região do Lagos.

Figure 5 – Mapa geológico da porção norte do estado do Rio de Janeiro onde se localiza a área de estudo.





Fonte: Silva & Cunha (2001).

A Formação Barreiras é uma unidade litoestratigráfica (também mencionada na literatura como Grupo Barreiras) de idade miocênica (Arai, 2006; Lima, 2008) que ocorre ao longo da faixa costeira do Brasil, com uma extensa ocorrência (cerca de 5.000 km), do estado do Amapá até o estado do Rio de Janeiro (Suguio & Nogueira, 1999).

Na área de estudo, a Formação Barreiras está situada na porção emersa da bacia de Campos, sendo composta essencialmente por arenitos e lamitos intercalados, com poucas camadas conglomeráticas (Morais, 2001; Morais *et al.*, 2006; Breda, 2012). Seus depósitos, de cores avermelhadas, amareladas ou arroxeadas e comumente bastante ferruginizados, são associados por esses autores à deposição em ambiente fluvial entrelaçado, com contribuições de leques aluviais.

Diversos estudos destacaram a atuação de atividades tectônicas pós-deposição da Formação Barreiras na região, associadas ao desnivelamento de crostas ferruginosas, deslocamento de camadas e presença de falhas normais e transcorrentes de direção NE-SW a NW-SE (Morais, 2001; Ribeiro, 2010; Chrismann, 2014; Rodrigues, 2015).

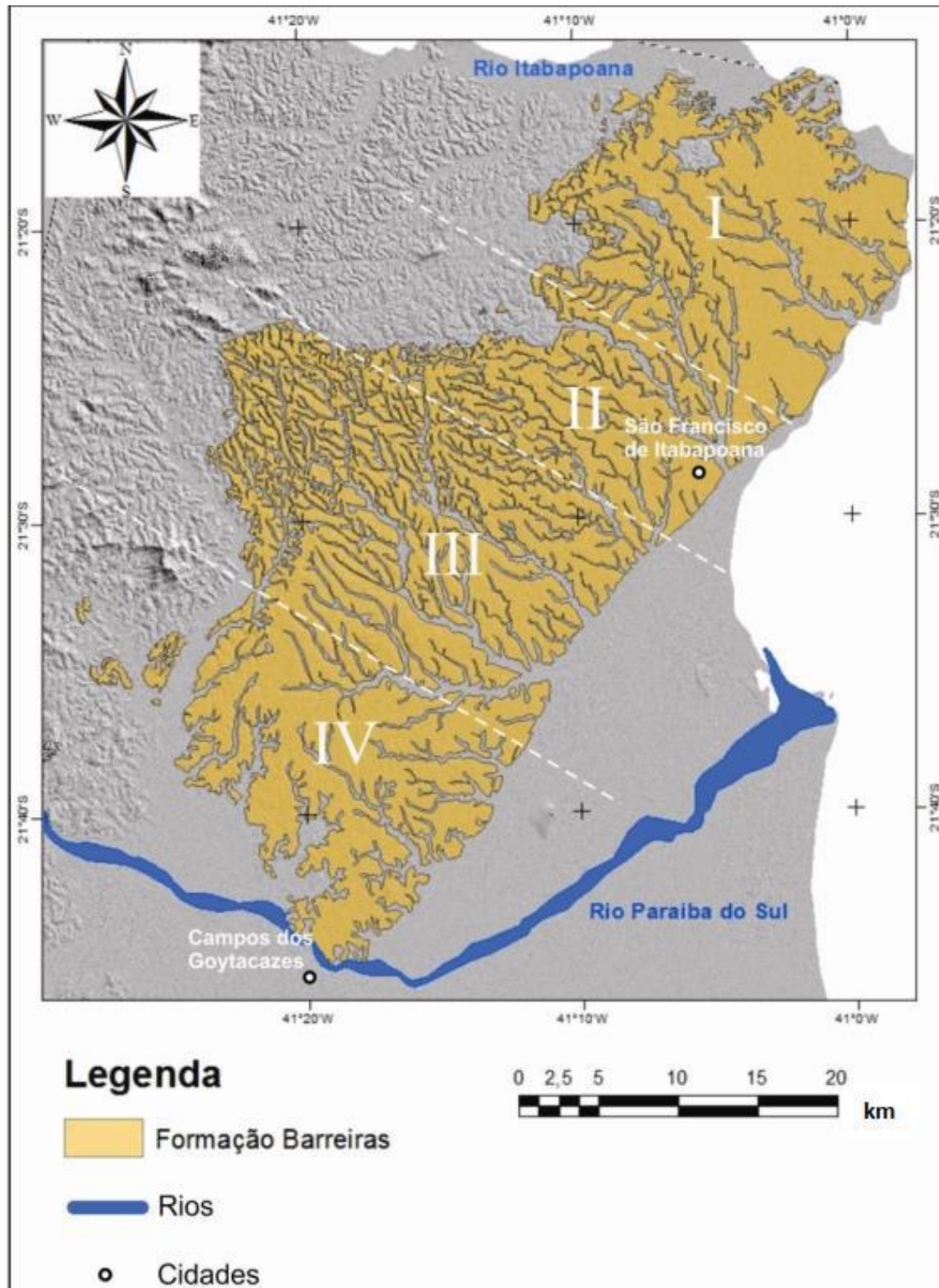
Ribeiro (2010) evidenciou que a tectônica deformadora atuou tanto na configuração dos tabuleiros costeiros quanto no arranjo da rede de drenagem sobre eles instalada, particularmente as estruturas de orientação NW-SE, relacionadas a um evento de transcorrência dextral E-W, de idade Pleistoceno-Holoceno.

Chrismann (2014) produziu um mapa da Formação Barreiras na escala 1:25.000 compreendendo a região entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana. A partir da análise desse mapa, o autor percebeu que, além da morfologia tabular predominante, havia associação com colinas mais dissecadas, onde há maior densidade de drenagem. De acordo com o estudo, há

uma grande variação no grau de dissecação fluvial ao longo da Formação Barreiras e seu valor mais alto ocorre quando está alinhada com estruturas de orientação NW-SE.

Segundo Chrismann (2014), a variação no relevo e no grau de dissecação da Formação Barreiras é indicativa da ação de eventos neotectônicos, principalmente um evento de transcorrência dextral E-W, de idade Pleistoceno-Holoceno, que seria responsável pela diferença de dissecação fluvial segundo compartimentos com orientação NW-SE (Figura 6).

Figure 6 - Compartimentação do mapa da distribuição da Formação Barreiras entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana em quatro domínios (I, II, III e IV), com base no grau de dissecação fluvial.



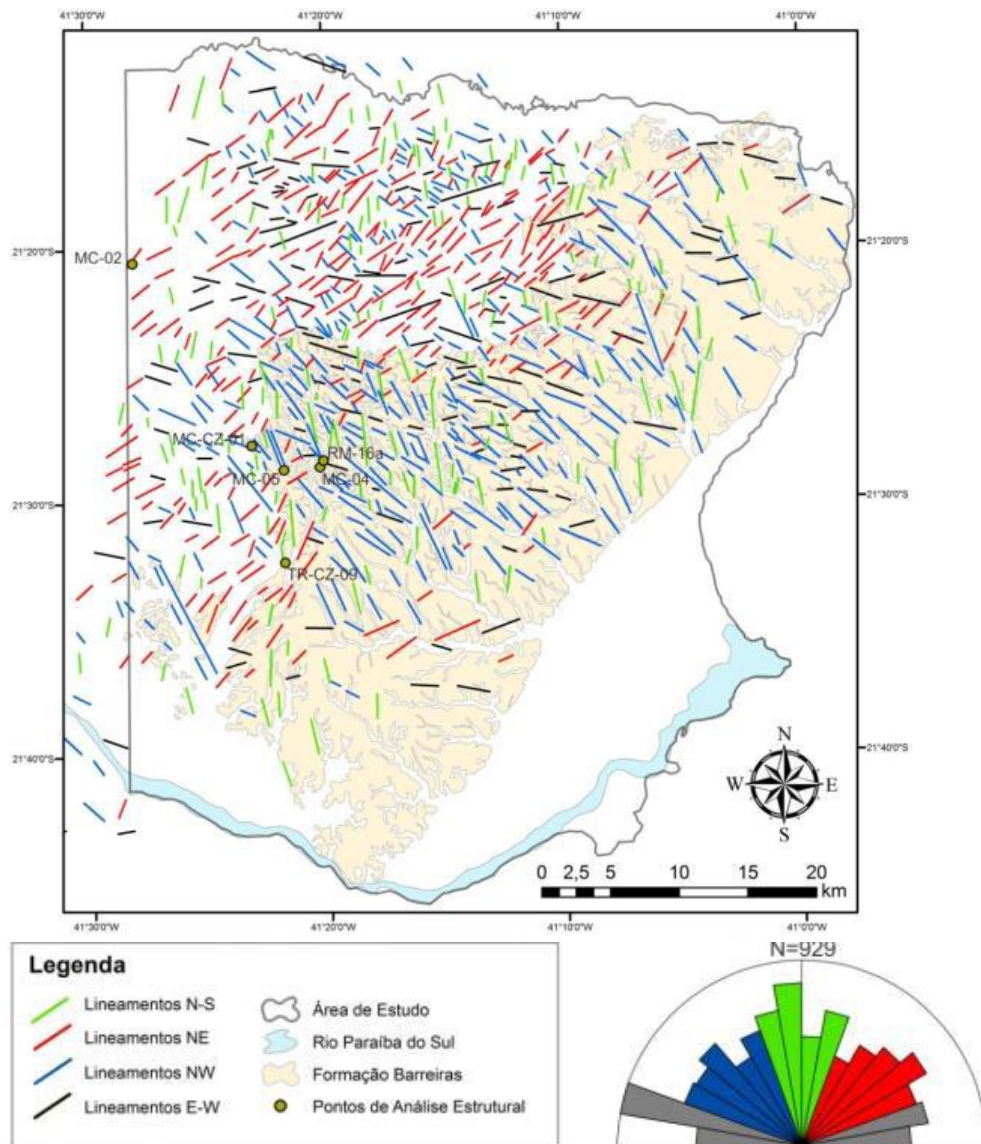
Fonte: Chrismann (2014).

Rodrigues (2015) analisou e interpretou lineamentos e dados estruturais neotectônicos na região norte do estado do Rio de Janeiro, entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana (Figura 7). Concluiu que os eventos neotectônicos tiveram influência decisiva na configuração atual dos depósitos da Formação Barreiras na região estudada. Como evidência clara do controle

estrutural, há a dissecação dos depósitos, conformados pela rede de drenagem desenvolvida nos tabuleiros.

Para Rodrigues (2015), a relação entre o mapa de lineamentos e os padrões estruturais analisados ratifica um significativo controle neotectônico, sobretudo associado à fase de transcorrência dextral E-W.

Figure 7 - Mapa de lineamentos e roseta de frequência de lineamentos na área entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana.



Fonte: Rodrigues (2015).

Os sedimentos quaternários na área de estudo, segundo Martin *et al.* (1997), são formados por: depósitos marinhos pleistocênicos (sedimentos arenosos, brancos em superfície e castanhos em profundidade, devido à impregnação por matéria orgânica) e holocênicos (areias brancas, contendo grandes quantidades de conchas e apresentando alinhamentos de cristas

praias, bem desenvolvidos na planície costeira da desembocadura do rio Paraíba do Sul); depósitos lagunares holocênicos (areias argilosas ricas em matéria orgânica e conchas de moluscos, situadas nas zonas rebaixadas separando os cordões arenosos ou nos cursos inferiores de grandes vales não preenchidos por sedimentos fluviais; sua origem pode ser associada à invasão do mar durante a última transgressão, com máximo há 5.100 anos); e depósitos continentais holocênicos (sedimentos fluviais arenosos e argilo-arenosos, bem desenvolvidos nos vales fluviais do rio Paraíba do Sul e principais afluentes).

3.3. GEOMORFOLOGIA

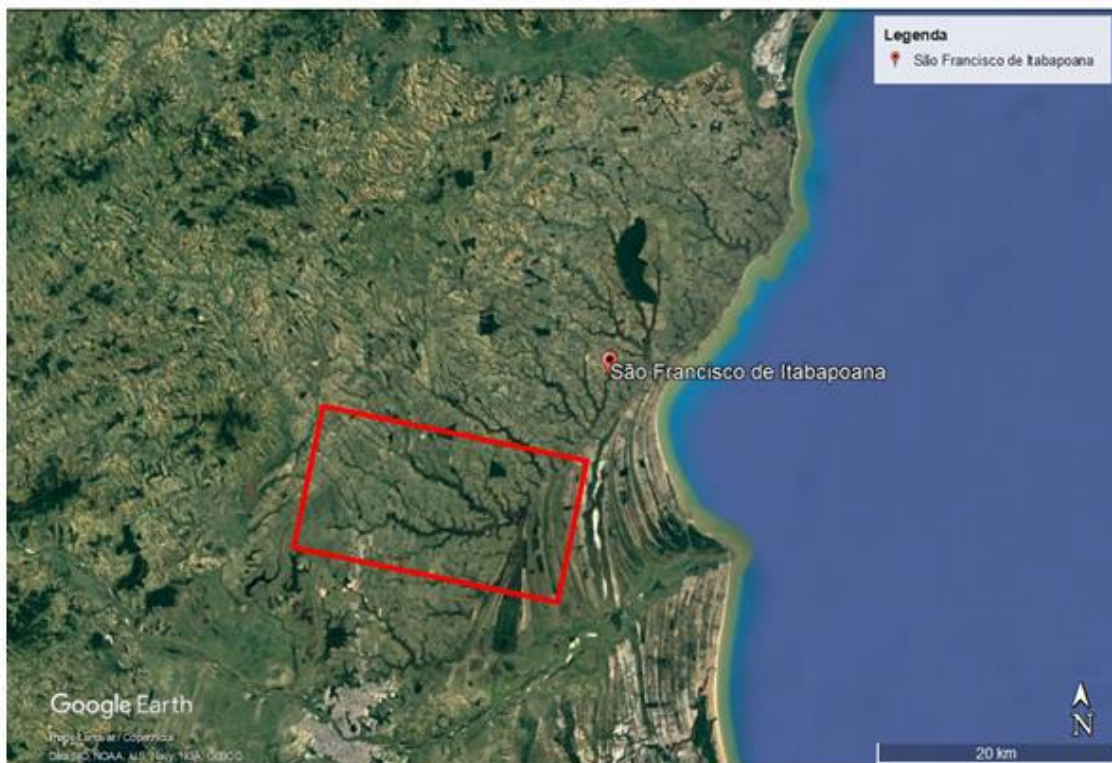
De acordo com Martín *et al.* (1997), na região entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana podem ser reconhecidas três unidades geomorfológicas, sendo elas: região serrana, platô terciário e planície quaternária. A área do presente estudo se concentra nos tabuleiros costeiros (platô terciário).

A região serrana está associada a serras e morros, que apresentam topos agudos e alto grau de dissecação, com rede hidrográfica densa e caráter dendrítico (Figura 8). A amplitude topográfica é superior a 50 metros. Essa unidade geomorfológica é associada ao embasamento pré-cambriano.

O platô terciário (tabuleiros de bacias cenozoicas) constitui um terreno plano, com colinas de topos suaves e grau de dissecação de médio a baixo. Está localizado entre a região serrana e a planície quaternária. Os tabuleiros têm amplitude topográfica entre 10 e 50 metros, sendo seu gradiente muito suave e seus topos amplos, levemente convexos a planos, cuja superfície é suavemente inclinada para o mar. O entalhamento dos vales se dá em forma “U”, e o padrão de drenagem é de paralelo a dendrítico (Figura 8). Está associado aos depósitos da Formação Barreiras e apresenta cobertura de depósitos de colúvios e alúvios.

A planície quaternária é a área mais plana e mais baixa em comparação com a região serrana e com o platô terciário. Seu desenvolvimento se deu a partir de sedimentos quaternários de contexto fluvial, costeiro, marinho e deltaico, destacando-se a ampla faixa de cordões arenosos que se associam à desembocadura do rio Paraíba do Sul e seu complexo deltaico (Figura 8).

Figure 8 - Imagem da porção setentrional do Rio de Janeiro, com um retângulo em vermelho apontando as drenagens analisadas na área de estudo, sobre os tabuleiros da Formação Barreiras.



Fonte: DigitalGlobe (2020).

Segundo o mapa de unidades geomorfológicas do estado do Rio de Janeiro (Dantas, 2001), a região onde está inserida a área de estudos é composta pelas seguintes unidades (Figura 9): Depressões interplanálticas com alinhamentos serranos escalonados, escarpas serranas, maciços costeiros e interiores, planaltos residuais, planícies costeiras, planícies flúviomarinhas (Baixadas), superfícies aplainadas nas baixadas litorâneas e tabuleiros de bacias sedimentares cenozoicas.

As depressões interplanálticas com alinhamentos serranos escalonados são compostas pelos terrenos colinosos de suave amplitude, colinas, morretes e morros, que se alternam com alinhamentos de cristas serranas de elevada amplitude com direção preferencial WSW-ENE. Essas serras representam os relevos residuais relacionados com litologias que apresentam maior resistência aos processos erosivos diferenciais ou sofreram soerguimento no decurso do movimento tectônico extensional ocasionado no final do Cretáceo e ao longo do Terciário, como consequência da abertura do oceano Atlântico e do levantamento das cadeias montanhosas das serras do Mar e da Mantiqueira. Os alinhamentos serranos possuem alta vulnerabilidade por causa das elevadas amplitudes de relevo e das vertentes íngremes relativas à esparsa cobertura florestal, concentrada apenas nos terrenos mais elevados (Dantas, 2001).

As Escarpas Serranas apresentam relevo montanhoso, excessivamente acidentado, transicional entre dois sistemas de relevo. O domínio montanhoso está localizado, em geral, no reverso da escarpa da Serra do Mar. As amplitudes topográficas ultrapassam a 500 metros e os gradientes são muito elevados. Há, eventualmente e pontualmente, relevo ondulado suave localizado nos planaltos elevados das serras do Mar e da Mantiqueira. Densidade de drenagem alta com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou rectangular (Dantas, 2001).

O Macico costeiro e interiores são formados por uma série de maciços montanhosos alinhados, não em absoluto, na direção WSW-ENE abrangendo a partir do Maciço da Juatinga ao maciço da Região dos lagos, ambos entre às baías e baixadas litorâneas. Essa unidade abrange também os maciços ou os alinhamentos serranos localizados em contrafortes da escarpa da Serra do Mar e os maciços isolados no Norte Fluminense. Asmus & Ferrari (1978) afirmam que os maciços costeiros compreendem blocos que foram soerguidos no decorrer do Cenozóico, em paralelo ao front escarpado das cadeias montanhosas das serras do Mar e da Mantiqueira. De acordo com Almeida & Carneiro (1998), os maciços costeiros são sobras de uma velha borda meridional do graben da Guanabara, no Paleoceno enteposta no Planalto, que foi severamente erodida pelo recuo da escarpa da Serra do Mar, formada junto à Falha de Santos. Apresentam densidades de drenagem altas a muito altas. O padrão de drenagem é, geralmente, dendrítico e centrífugo, podendo ser treliça (Dantas, 2001).

A unidade morfoescultural denominada planaltos residuais se consiste em terrenos montanhosos e amorreados, de amplitude de relevo elevada, localizados, em geral, no reverso das escarpas serranas. Associam-se aos terrenos mais elevados do estado do RJ, se consiste em superfícies residuais, cujo soerguimento se deu por tectônica, e que conseguiram se conservar apesar dos processos erosivos e de aplainamento atuantes durante o Cenozóico Superior. Podem estar correferidos ao encadeamento de aplainamento do relevo formados no Terciário Inferior, condizentes à Superfície de erosão Sul-Americana (King, 1956) ou ainda correlacionados ao pediplano Pd3 (Bigarella et al., 1965). Denotam vertentes de gradientes de suaves a elevados (relevo acidentado) geralmente recobertas por colúvios. A densidade de drenagem é alta e padrão dendrítico a treliça (Dantas, 2001).

A unidade morfoescultural Planícies Costeiras abrange uma sequência de feixes de restingas consequentes do apinhado de cristas de cordões litorâneos (de idade pleistocênica) formados depois da penúltima transgressão. (Martin et al., 1997) e preservados do último máximo transgressivo; ou idade holocênica, associados à planície deltaica do rio Paraíba do Sul. Possui um microrrelevo extremamente suave, cujas cristas arenosas são concomitantes entre elas e que se alternam com depressões embrejadas intercordões. Quando há

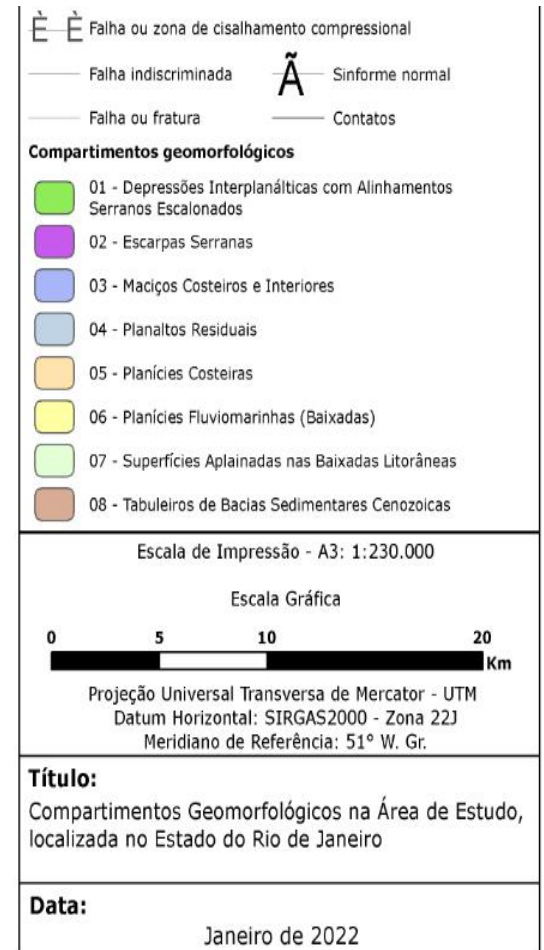
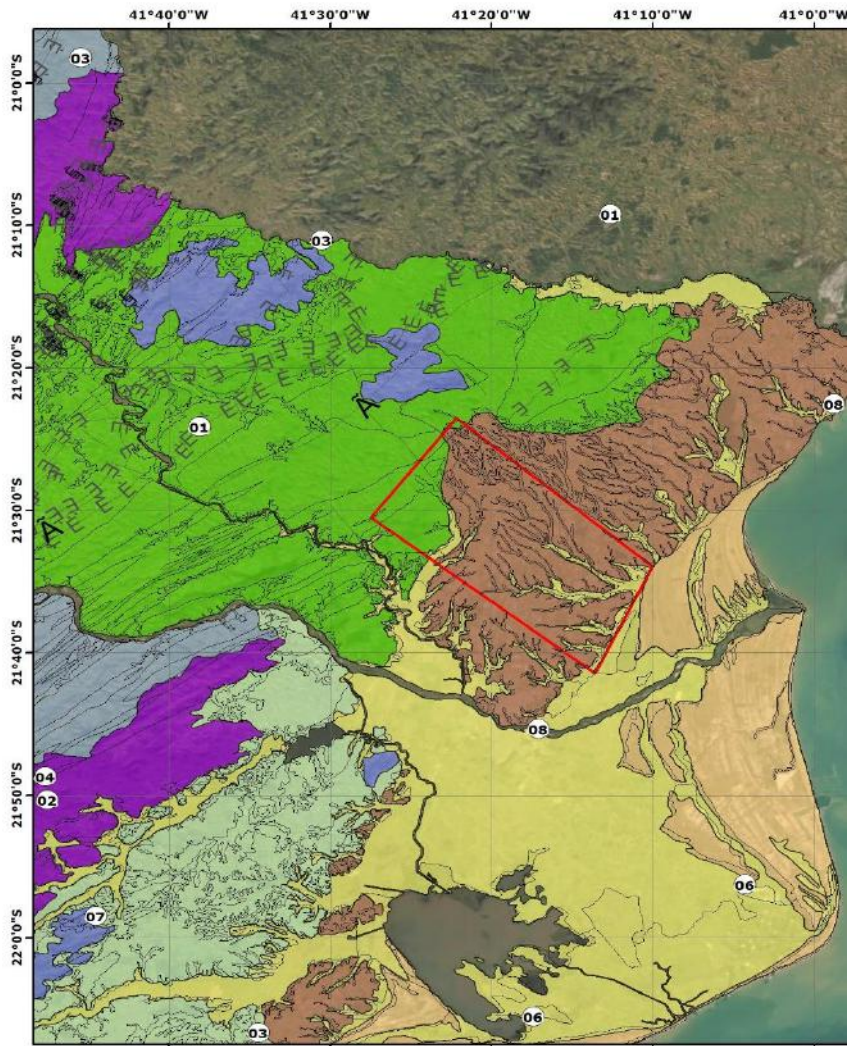
retrabalhamento no topo das cristas, resulta-se na criação de campos de dunas Janeiro (Dantas, 2001).

A unidade morfoescultural denominada flúvio-marinhas são Terrenos Argilosos Orgânicos de Fundo de Baías ou Enseadas, ou Deltas dominados por Maré. “Superfícies planas, de interface com os Sistemas Depositionais Continentais e Marinhos. Terrenos muito mal drenados com padrão de canais bastante meandantes e divagantes, sob influência de refluxo de mares” (Dantas, 2001).

A unidade morfoescultural Superfícies Aplainadas nas Baixadas abrange terrenos colinosos cuja amplitude de relevo é baixa, localizados a leste da Baía de Guanabara e compreendidos entre as planícies costeiras e baixadas fluviomarinhas e a escarpa da Serra do Mar. (Dantas, 2001)

A unidade morfoescultural Tabuleiros de Bacias Sedimentares abrange um agrupamento de tabuleiros e colinas tabulares existentes nas bacias tafrogênicas continentais que se sucedem desde o médio vale do rio Paraíba do Sul, no graben da Guanabara e até nos afloramentos do Grupo Barreiras que ocorrem no norte do estado. Em geral, uma drenagem de baixa densidade erode as superfícies tabulares tendo como consequência vales encaixados em “U”, mas quando se aproxima do contato com o substrato pré-cambriano, a densidade da drenagem se intensifica e, como consequência, pode gerar colinas tabulares. Nas regiões continentais, os tabuleiros sobre as depressões tectônicas estão congruentes a amplas planícies fluviais, em contrapartida os costeiros estão coerentes a feições singulares. Possui uma densidade de drenagem muito baixa com padrão paralelo a dendrítico. (Dantas, 2001)

Figura 9 - Mapa de unidades geomorfológicas da área de estudo (polígono em vermelho aponta a área investigada). Modificado do Mapa de Unidades Geomorfológicas do Estado do Rio de Janeiro de Dantas (2001)



7

Fonte: a autora (2022)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo proposto neste estudo, dividiu-se a metodologia nas seguintes etapas principais: levantamento bibliográfico e aquisição de modelo digital de elevação; definição de critérios para a delimitação da rede de drenagem; e posterior comparação com a interpretação das drenagens a partir de um mosaico de imagens de satélite.

No programa ArcGIS 10.4.1 (CROSIER *et al.*, 2005) foram utilizadas as ferramentas *Spatial Analyst*>*Conditional*>CON e *Spatial Analyst_Hidrology*. Em primeiro lugar, foi aplicado um condicional (CON) no *raster* para a eliminação dos valores anômalos (menores que 1 e maiores que 37800). Em seguida foi aplicado o *Fill* (filtro), *Flow Direction* (direção do fluxo), *Flow Accumulation* (fluxo acumulado), *Basin* (bacia), *Flow Length_Downstream* (comprimento do fluxo), *Stream Order_Straler* (ordem dos canais), *Stream to Feature* (conversão *raster-shapefile*).

Posteriormente, no *raster Stream Order* gerado, foi aplicado um condicional (*value > 5*) para retirar o excesso de informações e melhorar a visualização, em seguida este *raster* foi convertido para *shapefile*. O *shapefile* gerado foi localmente editado usando-se a imagem *Landsat* para a delimitação das duas margens dos maiores rios. Em seguida aplicou-se o *Basin* (bacia) onde foram delimitadas as bacias hidrográficas. Por fim, o *raster basin* foi convertido para *shapefile*.

4.1. MATERIAIS

O modelo digital (MDE) selecionado para o estudo foi elaborado pelo IBGE na escala 1:25.000 (IBGE *online* acesso 20/10/2019). O modelo está disponível para *download* no sítio eletrônico do órgão, nos formatos GeoTIFF e ASCII, sendo analisada a área correspondente a duas bacias de drenagem sobre os tabuleiros da Formação Barreiras na região norte Fluminense, entre o rio Itabapoana (divisa com o Espírito Santo) e o rio Paraíba do Sul.

Inicialmente, foi realizado o *download* do MDE, sendo adquiridos os *raster* 26502SE, 26502SO, 26503SE, 26503SO, 26504NO, 26504SE, 26504SO, 26513NO, 26513SO, 26824NE, 26824SO, 26824NO, 26824SE, 26851SE, 26851NO, 26851SO, 26852NE, 26852NO, 26852SO. Tais *raster* abrangem a região norte fluminense entre o rio Itabapoana (divisa com o Espírito Santo) até o rio Paraíba do Sul. Comparou-se também com o vetor de drenagem da carta 1:25.000 que acompanha o MDE 1:25.000 do IBGE, em formato *shapefile*.

Posteriormente, utilizou-se o programa ArcGIS 10.4.1 para a construção de um mosaico a partir do MDE. O MDE utilizado neste trabalho foi extraído do IBGE, que oferece dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS) na internet. Além das derivações básicas, o IBGE oferece aos usuários um modelo refinado do MDE, com resolução espacial de 30 m (Valeriano & Rosseti, 2008). Então, fez-se o recorte da área de interesse, mantendo apenas a área ocupada pela Formação Barreiras, usando os limites interpretados por Chrismann (2014).

Depois, como o dado do IBGE é construído na projeção SIRGAS 2000, foi transformada a projeção para o Sistema de Coordenadas Geográficas/WGS1984, de modo a facilitar a integração com os demais dados que se encontram nesses parâmetros, usando os comandos em *ArcToolbox: Projections and Transformation/Define Projection*.

A partir de imagens de satélites obtidas dos *softwares/sites Google Earth* e Terra Incógnita, a rede de drenagem foi interpretada, sempre sendo utilizadas imagens em resolução adequada para fotointerpretação em escala 1:25.000, usada para produzir a rede de drenagem automaticamente.

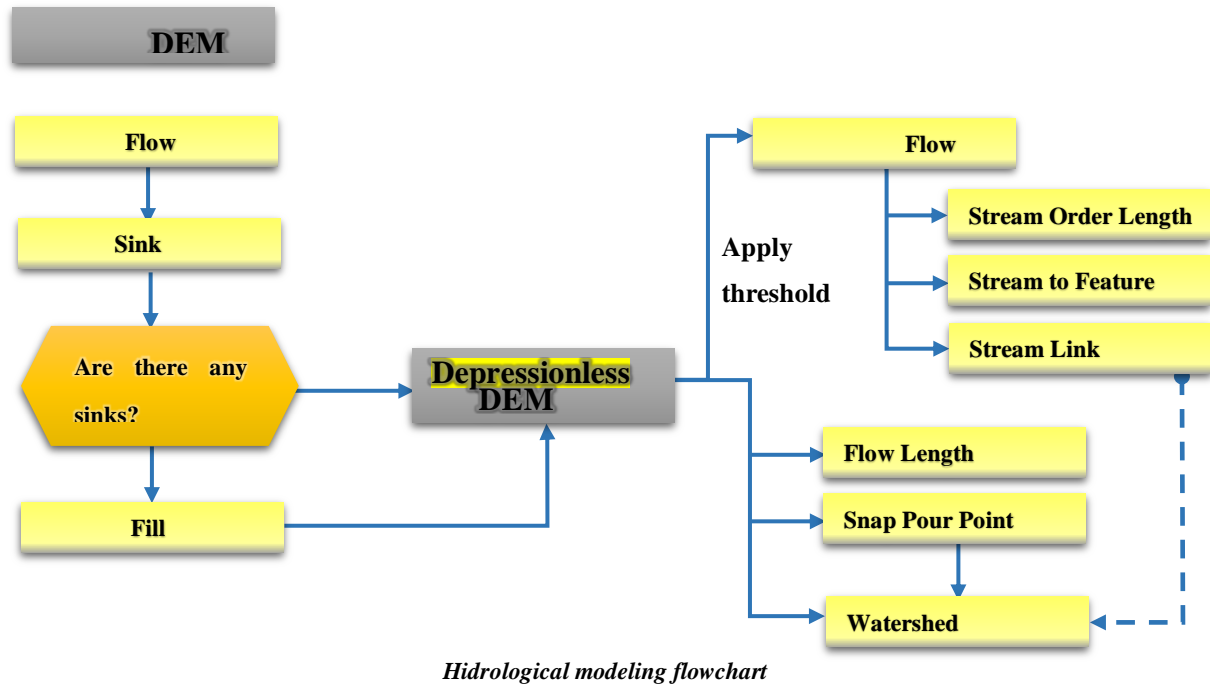
4.2. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE DRENAGEM À PARTIR DO MDE

No ArcGIS, foram realizados os procedimentos ilustrados no fluxograma da Figura 11. A partir do MDE, foi gerada a direção do fluxo (*flow direction*), com o preenchimento de depressões (*fill sinks*) para corrigir pequenas imperfeições e remover os *sinks* do *raster* de superfície. O comprimento do fluxo (*flow length*) é o comprimento de projeção horizontal da maior distância da superfície de um ponto na superfície até o início (ou fim) do fluxo ao longo da direção do fluxo. A ferramenta Ponto de Fluidez Instantâneo (*Snap Pour Point*) é usada para garantir a seleção de pontos de alta vazão acumulada ao delinear bacias de drenagem usando a ferramenta Bacias Hidrográficas (*Watershed*). A ferramenta Acumulação de Fluxo (*Flow Accumulation*) calcula o fluxo acumulado como o peso acumulado de todas as células que fluem para cada célula de declive no *raster* de saída.

A Ordem do Fluxo (*Stream Order*) é um aspecto importante para uma bacia de drenagem, sendo definida como a medida da posição de um fluxo na hierarquia de fluxos. A ferramenta *Stream to Feature* transforma os *pixels* (ou células) selecionados como pertencendo a drenagem em uma cadeia de linhas (polilinhas), uma representação vetorial das drenagens. A

ferramenta *Stream Link* ordena estas células, usando a direção de fluxo representada pelo *Direction Coding* (Figura 10)

Figura 10 - Fluxograma de modelagem hidrológica.



Hidrological modeling flowchart

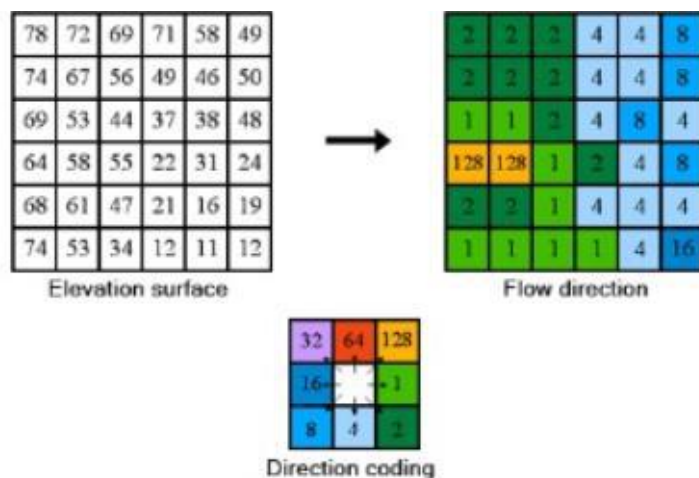
Fonte: Alves et al. (2010).

Pelo comando *Flow direction* foi gerado um *raster* que, a partir de uma superfície de entrada (o Modelo Digital de Elevação já corrigido pela ferramenta *sink*), determina a direção do fluxo de todas as células da varredura (Figura 12). Esta etapa visa obter a direção do fluxo a partir de cada célula da grade MDE. A direção de fluxo é necessária em estudos hidrológicos para determinar os caminhos de água, sedimentos e movimento de contaminantes, sendo útil ainda na delimitação da área de contribuição de curso d'água (Tarboton, 1997).

As possíveis direções do fluxo recebem uma codificação, conforme apresentado na Figura 11.

Figure 11 - Direção de fluxo (*flow direction*). A primeira imagem (*elevation surface*) representa a superfície de elevação; a segunda ilustra a direção do fluxo (*flow direction*); e a terceira *Direction coding* indica

para onde o fluxo escoará: é uma codificação usada para distinguir as oito direções de fluxo possíveis no método D8.



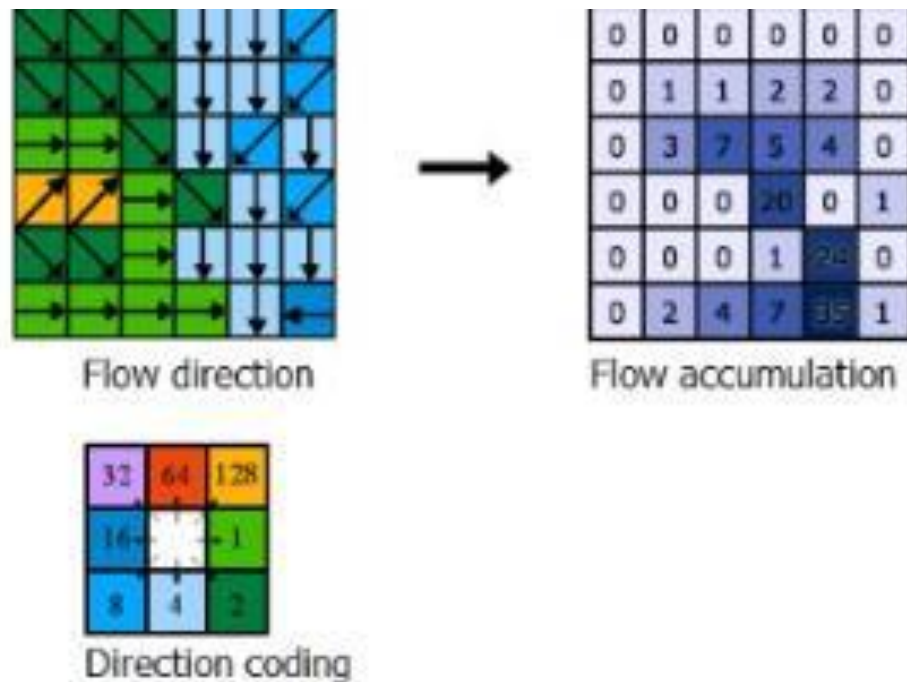
Fonte: Alves et al. (2010).

Posteriormente, com a ferramenta Acumulação de Fluxo (*flow accumulation*), determinou-se o fluxo acumulado, que é um parâmetro que indica o grau de confluência do escoamento (Alves *et al.*, 2010). A grade de fluxo acumulado é gerada a partir da grade de direção de fluxo. Trata-se de uma representação da contribuição de escoamento de cada célula da grade para a célula vizinha que apresentar maior declividade. Caso não seja aplicado nenhum fator de ponderação, o valor apresentado por cada célula da grade corresponde ao número total de células que fluem para cada célula (Esri, 2016).

O fluxo acumulado, também designado de área de captação, tem aquisição complexa, manual ou computacional, visto que agrupa as propriedades do comprimento de rampa (conexão com divisores de água à montante) e também a curvatura horizontal. O modelo da acumulação de fluxo (*flow accumulation*), a partir do acúmulo de um certo número de células que contribuem para o resultado de determinada célula, será analisado na definição do que será considerado drenagem (Figura 12).

Esse procedimento é a geração de uma grade, a partir da direção do fluxo, contendo valores que indicam a acumulação do fluxo, ou seja, número de *pixels* direcionados para cada *pixel* da grade. Assim, determinou-se os *pixels* da grade de fluxo acumulado que continham valores de fluxo maiores do que 511, valor obtido empiricamente como o que melhor se compara à drenagem interpretada a partir da imagem de satélite usada. Comparou-se também com o vetor de drenagem da carta 1:25.000 que acompanha o MDE do IBGE, em formato *shapefile*.

Figura 12 – Modelo de Fluxo Acumulado. A primeira imagem ilustra a direção do fluxo (*flow direction*); a segunda (*Flow accumulation*) calcula o fluxo acumulado como o peso acumulado de todas as células que fluem para cada célula de declive na taxa de saída e a terceira (*Direction coding*) indica para onde o fluxo escoará.

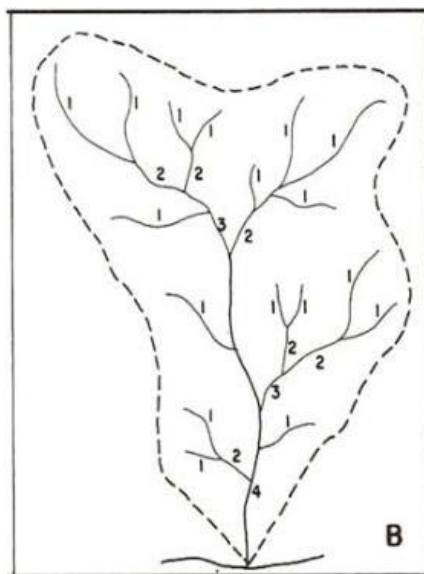


Fonte: Alves et al. (2010).

Foi gerado um *raster* binário, onde um *pixel* pertence (1) ou não (0) a uma drenagem. Esse formato *raster* é utilizado para se ordenar e hierarquizar as drenagens, e posteriormente as bacias a partir da ferramenta *Stream Order*.

Essa ferramenta aplica de forma automatizada o método de Strahler (1952, Figura 13), no qual os canais menores sem tributários são considerados de primeira ordem; os canais de segunda ordem são aqueles que estão na confluência de dois canais de primeira ordem e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem são os que estão na confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens; os canais de quarta ordem são os que estão na confluência de canais de terceira ordem, podendo receber tributários de ordens inferiores; e assim sucessivamente (Monteiro, 2015). O número de ordem estabelecido indica os graus de relevância dos canais de uma bacia.

Figure 13 - Hierarquização de drenagem proposta por Strahler.



Fonte: Monteiro (2012).

Na função *Basin*, a partir do processamento do mapa de direção de fluxo e fluxo acumulado, delimita-se as bacias maiores. A rotina *Watershed* é usada para a delimitação de sub-bacias. O valor da área de cada bacia hidrográfica gerada corresponde à quantidade de células que são processadas. O *raster* binário, aquele onde um *pixel* pertence (1) ou não (0) a uma drenagem, foi convertido para o formato vetorial, através da função *Raster to Features* da extensão *Spatial Analyst*, para ser comparado à rede de drenagem fotointerpretada.

Realizou-se uma conversão para vetores das feições de drenagem e divisores de água, para então serem utilizadas em análises do terreno cujo objetivo é a delimitação de zonas homólogas para fins de mapeamento geológico, geomorfológico e pedológico (Alves *et. al.*, 2010).

4.3. ANÁLISE COMPARATIVA COM A INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS

Fez-se uma análise visual comparativa entre os vetores da rede de drenagem extraída de forma automática e a rede de drenagem fotointerpretada nas imagens de satélites obtidas do *Google Earth* e do Terra Incógnita. Tomando essa fotointerpretação, em formato vetorial, foram analisadas as discrepâncias entre as duas formas de se obter a drenagem (fotointerpretação e extração automática do MDE).

Trechos de drenagens coincidentes em ambos os modos de obtenção, com erro máximo de 5 metros, foram classificadas como OK. Em seguida, mediu-se (em metros) a extensão de cada um desses segmentos.

Depois gerou-se um mapa de declividade em graus para se verificar em qual declividade predominante está cada tipo de erro e as conformidades. Posteriormente, fez-se uma estatística de declividade *versus* erro para se constatar como estão relacionados.

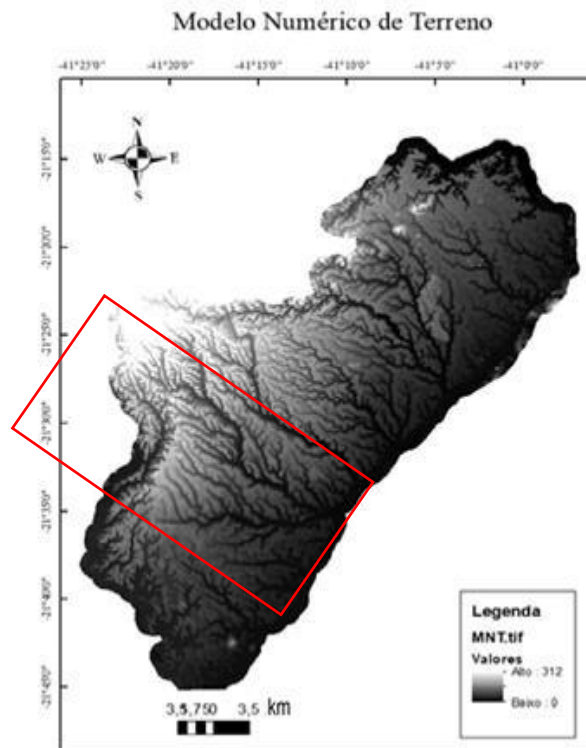
Além disso, foram observados os elementos básicos de interpretação como: forma, tamanho, padrão, tom, textura, sombras, localização, associação e resolução.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo numérico de terreno (MNT) da área investigada no presente estudo é apresentado na Figura 14, sendo a base para as análises realizadas, entre as quais a construção de um mapa de declividade (Figura 15). Os MNT gerados a partir de dados do SRTM geralmente apresentam falhas, depressões no relevo. Cabe acrescentar que isso não cabe a relevos de regiões cársticas. As depressões são acatadas como erros por padrão, pois são morfologias raras no relevo real, entretanto comuns no interpolador devido aos erros sistêmico do processo. Essas depressões interferem de modo direto nos estudos de escoamento superficial na bacia hidrográfica, por atraírem o escoamento superficial. Para correção dessas falhas, utilizou-se o *Fill Sinks*. Esta função corrigiu o MNT, considerando as altitudes dos *pixels* vizinhos para preencher os *sinks*, suavizando a consistência no mapa do MDE.

Figura 14 – Mapa da declividade.

Figura 15: Modelo numérico de terreno para a área de estudo com tratamento dos dados pela Função Fill.

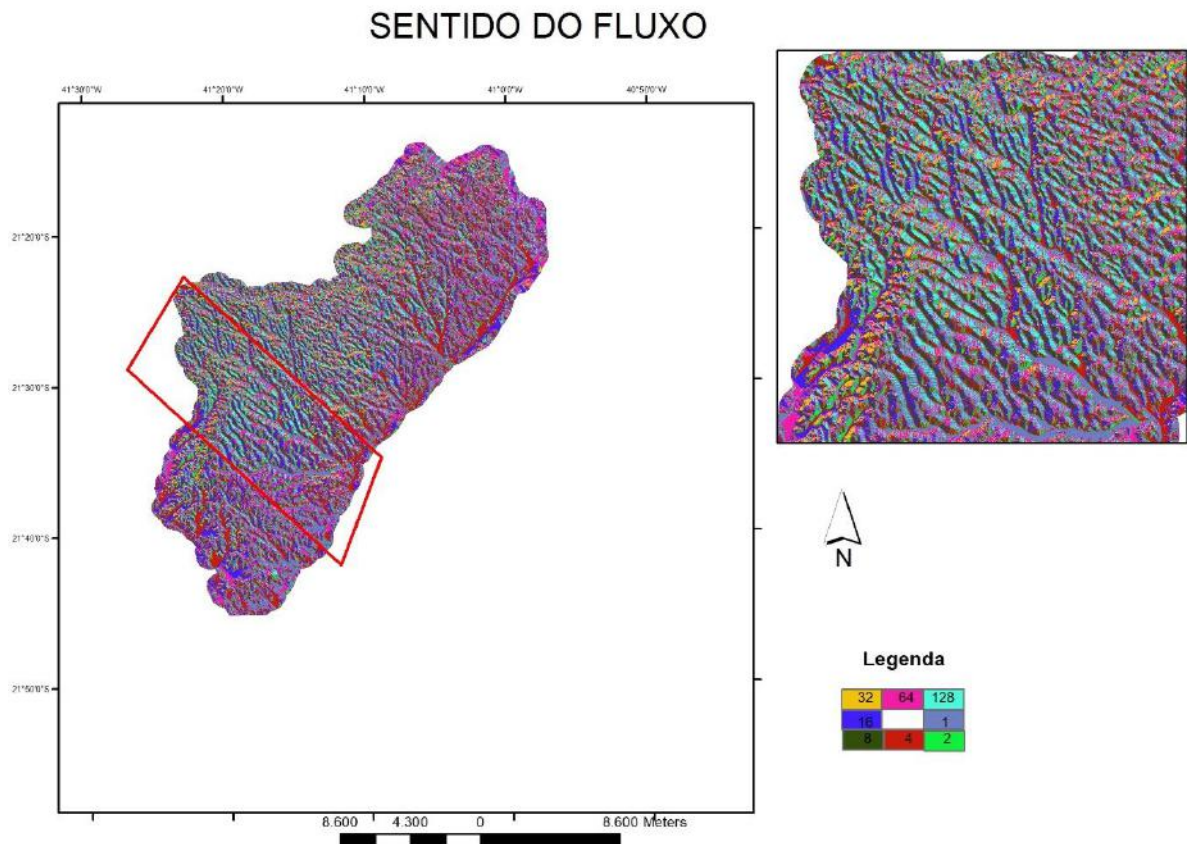


Fonte: a autora e foto Google Earth (2022).

Percebeu-se que as porções da área investigada que possuem um relevo mais acidentado, com maiores declividades, apresentam canais de drenagem mais bem definidos, de modo que o processo de extração executado gerou drenagens bastante semelhantes, apresentando maior correspondência com a drenagem de referência. O mesmo não ocorre em regiões mais planas, em que ocorrem diferenças significativas entre a drenagem de referência e aquelas geradas a partir dos MDE.

Após as correções do MNT, analisou-se o escoamento superficial a partir da definição do sentido do fluxo (Figura 16), bem como o cálculo do acúmulo do fluxo (Figura 17), utilizando as ferramentas Flow direction e Flow accumulation. A direção de fluxo está relacionada com a variedade de pontos dentro de uma bacia hidrográfica e às várias relações hidrológicas estabelecidas entre esses pontos.

Figura 16 – Mapa de sentido do fluxo.



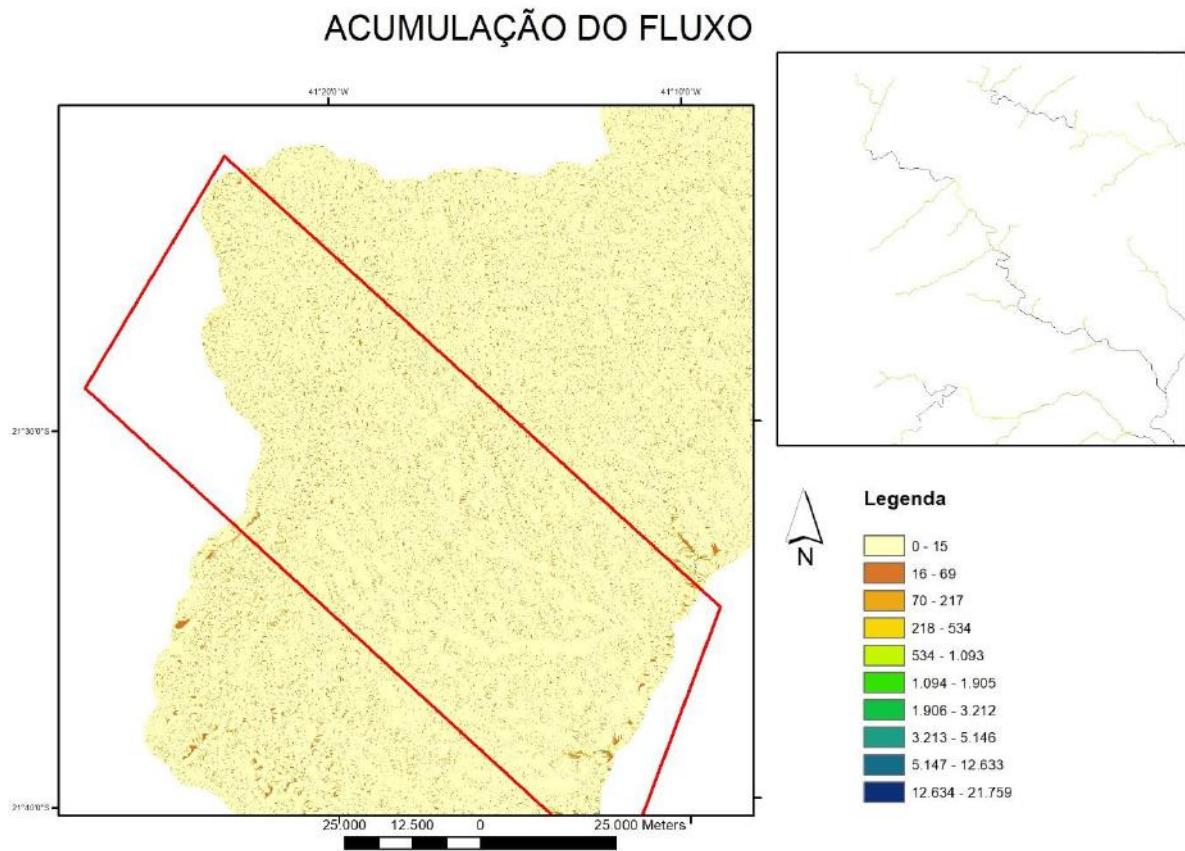
Fonte: a autora (2022)

A figura 17 apresenta o sentido de fluxo de água, onde é possível a observação da direção do escoamento de água nas vertentes. A direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir.

Ao correlacionar o mapa com a compartimentação proposta por Chrismann (2014), percebe-se que nos domínios III e II o sentido predominante é a leste e nordeste. Enquanto nos domínios I e IV, predominam o sentido norte.

Após a determinação do sentido do fluxo (Figura 17) e do fluxo acumulado (Figura 18) foi possível a extração automatizada da rede de drenagem a partir do MDE (Figura 19), e em seguida a delimitação da bacia hidrográfica representada na figura 20.

Figura 17 – Mapa da acumulação de fluxo



Fonte: a autora (2022).

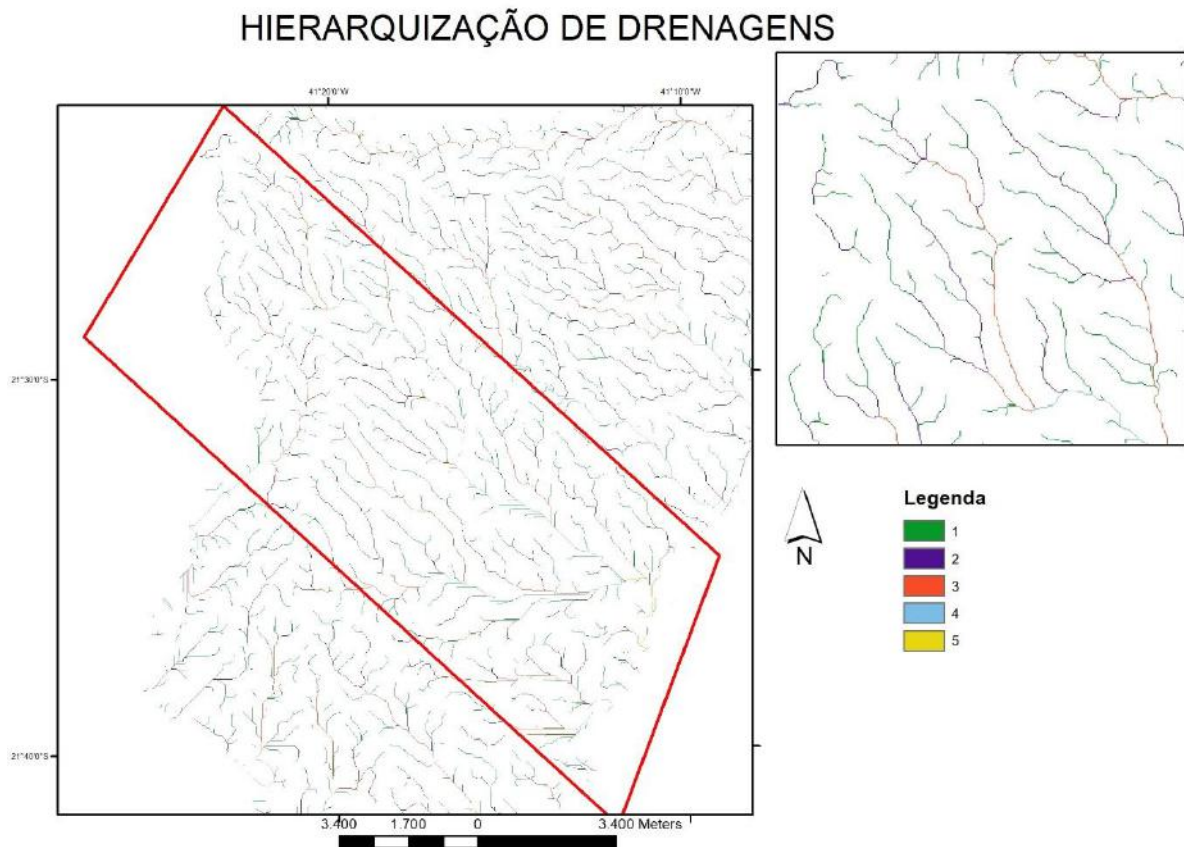
O fluxo acumulado representa a rede hidrográfica, sendo possível montar nova grade contendo os valores de acúmulo de água em cada pixel. Desse modo, cada pixel recebe um valor correspondente ao número de pixels que contribuem para que a água chegue até ele.

A delimitação e hierarquização da rede de drenagem é de grande importância para a análise espacial de uma bacia hidrográfica (figura 18). Há alguns procedimentos para deduzir o traçado das drenagens de um MNT, até mesmo se o fluxo da drenagem é permanente ou intermitente. Para este trabalho utilizamos a *set null* (definir nulo).

Estipulou-se uma categoria aos valores das células de uma camada de entrada. O “value” < 2000 melhor satisfaz a condição para a célula ter seu o valor anulado.

Os resultados adquiridos a partir do MDE de 20 m foram, em geral, compatíveis com bases cartográficas na escala 1:25.000. Foi possível extrair a rede de drenagem das bacias com grande riqueza de detalhes mesmo para os rios de menor ordem e comprimento, que eram os mais presentes nas áreas estudadas.

Figura 18 – Hierarquização da drenagem extraída automaticamente.



Fonte: a autora (2022).

A delimitação automática de bacias se mostrou muito coerente com as imagens de satélite, não apresentando erros relevantes.

Figura 20 – Delimitação automática de bacias.



Fonte: a autora e Google Earth (2022).

A delimitação automática de Bacias Hidrográficas apresentou resultados satisfatórios de forma rápida e próxima da realidade. Estudo ideal para análises rápidas de maneira remota.

Fez-se a comparação entre a rede de drenagem obtida automaticamente com um mosaico de modelos digitais de elevação (MDE) disponibilizado pelo IBGE, de escala 1:25.000 e as imagens de satélites.

Foram analisadas 94.120 metros de drenagens. De drenagens adequadas, as geradas automaticamente que coincidem com a drenagem interpretada na imagem de satélite, foram encontrados mais de 30.000 metros, o que corresponde a 31,87% (figura 20).

Figura 20 – Drenagem adequada na drenagem.



Fonte: a autora com imagens do Google Earth (2022).

Foram encontradas diversas discrepâncias entre as imagens de satélite e a o *shape* gerado pela extração automática de drenagem. Na tabela de atributos, separou-se os erros em:

- corpos d'água - quando se gerou mais de uma drenagem reta paralela para indicar corpos d'água. Desse tipo de erro, foram encontrados aproximadamente 15.340 metros o que correponde a 16,30% (figura 20)

Figura 21 – Erro de drenagem em corpos d'água.



Fonte: a autora (2022).

- inexistente - drenagem gerada não existe na imagem de satélite. Nesse tipo de erro, foram encontrados 2.335 metros de drenagens não existentes, o que corresponde a 2,48% do total; (figura 22, 23 e 24)

Figura 22 – Uma drenagem de primeira ordem inexistente na drenagem.



Fonte: a autora (2022).

Figura 23: Duas drenagens de primeira ordem inexistentes na drenagem.



Fonte: a autora (2022).

Figura 24 – Drenagem passando em construções de casas.



Fonte: a autora e foto Google Earth (2022).

- mal posicionada - curso da drenagem extraída não segue o curso da drenagem da imagem de satélite. Nesse tipo de erro foram encontrados aproximadamente 5.154 metros, o que corresponde a 5,47%; (figura 25)

Figura 25 – Drenagens mal posicionadas



Fonte: a autora e foto Google Earth (2022).

- menor - drenagem gerada menor do que a drenagem interpretada nas imagens de satélites. Foram encontrados aproximadamente 2.425 metros desse tipo de erro, o que corresponde a 2,58% do valor total de drenagens analisadas; (figura 26)

Figura 26 – Drenagens menores do que as vistas pelas imagens de satélite



Fonte: a autora e foto Google Earth (2022).

- maior - drenagem gerada maior do que a drenagem interpretada nas imagens de satélites. Desse tipo de erro foram encontrados aproximadamente 19.552 metros, o que corresponde a 20,82%; (figura 27)

Figura 27 – Drenagem extraída automaticamente maior do que a observada em imagem de satélite.



Fonte: a autora e foto Google Earth (2022).

- pixelado (“quadrados”) - drenagem gerada forma quadrados enquanto a drenagem das imagens de satélite seguia linearmente. Desse tipo de erro, foram encontrados aproximadamente 19.314 metros, o que corresponde a 20,54% (Figura 28).

Figura 28 – Quadrados formados na extração automática na drenagem.



Fonte: a autora e foto Google Earth (2022)

Segue gráfico (figura 29) que mostra o percentual de cada drenagem encontrada. Pelo gráfico, percebe-se que houve apenas 21% de drenagens adequadas, enquanto somando todos os erros chega-se a 79%.

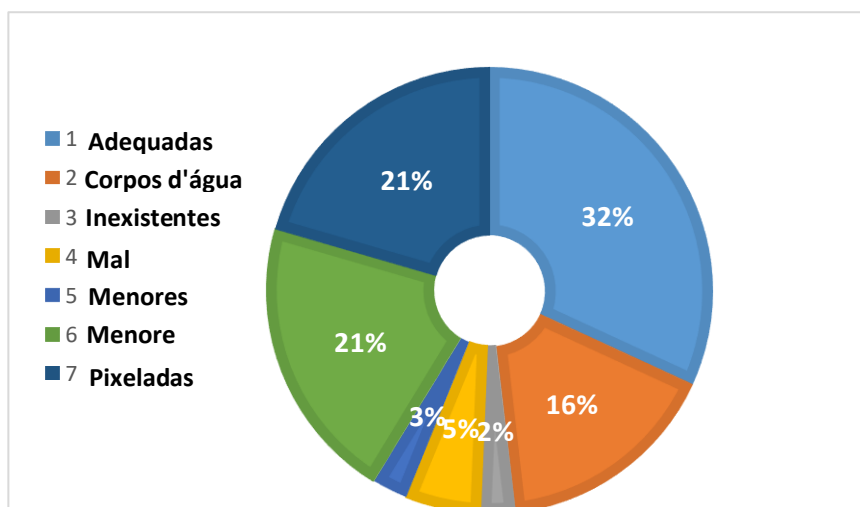


Figura 29 – Fonte: a autora (2022)

Os erros “maior”, “menor” e “mal posicionada” estão relacionados à diferença de resolução, pois o MDE do IBGE é de 20 metros enquanto as imagens de satélites chegam a 5 metros. Os erros de “pixelado” e de “corpos d’água” já não estão relacionados à diferença de resolução, mas relacionados à declividade.

Os resultados apontam que, apesar dessas diferenças entre as drenagens extraídas automaticamente e as observadas nas imagens de satélites, as linhas de drenagens resultantes foram muito semelhantes. Devem-se, portanto, ser consideradas as características geomorfológicas da bacia de interesse, pois afetam distintamente o desempenho dos algoritmos. Percebeu-se que os erros ocorreram em lugares de baixa declividade, em locais de acumulação

de água. Em geral, em relevos mais acidentados, a extração automática se mostrou mais favorável. Já em relevos mais planos, a extração automática foi menos eficiente.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a extração de drenagem a partir do MDE, com 20 metros de resolução espacial, com uso da ferramenta de análise hidrológica (*Hidrology*) executada utilizando o ArcGIS versão 10.3. A rede de drenagem extraída automaticamente foi comparada com a rede de drenagem das imagens de satélites extraídas do *Google Earth* de um recorte da Formação Barreiras na região norte Fluminense com resolução de 5 metros.

A ferramenta *Hidrology* não apresentou uma rede de drenagem com uma boa correspondência com a drenagem original, apresentando alguns erros nas regiões mais planas. Como a região é predominantemente plana, então os erros superaram os acertos.

As drenagens inexistentes aconteceram porque a metodologia de definição da origem da drenagem da ferramenta *Hidrology* tem como fundamento básico o estabelecimento de um valor limite para a grade do fluxo acumulado, descuidando do fato de que muitos cursos d'água têm sua origem em nascentes e sua localização não apresenta associação direta com a área de drenagem superficial.

A partir dos dados topográficos foi plausível a extração automática de redes de drenagem coerente a olho nu na maior parte da área, mas ainda são necessárias análises de outros aspectos e a correção manual que atenuem os erros como, por exemplo, de densidade de drenagem.

Constatou-se que a filtragem do MDE melhorou significativamente as redes extraídas em relevos planos, mas também pode favorecer a geração de segmentos não existentes.

O limiar definido do valor de área de captação influi diretamente nos resultados das redes geradas, produzindo redes mais generalizadas com limiares maiores e mais complexas com limiares menores.

A estratificação do processo em diferentes limiares mostrou-se um cuidado fundamental para acolher os diferentes efeitos devido às variações locais de relevo.

Os parâmetros hidrográficos escolhidos nesta pesquisa (comprimento total dos canais de drenagem, número de canais, ordem de drenagem, densidade de drenagem, densidade de canais e área da bacia hidrográfica), calculados para cada base de dados utilizando as ferramentas, demonstram-se eficazes para o cálculo desses parâmetros em médias e grandes bacias, situações

em que a vetorização manual é inviável e a escala de trabalho requer generalizações cartográficas o que, por natureza, implica em imprecisão posicional da rede de drenagem.

Apesar da eficiência do processo automático de extração de drenagem, recomenda-se a inspeção visual e edição manual da drenagem gerada, a fim de eliminar as linhas de drenagem em locais em que elas são inexistentes ou irregulares.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, O. A.; PAES, E. **The Pirabas Formation (Early Miocene From Brazil) And The Tropical Western Central Atlantic Subprovince.** Bol. Mus. Para. Emilio Goeldi Ciências da Terra, 7: 29 – 45. 2012.

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM.** Engenharia Agrícola, v.30, p.46-57, 2010.

ALVES, T.S., OLIVEIRA, P.T.S., RODRIGUES, D.B.B. AYRES, F.M. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, 2010.

AMORIM, K. B. **Paleoambiente, Paleogeografia e Isótopos de Carbono e Oxigênio de Depósitos Carbonáticos Miocenos da Plataforma Bragantina, Nordeste do Estado do Pará.** Tese Doutorado Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica – UFPA, Belém. 2016.

ARAI, M. **A grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do grupo barreiras.** Geologia USP. Série Científica, 6(2), 1-6. 2006.

ARAI, M., UESUGUI, N., ROSSETTI, D.F., Góes, A.M. **Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará.** Proceeding 35 Congresso Brasileiro de Geologia, 2. Belém, Brazil, pp. 738–752. 1988.

BAND, L.E. **Topographic partition of watershed with digital elevation models.** Water Resource Research, Washington, v.22, n.1, p.15-24, 1986.

BRASIL. **Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.** Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Folha SD 24/25. Aracaju/Recife: Rio de Janeiro. 1983, 856 p. 30 v.

CESERO, P. de; PONTE, F. C. **Análise comparativa da paleogeologia dos litorais atlânticos brasileiro e africano.** Rio de Janeiro, Boletim de Geociências, v. 11, p. 1- 18, 1997.

CHRISMANN, J.V.V. **Mapeamento da formação barreiras na região norte fluminense, entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana.** UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Ed. Universidade, 1974. 149p.

_____. **Análise morfométrica das bacias hidrográficas do planalto de Poços de Caldas (MG).** Livre - Docência, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, 215 p., 1970.

COSTA J.B.S., BERMEGUY R.L., HASUI Y., BORGES M.S. **Tectonics and paleogeography along the Amazonas river.** Journal of South American Earth Sciences, 14:335-347. 2001.

COSTA JÚNIOR, M. P. **Interações morfo-pedogenéticas nos sedimentos do Grupo Barreiras e nos leques aluviais pleistocênicos no litoral norte da Bahia** – município de Conde. Tese (Doutorado em Geologia Costeira e Sedimentar) – Universidade Federal da Bahia, Salvador. 247f. 2008.

COX, R. T.; ARSDALE, R. B. V.; HARRIS, J. B. **Identification of possible Quaternary deformation in the northeastern Mississippi Embayment using quantitative geomorphic analysis of drainage-basin asymmetry.** Geological Society of America Bulletin, 113(5): 615-624, 2001.

COX, R.T. **Analysis of drainage and basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics:** an example from the Mississippi Embayment. GSA Bull, v. 106, n. 5, p. 571–581, 1994.

CRAME J.A. & ROSEN B.R. **Cenozoic palaeogeography and the rise of modern biodiversity Patterns.** In: Crame J.A. & Owen A.W. (eds.) 2002. Palaeobiogeography and Biodiversity Change: the Ordovician and Mesozoic-Cenozoic Radiations. London, Geological Society, Special Publications, 194:153-168. 2002.

CROSIER, S.; BOOTH, B.; DALTON, K.; MITCHELL, A.; CLARCK, K. **Getting Started with ARCGIS 9.** United States, ESRI, 2005.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **An overview of the Hydrology toolset.** 2016. Disponível em: <http://goo.gl/lxNGuH>. Acesso: 10 fev. 2022.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. **Drainage networks from grid digital elevation models.** Water Resources Research, Washington, v.27, n.5, p.709-717, 1991.

FAN, F.M; COLLISCHONN, W. **Manual Arc-Hydro para aplicação do modelo MGBIPH.** Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico, 2009.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. **Condicionantes Geomorfológicos dos 138 Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis.** Revista Brasileira de Geomorfologia, volume 2, nº 1 p.51-71, 2001.

FERNANDEZ, D. C. J.; VALERIANO, M. DE M.; ZANI, H.; ANDRADES FILHO, C. DE O. **Extração Automática de Redes de Drenagem a Partir de Modelos Digitais de Elevação.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 64, n. 3, 28 jan. 2013.

FERREIRA, M. C. **Modelagem espaço-temporal e regionalização das cheias no norte de São Paulo:** uma metodologia para geoprocessamento. Geociências, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 467-490, 1997.

FERREIRA, M. C. **Regionalização de pequenas bacias hidrográficas a partir de imagens orbitais e sistema de informação geográfica.** Geociências, v.15(1) p.163-184, 1996.

FREITAS, A. G. M. et al. **Caracterização geomorfológica com enfoque pedológico e análise da rede de drenagem da área correspondente à Folha Alhandra 1:25.000** - estados da Paraíba e Pernambuco, Nordeste do Brasil. Cuad. geogr., vol.22, no.1, p.41-50. 2013.

FREITAS, G. M. A.; FURRIER, M. **Geomorfologia e análise da rede de drenagem da folha alhandra, tabuleiros litorâneos dos Estados da Paraíba.** 2011.

GOES, A. M.; ROSSETTI, D. F.; NOGUEIRA, A, C. **Modelo Depositional Preliminar da Formação Pirabas no Nordeste do Pará.** Bol. Mus. Para. Emilio Goeldi Ciências da Terra. 1990.

GOVINDAN A. **Paleobiogeography of Cretaceous and Tertiary Larger Foraminifera and Paleo-Seas.** In: Int. Symp.Geosci. Res. Environ. Asian Terr., 4, Proceedings, 1, p.166-168. 2008.

GRIMALDI, S. et al. **A physically-based method for removing pits in digital elevation models.** Adv. Water Resour., Southampton, v. 30, p. 2151-2158, 2007.

GRUPO BARREIRAS. Geologia USP. **Série Científica.** São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.

GUERRA, ANTONIO JOSÉ TEIXEIRA; CUNHA, SANDRA BAPTISTA DA. **Geomorfologia e Meio Ambiente.** 9º ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

HOWARD, A. D. **Drainage analysis in geologic interpretation:** A summary. AAPG Bulletin, v. 51, p. 2246-2259, 1967.

JENSON, S.K.; DOMINGUE, J.O. **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bethesda, v.54, n.11, p.1.593-1.600, 1988.

JORDAN, G.; SCHOTT, B. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. Remote Sensing of Environment, New York, v.94, n.1. p.31-38, 2005.

LIMA, C. C. U. **O neotectonismo na costa do Sudeste e do Nordeste brasileiro.** Revista de Ciência & Tecnologia, n.15, p. 91-102, jun-2000.

MARK, D.M. **Automatic detection of drainage networks from digital elevation models.** Cartographica, Toronto, v.21, n.3, p.168-178, 1984.

MERKEL, W.H.; KAUSHIKA, R.M.; GORMAN, E. **NRCS GeoHydro-A GIS interface for hydrologic modeling.** Computers & Geosciences, Oxford, v.34, n.8, p.918-930, 2008.

MONTEIRO, E. V., FONTE, C. C., & DE LIMA, J. L. P. **Exatidão posicional de redes hidrográficas extraídas de MDE gerados a partir de MDE globais e de dados extraídos do OpenStreetMap.** VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodésia. 2015.

MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A.R. **Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications**. Hydrol. Proc., v. 5, p. 3-30, 1991.

MORAIS, R.M.O. **Estudo faciológico da Formação Barreiras na região entre Marica e Barra de Itabapoana, estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 113 p. 2001

MORAIS, R.M.O.; MELLO, C.L.; COSTA, F.O.; SANTOS, P.F. **Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos depósitos da Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro**. Geologia USP (Série Científica), v. 6, n. 2, p. 19-30, 2006.

Morisawa, M.E. **Quantitative Geomorphology of Some Watersheds in the Appalachian Plateau**. Geological Society of America Bulletin, 73, 1025-1046. 1962. Disponível em: Acesso em: 15 maio 2021.
[http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1962\)73%5B1025:QGOSWI%5D2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1962)73%5B1025:QGOSWI%5D2.0.CO;2). 1962.

MOURA-FÉ, MARCELO MARTINS DE. **Barreiras: Série, Grupo ou Formação? (Barreiras: Serie, Group or Formation?)**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S.l.], v. 7, n. 6, p. 1055-1061, 2015. ISSN 1984-2295. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233079/26996>>. Acesso em: 01 maio 2020.
doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.6.p1055-1061>.

NOGUEIRA, F. C. C.; BEZERRA, F. H. R. **Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar**. Geologia USP (Série Científica), São Paulo, v. 6, n. 2, p.51-59, 2006.

O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. **The extraction of drainage networks from digital elevation data**. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 28, 323-344. 1984. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80047-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80047-X). Acesso: 10 fev. 2022.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. **Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM**. Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient., Campina Grande, v. 14 n. 8, p. 819-825, 2010.

PILESJÖ, P.; ZHOU, Q. **Theoretical Estimation of Flow Accumulation from a GridBased Digital Elevation Model**. Proceedings of GIS AM/FM ASIA'97 and Geoinformatics'97 Conference, Taipei, n. 26-29, pp 447-456, 1997.

RAMME, E.J.; KRUGER, C.M. **Delimitação de bacias hidrográficas com auxílio de geoprocessamento**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007.

RAMOS, I. S., ALVES, M.G., BARROSO, J.A., LOSANO, J. **Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Diagnóstico do Uso Atual do Solo e Áreas de Exploração de Argila em Campos dos Goytacazes/RJ**. In: Anais do XI Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 2003.

RIBEIRO, C. S. **Influência da tectônica pós-deposicional na distribuição da Formação Barreiras entre o rio Paraíba do Sul (RJ) e rio Doce (ES)**. Dissertação (Mestrado em

Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 163 p. 2010.

RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudestado Brasil**. São Paulo. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade São Paulo, São Paulo. 256p. 1989.

RODRIGUES, L.O.M. **Análise de lineamentos e de dados estruturais neotectônicos na região norte-fluminense, entre os rios Paraíba do Sul e Itabapoana**. Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2015.

ROSSETTI, D.F. **Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes**. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, p. 77-89, 2001.

_____. **Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene)**. São Luís Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology* 133, 295–324. 2000.

_____. **Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products**. *Sedimentary Geology* 169, 151–174. 2004.

_____. **The role of tectonics on the preservation of estuarine valleys in areas with low accommodation rates: examples from Upper Cretaceous and Miocene successions in Northern Brazil**. In: Dalrymple, R.W., Leckie, D.A., Tillman, R.W. (Eds.), *Incised valley in time and space: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, 85, pp. 199–218 2006.

ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. **Geologia**. In: Rossetti, D.F. & Góes, A.M. (Eds.) *O Neógeno da Amazônia Oriental*, p. 13-52, 2004.

ROSSETTI, D.F.; SANTOS JR., A.E.A. **Facies architecture in a tectonically-influenced estuarine incised valley fill of Miocene age, Northern Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*, 17, p. 267-284, 2004

ROSSETTI, D.F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A.M. **Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, Nordeste do Pará**. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra*, v. 1, n. 1, p. 25-74, 1989.

SILVA, L.C. & CUNHA, H.C.S. **Geologia do estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2001. CD-ROM.

SOUZA, J. O. P. DE, & ALMEIDA, J. D. M. DE. **Modelo Digital De Elevação E Extração Automática De Drenagem: Dados, Métodos E Precisão Para Estudos Hidrológicos E Geomorfológicos**. *Boletim De Geografia*, 32(2), 134 - 149. 2014.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. **Ambientes fluviais**. 2.ed. Florianópolis: UFSC, 1990. 183p

SUGUIO, K., BIDEGAIN, J.C., MÖRNER, N.A. **Dados preliminares sobre as idades paleomagnéticas do Grupo Barreiras e da Formação São Paulo.** Revista Brasileira de Geociências 16, 171–175. 1986.

TARBOTON, D.G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. **On the extraction of channel networks from digital elevation data.** Hydrological Processes, Chichester, v.5, n.1, p.81-100, 1991.

TARBOTON, D.G., 1997. **A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models.** Water Resources Research 33, 309-319. 1997. Disponível: <http://doi.wiley.com/10.1029/96WR03137>. Acesso: 10 fev. 2022.

TÁVORA V.A., IMBELONI E.F.F., CACELA A.S.M., BAIA N. B. **Paleoinvertebrados.** In: Rossetti D.F. & Góes A. M. (eds.) O Neógeno da Amazônia Oriental. Belém, Editora do Museu Paraense Emílio Goeldi, Coleção Friederich Katzer, p.111-131. 2004.

TAVORA, V. A.; SANTOS, A. A.; ARAUJO, R, N. **Localidades fossilíferas da Formação Pirabas (Mioceno Inferior).** Bol. Mus. Para. Emilio Goeldi Cienc. Nat. v.5 n.2 Belém ago. 2010

TAVORA, V. A.; SANTOS, A. A.; NETO, I, L, A, N. **Eventos biológicos da Formação Pirabas (Mioceno Inferior).** Revista Brasileira de Geociências. 40(2): 256 – 264, junho de 2010.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.P.; ROUSSEAU, A.N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J.P. **Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network.** Journal of Hydrology, Amsterdam, v.240, n.3, p.225-242, 2001.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata:** seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/TDkrig.pdf>>. Acesso em 10 de fev. 2022.

VERDIN, K.L.; VERDIN, J.P. **A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins.** Journal of Hydrology, Amsterdam, v.218, n.1, p.1-12, 1999.

VOGT, J.V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. **Deriving drainage networks and catchment boundaries:** a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. Geomorphology, Amsterdam, v.53, n.3, p.281-298, 2003.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Eros:** a grid-based program for estimating spatially distributed erosion indices. Computers and Geosciences, 22:707-712, 1996.

_____. **Terrain Analysis:** Principles and Applications. New York: John Wiley and Sons, 2000. 479 p.

ZAVOIANU, ION. **Morphometry of drainage basins / Ion Zavoianu.** SERBIULA (sistema Librum 2.0). 2020.