

DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS: APLICAÇÃO E ANÁLISE EM DIFERENTES PAISAGENS NO BRASIL

AUTOMATIC DELIMITATION OF WATERSHEDS: APPLICATION AND ANALYSIS IN DIFFERENT LANDSCAPES IN BRAZIL
DELIMITACIÓN AUTOMÁTICA DE CUENCAS: APLICACIÓN Y ANÁLISIS EN DIFERENTES PASAJES EN BRASIL

RESUMO

A bacia hidrográfica representa uma unidade ideal de planejamento e sua delimitação pode ocorrer por métodos manuais ou computacionais, sendo que estes últimos, quando apoiados em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), proporcionam eficiência e agilidade ao processo. O presente estudo tem por objetivo a aplicação e análise da metodologia de delimitação automática de três bacias hidrográficas em diferentes paisagens do Brasil: Mata Atlântica, Amazônia e Pantanal, empregando SIG. Para tanto, as bacias hidrográficas foram delimitadas automaticamente três softwares SIG distintos e utilizando dados TOPODATA. Para análise das delimitações automáticas, foram empregues como referência os limites das mesmas bacias hidrográficas obtidos previamente via processo manual. Os resultados obtidos indicaram variações, em termos de área, menores que 1% para as bacias delimitadas automaticamente na região de Mata Atlântica, sendo ainda os locais onde houve menor discrepância entre os limites automáticos. Já para bacia da Amazônia, os valores totais de área foram próximos. Enquanto para a bacia do Pantanal, os valores de área foram 50% menores em relação as referências, com divergências significativas entre os limites das bacias. Este estudo reforça a necessidade do usuário se atentar às limitações existentes em processos automatizados de delimitação automática de bacias hidrográficas em ambiente SIG, visto os potenciais impactos nos processos de tomadas de decisões.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica; Biomas; Sistemas de Informações Geográficas.

ABSTRACT

The river basins represent an ideal planning unit, and its delimitation can occur by manual or computational methods. The second one when supported by a Geographic Information Systems (GIS) environment provides efficiency and agility to the process. This study aims to apply and analyze the automatic process for delimitation of three watersheds in different landscapes in Brazil: Atlantic Forest, Amazonia and Pantanal, using GIS. The drainage basins were delimited automatically using three different GIS softwares and TOPODATA data. For the analysis of the automatic delimitations, the limits of the same drainage basins were previously obtained via a manual process and used as a reference. The results achieved indicated variations, in terms of area, smaller than 1% for the automatically delimited watershed in the Atlantic Forest region, being still the places where there was less discrepancy between the automatic limits. As for the Amazon basin, the total area values were similar. On the other hand, for the Pantanal watershed, the area values were 50% smaller in relation to the reference, with significant divergences between the limits of the basins. This study reinforces that users need to pay attention to existing limitations in the automatic processes of delimitation of watersheds in different landscapes using GIS, which can cause potential impacts on decision-making processes.

Keywords: Watershed; Biomes; Geographic Information Systems.

 Vitor Dantas Faria ^a
 Darlan Miranda Nunes ^b
 Rosângela Garrido Macho Botelho ^a

^a Escola Nacional de Ciências Estatísticas (ENCE/IBGE), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

^b Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil

DOI: 10.12957/geouerj.2023.68545

Correspondência:

vitord.faria@gmail.com
darlan.nunes@ufv.br
rosangela.botelho@ibge.gov.br

Recebido em: 25 jun. 2022

Revisado em: 16 jul. 2022

Aceito em: 11 mai. 2023



RESUMEN

La cuenca hidrográfica representa una unidad ideal de planificación y su delimitación puede darse por métodos manuales o computacionales, estos últimos, apoyados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), aportan eficiencia y agilidad al proceso. Este estudio tiene como objetivo aplicar y analizar la metodología de delimitación automática de tres cuencas hidrográficas en diferentes paisajes de Brasil: Mata Atlántica, Amazonia y Pantanal, utilizando SIG. Para ello, las cuencas hidrográficas se delimitaron automáticamente utilizando tres softwares GIS diferentes y utilizando datos de TOPODATA. Para el análisis de las delimitaciones automáticas se tomaron como referencia los límites de las mismas cuencas hidrográficas obtenidos previamente mediante un proceso manual. Los resultados obtenidos indicaron variaciones, en términos de área, inferiores al 1% para las cuencas delimitadas automáticamente en la región de la Mata Atlántica, siendo aún los lugares donde hubo menor discrepancia entre los límites automáticos. En cuanto a la cuenca del Amazonas, los valores de área total fueron similares. Mientras que para la cuenca del Pantanal, los valores de área fueron 50% menores en relación a las referencias, con divergencias significativas entre los límites de las cuencas. Este estudio refuerza la necesidad de que el usuario preste atención a las limitaciones existentes en los procesos automatizados de delimitación automática de cuencas hidrográficas en un entorno SIG, dados los impactos potenciales en los procesos de toma de decisiones.

Keywords: Cuenca hidrográfica; Biomas; Sistemas de Información Geográfica.



INTRODUÇÃO

A gestão ambiental busca adotar as bacias hidrográficas como unidades de análise e planejamento por serem sistemas que englobam regimes hidrológicos, características geomorfológicas e dimensões distintas. Essas são descritas através da convergência de canais até um único ponto mais a jusante da rede de drenagem e são delimitadas pelos seus divisores de água. Devido a seus limites físicos e processos hidrológicos, uma bacia hidrográfica é uma unidade natural de análise, sujeita a influências internas e externas em seu sistema, onde a relação dos processos e dos elementos da paisagem moldam sua dinâmica (CHRISTOFOLETTI, 1980; BOTELHO, 1999; BOTELHO; SILVA, 2004).

O estudo das bacias hidrográficas oferece um referencial para a sua gestão, proporcionando análises com maior qualidade, permitindo investigar, por exemplo, a ação de fatores internos e externos nestas unidades de planejamento. Para tanto, o processo de delimitação é a etapa inicial e fundamental para compreensão da bacia hidrográfica investigada.

A delimitação de bacias hidrográficas pode ser realizada por métodos tradicionais, a partir da interpretação e traçado dos divisores de água diretamente sobre cartas topográficas, analógicas ou em ambiente digital, utilizando a mesma interpretação de divisores. Outra forma de delimitação em ambiente computacional é a delimitação por métodos automatizados, utilizando dados vetoriais espacializados, tais como dados de altimetria, hidrografia e/ou modelos numéricos de terreno, por meio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os métodos automáticos, atualmente, são os mais utilizados, por proporcionarem eficiência e agilidade ao processo de delimitação. Contudo, é preciso atenção na aplicação de processos automáticos em diferentes ambientes e a qualidade dos resultados obtidos. Tendo em vista a necessidade da delimitação de bacias hidrográficas da forma mais precisa possível, faz-se necessário um olhar crítico sobre os diferentes aspectos envolvidos nesse processo, desde os dados de entrada, ferramentas e resultados obtidos, a fim de averiguar a qualidade do sistema e produtos gerados.

Este estudo tem como objetivo a aplicação e análise da metodologia de delimitação automática de bacias hidrográficas em paisagens distintas, localizadas em três biomas brasileiros, utilizando três softwares (SIG) diferentes. Além disso, buscou-se analisar a influência das diferentes paisagens no processo de delimitações automáticas das bacias hidrográficas e avaliar o método adotado em relação a cada um dos casos estudados e softwares utilizados, com ênfase na investigação de possíveis falhas que afetam a qualidade e viabilidade de uso dos produtos gerados.

A aplicação da metodologia de delimitação automática de bacias hidrográficas apoiada em SIG é consagrada e amplamente utilizada. No entanto, este estudo apresenta uma abordagem ainda pouco explorada no que se refere a aplicação do processo de delimitação de bacias em diferentes paisagens, que

possuem características de relevo e hidrografia próprias, favorecendo a análise e os impactos no processo em cada um dos cenários analisados. As diferentes escalas dos dados de entrada e os múltiplos processos de delimitação implicam na necessidade de o usuário compreender e diferenciar os erros e/ou limitações provenientes dos dados de entrada, do comportamento do algoritmo de delimitação implementado em cada software SIG, e das características da paisagem que impactam nos dados de saída das operações.

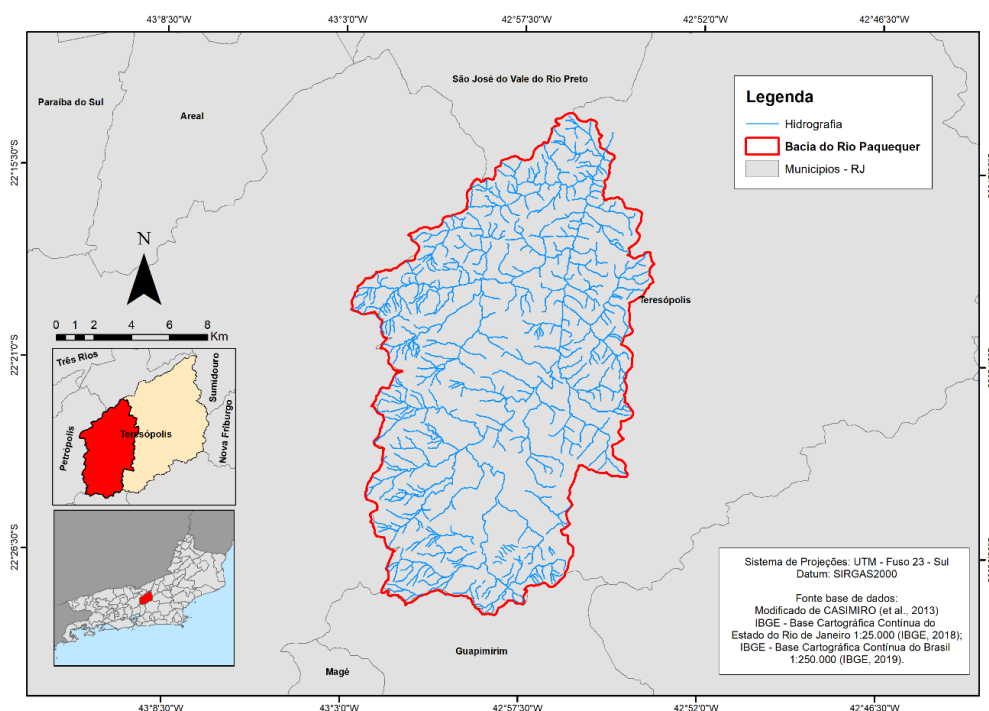
ÁREAS DE ESTUDO

Para a realização desse estudo, foram selecionadas três bacias hidrográficas de diferentes paisagens no Brasil e que apresentam características bastante distintas em seus atributos físico-bióticos e em suas dimensões.

Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer

A Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer está localizada no município de Teresópolis, na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro. Apresenta área de aproximadamente 269 km², fazendo parte da Bacia do Rio Paraíba do Sul (Figura 1). A Serra do Mar no território fluminense insere-se no Bioma Mata Atlântica, marcado por uma paisagem de ocorrência de Floresta Ombrófila Densa Montana e Alto-Montana, com pluviosidade média anual de 1500 mm e aumento da média de chuvas durante o verão. O relevo é montanhoso e escarpado, com vales encaixados e uma geologia composta por gnaisses e granitos, contribuindo para uma maior declividade das vertentes na bacia considerada (UERJ/IBGE, 1999; SILVA et al., 2007; SILVEIRA; SILVA, 2010; CASIMIRO et al., 2013).

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer no município de Teresópolis (RJ).



Fonte: Os autores (2022).

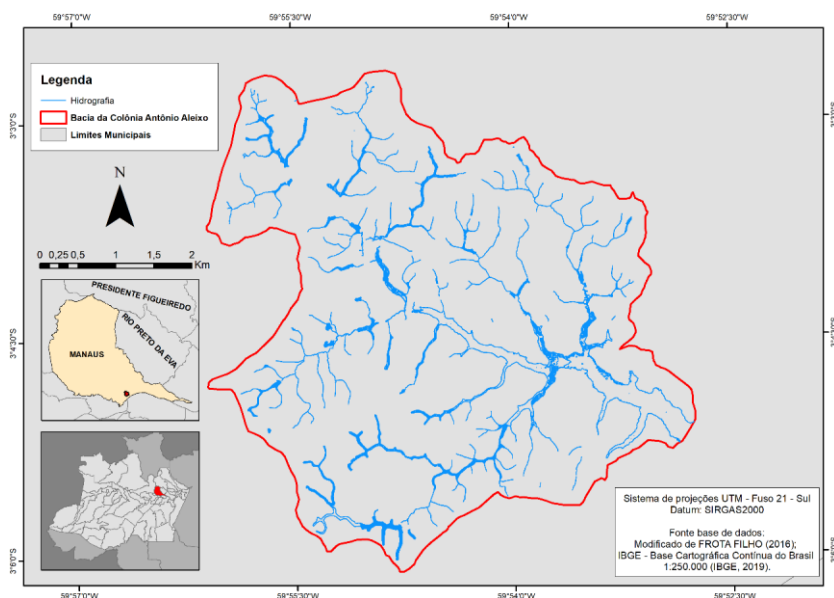
Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo

A Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo (Figura 2) recebe o nome do bairro no qual é encontrada sua nascente e está localizada na Zona Leste de Manaus, no estado do Amazonas, com uma área de aproximadamente 24 km², drenada diretamente para o rio Amazonas (FROTA FILHO, 2016). Está inserida na Bacia Sedimentar do Amazonas, numa paisagem marcada predominantemente por sistemas de colinas pequenas e, em algumas partes, tabuleiros (BEZERRA, 1991; BOHRER; GONÇALVES, 1991; IGREJA, 2000; SILVA, 2005).

A vegetação original predominante é a Floresta Ombrófila Densa. De um modo geral, as precipitações são elevadas nos meses de verão, com diminuição no inverno, com médias anuais de 2300 mm, caracterizando um clima quente e úmido (VIEIRA, 2008; BOTELHO; CLEVELARIO JUNIOR, 2016; INMET, 2020).

A Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo foi especialmente importante para avaliar os resultados em uma bacia de menor extensão, em comparação às outras, e como as limitações dos softwares em relação a resolução espacial do MDE de entrada, somadas às características geomorfológicas do local, tornaram as diferenças nas delimitações automáticas mais evidentes (BEZERRA, 1991; BOHRER e GONÇALVES, 1991; IGREJA, 2000; SILVA, 2005).

Figura 2. Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo no município de Manaus (AM).



Fonte: Os autores (2022).

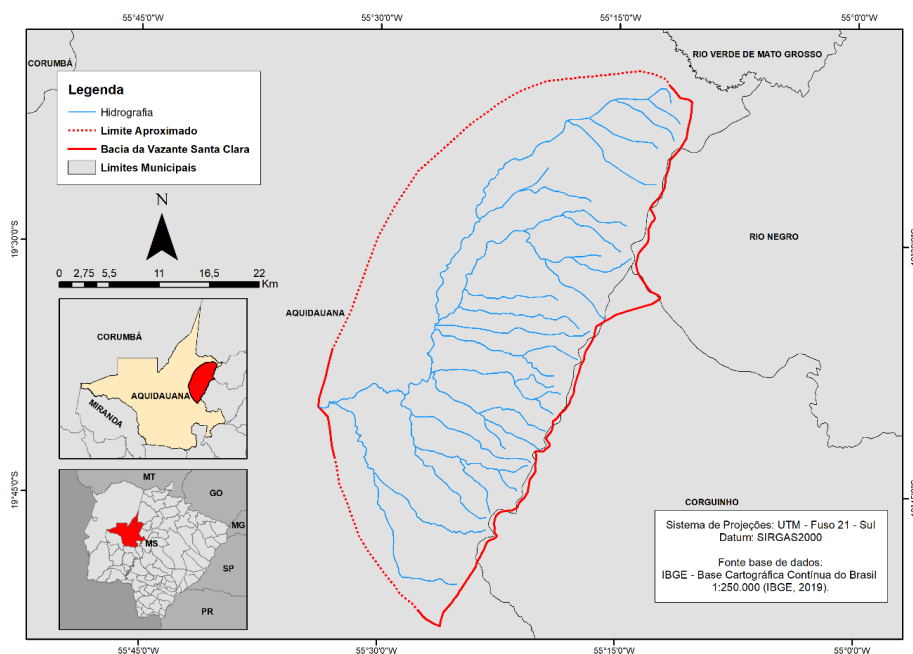
Bacia Hidrográfica da Vazante Santa Clara

A terceira área considerada no presente estudo é a Bacia Hidrográfica da Vazante Santa Clara, afluente do Rio Negro, localizada no município de Aquidauana, no estado do Mato Grosso do Sul, com aproximados 1.370 km² (Figura 3).

O Pantanal, bioma no qual a bacia está inserida, corresponde a uma paisagem marcada por um relevo predominantemente plano e deprimido, limitado por escarpas pertencentes à borda da Bacia Sedimentar do Paraná, da Serra da Bodoquena, Chapada dos Parecis e a Serra de Cuiabá; constituindo a maior planície alagada contínua do mundo, com inundações anuais de longa duração (BOTELHO; CLEVELARIO JUNIOR, 2016).

Cabe ressaltar que parte da delimitação manual desta bacia precisou ser realizada de forma aproximada na porção noroeste e sudoeste até a foz do canal principal, sendo este trecho representado com pontilhado na Figura 4, devido à comunicação de seus cursos de água com a área de drenagem a oeste. Isso ocorre em razão do transbordamento dos canais em períodos de cheia, em decorrência do relevo predominantemente plano. A leste, os divisores de água da bacia são bem definidos, devido à presença da escarpa do planalto, nos limites de Aquidauana com os municípios adjacentes (Serra Maracaju - Campo Grande).

Figura 3. Bacia Hidrográfica da Vazante Santa Clara no município de Aquidauana (MS).



Fonte: Os autores (2022).



Materiais e Métodos

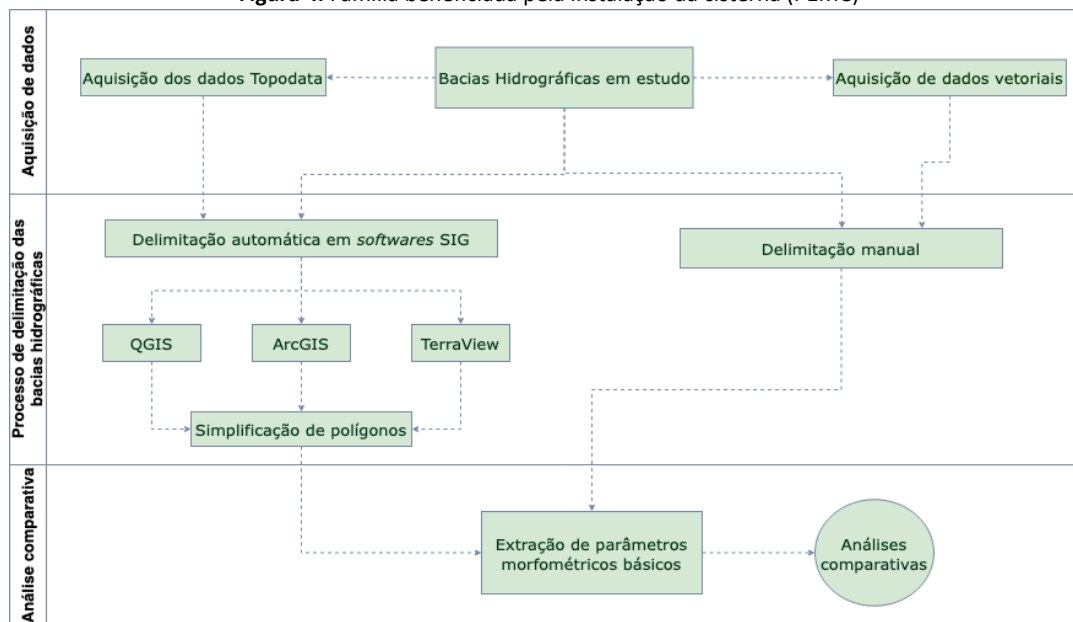
O processo de delimitação automática foi executado em cada uma das bacias em estudo por meio de ferramentas disponíveis em diferentes softwares SIG (proprietário e de código aberto) e com o uso do Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto TOPODATA (INPE, 2020). Para fins comparativos, as bacias hidrográficas também foram delimitadas manualmente a partir de bases de dados vetoriais, referentes a hidrografia e altimetria, no maior nível de detalhamento disponíveis, i.e, para a bacia hidrográfica Rio Paquequer (Teresópolis/RJ) foram empregues dados na escala 1:25.000, já para bacia do Igarapé Colônia Antônio (Manaus/AM) dados em escala 1:10.000 e para a bacia da Vazante Santa Clara (Aquidauana/MS), dados em escala 1:250.000.

O recurso “simplificar polígonos” foi utilizado para suavizar o traçado serrilhado do limite das bacias resultante das delimitações automáticas, oferecendo uma maneira de padronizar os resultados. O uso desta opção gera alterações nos valores totais de área e perímetro para cada delimitação, entretanto, são alterações esperadas, uma vez que o traçado em pixels implica em valores de área e perímetro maiores do que delimitações por processos manuais.

Os limites das bacias hidrográficas resultantes do processo de delimitação automática nos softwares SIG empregados foram comparados com suas respectivas delimitações por método manual, tornando possível a análise em termos qualitativo e quantitativo.

O fluxograma apresentado na Figura 4 resume as diferentes etapas envolvidas neste trabalho. O processo tem início a partir da escolha das bacias hidrográficas, com base nas suas características distintivas, seguida pela aquisição dos dados matriciais referentes ao MDE TOPODATA, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para a delimitação automática, e das delimitações manuais para critérios de comparação com os resultados. As delimitações manuais, pré-existentes, foram devidamente avaliadas e ajustadas para o estudo e os dados matriciais foram utilizados na delimitação automática nos softwares SIG. Por fim, os parâmetros de área e perímetro foram calculados para a etapa de análise dos dados.

Figura 4. Família beneficiada pela instalação da cisterna (P1MC)



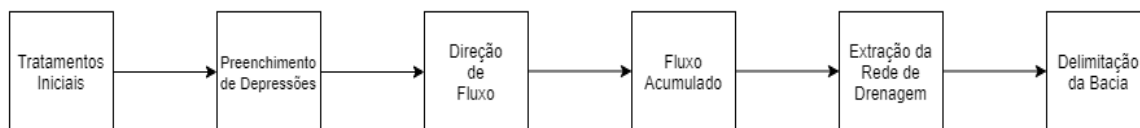
Fonte: Os autores (2022).

A abordagem para delimitação das bacias hidrográficas apresentada neste trabalho fez uso de três softwares SIG a fim de analisar o comportamento de diferentes algoritmos no processo de delimitação automática de bacias nas distintas paisagens consideradas. Ressalta-se que não constitui o objetivo principal deste estudo apontar qual ferramenta é a melhor ou pior para delimitar uma bacia de forma automática e sim contribuir para a análise comparativa diante da diversidade de opções disponíveis, apontando as nuances encontradas nos dados resultantes em relação aos métodos de delimitação tradicionais.

Para tanto, foram utilizados os softwares: ArcGIS versão 10.3 - ferramenta proprietária, de código fechado, amplamente utilizada por diversos usuários e instituições a nível nacional e internacional, desenvolvido pela empresa ESRI; QGIS versão 3.10 - software SIG de código aberto, disponibilizado gratuitamente, que tem sido muito utilizado atualmente; e o TerraView com a extensão TerraHidro - ferramenta desenvolvida através do TerraLib, fornecida gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e caracterizada como uma ferramenta SIG de propósito geral.

O processo de delimitação automática aplicado nos três softwares segue um padrão de procedimentos, quais sejam (Figura 5): tratamento inicial dos dados de entrada, preenchimento de depressões espúrias, determinação da direção de fluxo, obtenção do fluxo acumulado, extração da rede de drenagem (etapa opcional, que foi realizada) e delimitação das bacias (DIAS et al., 2004; SOBRINHO et al., 2010; NICOLETE et al., 2015). Essa sequência de procedimentos foi adotada em todos os softwares utilizados, com comandos e ferramentas específicas definidas em cada um.

Figura 5. Etapas do processo da delimitação automática de bacias hidrográficas em SIG.



Fonte: Os autores (2022).

Para a delimitação automática das bacias, foram utilizados os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) do projeto TOPODATA, disponibilizados no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Desta forma, foi possível padronizar o estudo, utilizando dados de uma mesma fonte, já revisados e disponíveis para todo o território nacional. Os dados TOPODATA foram elaborados a partir de dados Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), disponibilizados pelo United States Geological Survey (USGS), e são disponibilizados na forma de quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000 e com resolução espacial de 30 metros (INPE, 2020).

Para fins das análises comparativas entre os resultados obtidos nas delimitações automáticas das bacias hidrográficas do presente estudo, também foi realizada a delimitação manual das bacias de interesse ou seus limites, previamente definidos, foram revisados, tomando dados vetoriais disponíveis no melhor nível de detalhamento do terreno em cada bacia, quais sejam: curvas de nível e rede hidrográfica obtidas da Base Cartográfica Contínua do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:25.000 - Projeto RJ25 (IBGE, 2018) e Base Cartográfica Contínua do Brasil na escala 1:250.000 (BC250) (IBGE, 2019), ambas disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e dados vetoriais na escala 1:10.000 referentes a Manaus, disponibilizados por Frota Filho (2016). Todos os dados empregues foram compatibilizados no sistema geodésico de referência oficial adotado no Brasil, Datum SIRGAS2000, e associados a coordenadas planas por meio do sistema de projeções UTM.

Os parâmetros morfométricos das bacias foram utilizados como critério de comparação entre os resultados e para compor a análise dos dados. Os principais parâmetros utilizados foram área e perímetro, extraídos de cada delimitação, mas também foram levadas em conta as características do relevo e características intrínsecas das paisagens nas quais as bacias estão inseridas, como vegetação, ocupação do solo e clima em cada uma.

As áreas das bacias foram comparadas em termos dos resultados das delimitações automáticas obtidas em cada software, bem como entre as versões das bacias delimitadas com as geometrias dos traçados de limites simplificadas, utilizadas a fim de reduzir o “efeito pixelado” ou “efeito escada” resultante do processo automatizado. O perímetro representa a soma das medidas de todos os segmentos do limite da bacia

hidrográfica. Diferentemente da área, o perímetro é influenciado pela quantidade de ângulos e pequenas variações no traçado final de cada delimitação.

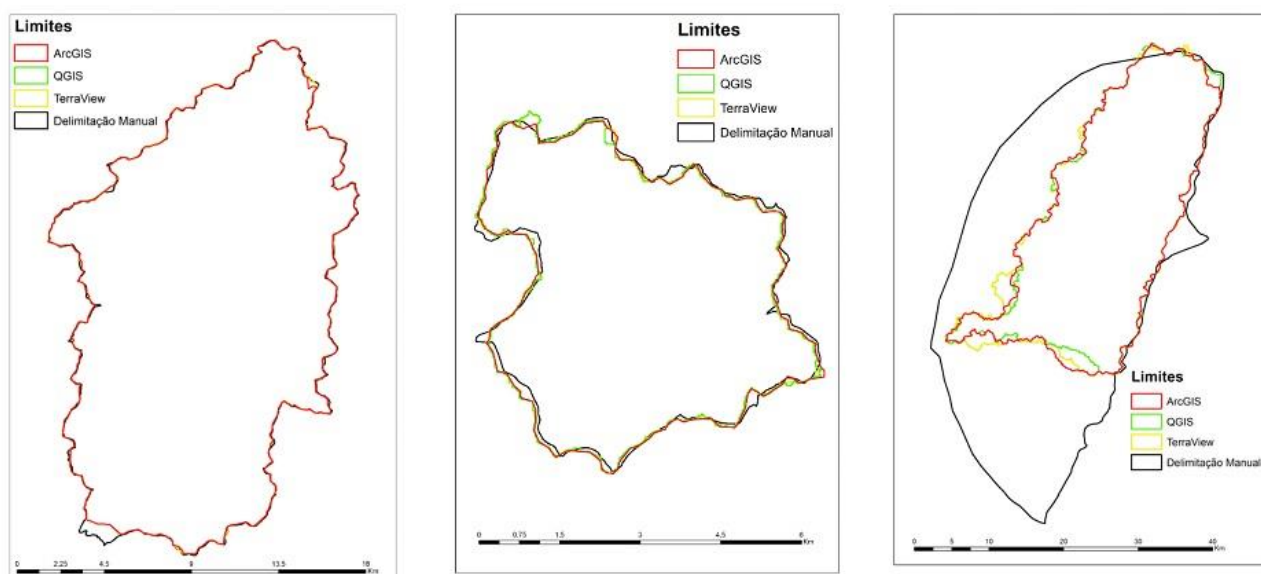
É importante ressaltar que as três bacias, embora possuam características distintas, apresentam a mesma ordem hierárquica, quinta ordem, de acordo com os critérios de Strahler (1957). Esse fato é importante, pois a ordem de uma bacia hidrográfica tem influência direta na área, no comprimento do canal principal e no quantitativo de afluentes (FROTA FILHO, 2016).

Resultados

A sobreposição entre as diferentes delimitações das bacias ressaltou as semelhanças entre os processos, bem como evidenciou as áreas de maior divergência entre os resultados, conforme pode ser observado na Figura 6. Nota-se discrepância entre os processos de delimitação, o que pode ser devido a diferentes fatores. Os softwares obedecem aos parâmetros determinados pelo usuário (BOTELHO; DANTAS; SILVEIRA, 2020) e seus algoritmos processam os dados de acordo com sua programação. Dessa forma os dados de entrada e o método de delimitação em si também precisam sempre ser avaliados.

Deve-se ressaltar que a escala dos dados utilizada nas delimitações manuais denota um nível de detalhamento do terreno diferente dos dados TOPODATA. Para as três bacias em estudo, foram utilizados dados com diferentes equidistâncias entre as curvas de nível, não padronizados em função dos dados disponíveis utilizados. Esse fato, também influencia nas divergências observadas em relação aos resultados obtidos automaticamente).

Figura 6. Limites resultantes das delimitações automáticas e manual para cada uma das bacias hidrográficas estudadas. a) Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer - Teresópolis (RJ). Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo - Manaus (AM). c) Bacia Hidrográfica da Vazante Santa Clara - Aquidauana (MS).



Fonte: Os autores (2022).



Os resultados da delimitação automática da Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer foram os mais próximos em relação à delimitação manual, o que se deve às características geomorfológicas da paisagem montanhosa onde ela se encontra, sendo as vertentes mais íngremes, os vales mais estreitos e a rede drenagem mais retilínea. Estes fatores, se destacam nos dados TOPODATA e, devido à extensão da área, favoreceram o processo de delimitação automática pelos algoritmos.

Assim, as delimitações automáticas para a bacia do Rio Paquequer apresentaram a menor discrepância entre si, com apenas algumas poucas áreas com variações mais evidentes. O maior destaque está no limite sul da bacia, onde as três ferramentas ignoraram uma porção de área de aproximadamente 1,4 km². As curvas de nível extraídas dos dados TOPODATA, quando comparadas às curvas de nível do projeto RJ25 (IBGE, 2018), mostram que a resolução espacial de 30 metros do MDE não é suficiente para representar esta porção da bacia, impossibilitando a delimitação automática.

Os limites da Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo, quando comparados entre si, destacam a ocorrência de maior número de discrepância entre os algoritmos, ainda que, de modo geral, sejam próximos. Em relação à delimitação manual, o padrão das diferenças é mais aparente, em relação à bacia do Rio Paquequer. O relevo, com predominância de sistemas de colinas pequenas, em conjunto com a menor extensão da bacia hidrográfica são fatores que influenciam na delimitação automática em contraste com a uma delimitação manual a partir de dados na escala 1:10.000.

A Bacia da Vazante Santa Clara foi a que mais demonstrou limitações, tanto de dados quanto de softwares. Por estar situada, em grande parte, numa planície de inundação, os resultados demonstram que os limites traçados automaticamente foram muito distintos do limite fruto da delimitação manual na porção oeste. Essa discrepância no processo automático é decorrente de uma soma de fatores, que incluem as características geomorfológicas e hidrológicas dessa bacia hidrográfica, localizada em uma planície de inundação, em conjunto com a resolução espacial limitada dos dados TOPODATA para oferecer uma representação adequada para esse tipo de terreno. Com isto, as delimitações automáticas realizadas nas diferentes ferramentas, embora com resultados relativamente próximos entre si, apresentam diferenças significativas em relação ao traçado manual do limite oeste da bacia, notável facilmente na Figura 6.

Assim, as maiores discrepâncias entre as delimitações podem ser observadas na bacia da Vazante Santa Clara, onde o relevo, as condições hidrológicas e a resolução espacial do dado de origem são componentes que colaboram com o resultado divergente entre delimitações automáticas e a delimitação manual. O relevo plano faz com que a resolução espacial de 30 metros dos dados TOPODATA não se adeque a uma metodologia automática, levando a um resultado insatisfatório e não correspondente à realidade, o que implica na



necessidade do usuário de softwares SIG reconhecer os potenciais e limitações da ferramenta, bem como dos dados utilizados nos diferentes processos executados.

Implicações do processo de delimitação automática de bacias hidrográficas nos valores de área e perímetro

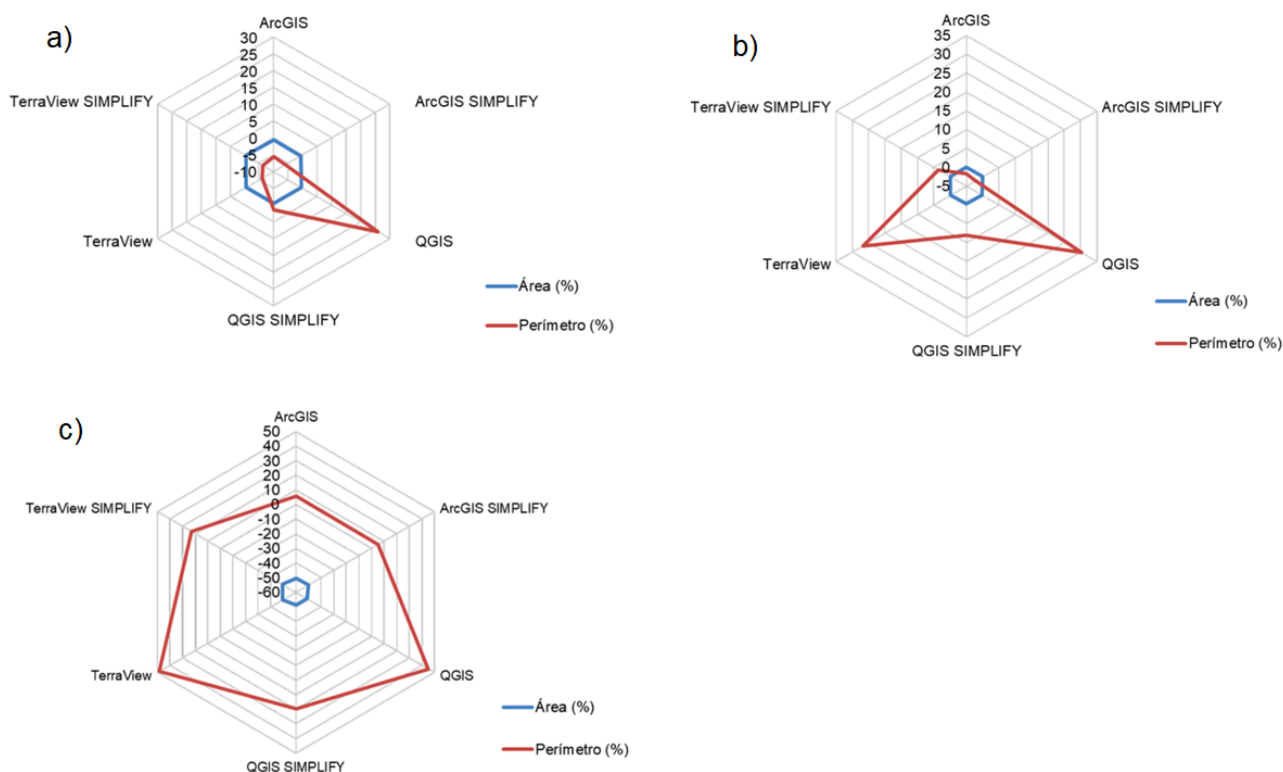
A Tabela 1 e a Figura 7 apresentam os resultados obtidos para os parâmetros área e perímetro de cada uma das bacias hidrográficas do presente trabalho. Observando os resultados, é notável as discrepâncias nos valores de perímetro dos limites traçados automaticamente sem simplificação e àqueles com geometria simplificada (*simplify*), pois o traçado “pixelado” aumenta o número de ângulos, o que afeta diretamente os valores do perímetro das bacias. Quanto aos valores de área, a simplificação também provoca alterações, que, devido à suavização de ângulos, podem aumentar ou diminuir a área total resultante da bacia, porém em menor intensidade que o efeito nos valores de perímetro.

Tabela 1. Valores de área e perímetro das bacias hidrográficas delimitadas por diferentes processos

Processo/ferramenta Delimitação	Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer - RJ		Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo - AM		Bacia Hidrográfica da Vazante Santa Clara - MS	
	Área (km ²)	Perímetro (km)	Área (km ²)	Perímetro (km)	Área (km ²)	Perímetro (km)
Manual	269,51	93,09	24,52	25,20	1.370,57	164,99
ArcGIS	267,48	87,76	24,50	24,75	681,77	174,49
ArcGIS com traçado simplificado (<i>simplify</i>)	267,46	87,56	24,50	24,65	681,76	173,65
QGIS	267,96	117,28	24,44	32,86	667,61	239,14
QGIS com traçado simplificado (<i>simplify</i>)	267,97	94,46	24,45	27,25	667,59	197,73
TerraView	267,94	87,38	24,51	31,93	696,89	244,63
TerraView com traçado simplificado (<i>simplify</i>)	267,88	87,17	24,51	26,13	696,92	202,47

Fonte: Os autores (2022).

Figura 7. Gráficos das diferenças percentuais das delimitações automáticas em relação à delimitação manual das bacias hidrográficas do Rio Paquequer – RJ (a), do Igarapé Colônia Antônio Aleixo- AM (b) e da Vazante Santa Clara – MS. a) Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer – Teresópolis (RJ). b) Bacia Hidrográfica do Igarapé Colônia Antônio Aleixo - Manaus (AM). c) Bacia Hidrográfica da Vazante Santa Clara - Aquidauana (MS).



Fonte: Os autores (2022).

Quanto aos softwares utilizados, os resultados evidenciam que os valores de área são próximos entre as delimitações automáticas, mesmo com as diferenças observadas na sobreposição, ao comparar a delimitação manual às automáticas. Em termos de diferenças percentuais nota-se que para as bacias do Paquequer e da Colônia Antônio Aleixo a redução de área total foi inferior a 1%. No caso da bacia da Vazante Santa Clara, esta apresentou áreas 50% menores em relação ao processo de delimitação manual, devido aos fatores já supracitados. De um modo geral, destaca-se também que os valores percentuais de área acabam sendo próximos para todas as delimitações automáticas, inclusive após aplicar o processo de simplificação.

Discussão

Através da análise dos resultados nas três bacias hidrográficas, é possível observar como a resolução espacial do dado de entrada e a topografia do terreno afetaram a qualidade dos resultados no processo de delimitação automática, em especial nas áreas mais planas, onde os traçados foram mais discrepantes.



Os resultados obtidos neste estudo para o processo de delimitações automáticas das bacias hidrográficas utilizando diferentes ferramentas e paisagens distintas, possibilitaram analisar e evidenciar os potenciais e as limitações de um processo apoiado em ferramentas SIG amplamente utilizados pelos usuários.

A comparação direta entre os resultados revelou particularidades de cada software, como obtenção de diferenças no traçado e falhas sutis no processo de delimitação. Os padrões que se repetem no traçado das delimitações automáticas podem indicar limitações nos dados de entrada e/ou limitações nas ferramentas em si, essa ocorrência é resultante da influência da escala dos dados e características dos relevos na qualidade dos dados de entrada (TOPODADA) e sua interação com os algoritmos que, mesmo com suas divergências, possuem processos semelhantes e mesma finalidade. O uso de diferentes bacias possibilitou, conforme sugerido por Walker e Willgoose (1999), obter resultados com diferentes níveis de discrepância a fim de comparar uma metodologia automática em relação à manual.

Os três softwares delimitaram as bacias hidrográficas de acordo com os conceitos impostos em sua programação, obedecendo a lógica do fluxo de drenagem, declividade e divisores de água do MDE. A forma como cada uma das ferramentas interpretou os dados de entrada em seus algoritmos, embora seguindo parâmetros e regras previamente estabelecidos, não necessariamente produzem resultados considerados como “satisfatórios”, como pode ser observado no caso da bacia da Vazante Santa Clara, evidenciando que cabe ao usuário da ferramenta avaliar a viabilidade do uso dos resultados de acordo com a finalidade do estudo, nível de detalhamento e as implicações decorrentes. Para as bacias do Rio Paquequer e do Igarapé da Colônia Antônio Aleixo, os resultados foram mais próximos da delimitação manual, porém estes resultados também apresentam erros, que devem ser avaliados como aceitáveis ou não dentro de análises mais detalhadas sobre as características e impactos para a bacia hidrográfica de interesse.

As bacias do Rio Paquequer e do Igarapé da Colônia Antônio Aleixo apresentaram valores de área próximos das delimitações manuais, com diferenças variando em torno de 1%. No entanto, por meio da sobreposição das delimitações ficou visível a ocorrência de falhas. Um determinado trecho da bacia não foi delimitado pelos softwares, enquanto outras áreas que não deveriam ser incorporadas, o foram fazendo com que as diferenças de área, entre a delimitação manual e a automática, em valores totais, fossem próximas umas das outras. Por outro lado, para a bacia da Vazante Santa Clara, ocorreu uma redução de área total, de aproximadamente cinquenta por cento (50%) da delimitação automática em relação à delimitação manual. O perímetro variou mais nas delimitações automáticas, devido ao comportamento dos algoritmos de cada software, que, por sua vez, formam um traço final menos simplificado, variando para mais ou para menos dependendo de cada ferramenta, gerando mais ângulos e curvas no traçado, o que, por sua vez, foi menos relevante para área, porém gerou valores mais elevados para o perímetro final de cada delimitação.



CONCLUSÕES

Tendo em vista que a delimitação automática não é um sistema isento de falhas, é necessário entender os processos, tanto computacionais quanto físicos, referentes às bacias hidrográficas, para corrigir os possíveis erros e validar a delimitação resultante de métodos automatizados. Mesmo que os procedimentos tenham sido aplicados corretamente, cada caso de estudo está sujeito às características inerentes das bacias hidrográficas e da qualidade dos dados de entrada utilizados.

Ao analisar os resultados para as três bacias consideradas, é possível perceber como as características geomorfológicas e hidrológicas influenciam o processo automático da delimitação, ainda que utilizando dados de entrada provenientes de uma mesma fonte. A topografia do terreno, como também observado por Medeiros et al. (2009), é um fator determinante no processo de delimitação automática de bacias hidrográficas, uma vez que em áreas mais planas obteve-se resultados muito discrepantes em relação ao método manual de delimitação.

A resolução espacial dos dados de entrada e a capacidade de representar a topografia do terreno também tiveram implicações diretas nos resultados obtidos, visto que determinadas áreas das bacias hidrográficas não foram delimitadas corretamente por limitações nos dados de entrada. Para trabalhos futuros, pretende-se investigar se “falhas” podem, de fato, ser reduzidas no processo de delimitação automática através do uso de dados de maior resolução espacial e de Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes - MDEHCs (CUNHA; BACANI, 2019; MAGDALENA et al., 2019). Além disso, visando aprofundar as análises realizadas neste estudo, caberia expandir a metodologia testada utilizando outras fontes de dados, tais como os dados SRTM v4, ALOS-PALSAR, Modelos de Elevação Digital Hidrologicamente Consistentes (MDEHCs), NASADEM, AWS3D, dentre outros.

Por fim, entende-se que o uso de métodos completamente automatizados é passível de divergências da realidade (“falhas”), sendo estas provenientes de limitações dos dados de entrada ou das ferramentas adotadas, cabendo ao usuário um olhar crítico sobre o processo, os dados utilizados e o fundamental conhecimento da área de interesse. Assim, se o processo de delimitação automática de bacias possibilita aos usuários otimizar os estudos, por outro lado requer que estes mesmos usuários se atentem para a qualidade dos resultados obtidos, de forma a analisar se são ou não satisfatórios para a aplicação desejada.

REFERÊNCIAS

ANDRADES FILHO, C. O.; ZANI, H.; GRADELLA, F. S. **Extração Automática das Redes de Drenagem no Pantanal de Aquidauana: Estudo Comparativo com dados SRTM, ASTER e Carta Topográfica DSG.** GEOGRAFIA, Rio Claro - RJ, v. 34, Número Especial, p. 731-743, dez. 2009.



- BEZERRA, P. E. L. Geologia. In: **Geografia do Brasil: Região Norte**. Rio de Janeiro, IBGE, 1991, 308p. p.27-46.
- BOHRER, C. B. A.; GONÇALVES, L.M.C. Vegetação. In: **Geografia do Brasil: Região Norte**. Volume 3. Rio de Janeiro: IBGE. 1991. p.137-168.
- BOTELHO, R. G. M. **Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica**. In: Erosão e Conservação dos Solos - conceitos, temas e aplicações. A. J. T. Guerra; A. S. da S.; R. G. M. Botelho. (Org.). 1ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999, p. 269-300.
- BOTELHO, R. G. M.; CLEVELARIO JUNIOR, J. (Coords.). **Recursos Naturais e Questões Ambientais**. In: Brasil uma visão geográfica e ambiental do início do século XXI. A. H. Figueiredo. (Org.). 1ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2016, p. 139-320.
- BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. **Bacia hidrográfica e qualidade ambiental**. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. Reflexões sobre a geografia física no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.
- BOTELHO, R. G. M.; DANTAS, M. E.; SILVEIRA, C. T. **Classificação do Relevo no Brasil: demandas, desafios, ações e proposições**. 2020. UGB. (Apresentação de palestra em formato de Live) Disponível em: <https://youtu.be/lejD6r9jHPU> Acesso em: 20 de julho de 2020.
- BRASIL, Decreto nº 94.076, de 5 de março de 1987. **Institui o Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas e dá outras providências**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1985-1987/D94076.htm. Acesso em: 04 de outubro de 2020.
- BRASIL, Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro De 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm Acesso em: 04 de outubro de 2020.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.; D'ALGE, J. C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2001 (on-line, 2a. edição, revista e ampliada).
- CASIMIRO, J. G. M.; CASIMIRO, P. H. M.; PEIXOTO, M. N. O. **Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer, Teresópolis (RJ)**. In: XXXV Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural UFRJ, 2013, Rio de Janeiro. XXXV Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural UFRJ, 2013.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- COELHO NETTO, A. L. **Hidrologia de Encosta na Interface com a Geologia**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 12ªEd, 2013.
- CUNHA, E. R.; BACANI, V. M. **Influência da resolução do MDE na caracterização morfométrica de Bacia Hidrográfica**. CADERNO DE GEOGRAFIA, v. 29, p. 1029-1041, 2019.
- DAVIS, B. **GIS: A Visual Approach**. Onward Press, Thomson Learning. Canada, 1996.
- DIAS, L.S.O.; ROCHA, G.A.; BARROS, E.U.A.; MAIA, P.H.P. **Utilização do radar interferométrico para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas**. Bahia Análise & Dados, Salvador, v. 4, n.2, p.265-271, 2004.
- FERNANDES, Flávio et.al. **Análise das Características Morfométricas da Bacia Hidrográfica do Rio de Ondas, BA**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 02, Vol. 02, pp. 55-71, fevereiro de 2018. ISSN:2448-0959.
- FROTA FILHO, A. B. **Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus – AM**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base Cartográfica Contínua do Brasil - 1:250 000 (BC250)**. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2019/ Acesso em: 21 de abril de 2020.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base Cartográfica Contínua do Estado do Rio de Janeiro Na Escala 1:25.000 (Projeto RJ25)**. Disponível em: http://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc25/rj/versao2018/ Acesso em: 21 de abril de 2020.
- IGREJA, H.L.S. **Aspectos do modelo neotectônico da Placa Sul-Americana na Província Estrutural Amazônica, Brasil**. Tese referente ao concurso de Professor Titular. Manaus: UFAM – Departamento de Geologia, 151 p. 2000.



INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/> Acesso em: 10 de outubro de 2020.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TOPODATA Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php> Acesso em: 22 de abril de 2020.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TerraLib/TerraView**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/projetos/terralib-terraview> Acesso em: 22 de abril de 2020.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **TerraHidro**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/projetos/terrahidro> Acesso em: 22 de abril de 2020.

MAGDALENA, U. R.; ASSIS, M. G. B.; AMORIM, R. R. **Análise dos algoritmos de declividade na bacia hidrográfica do Rio Camanducaia (SP e MG)**. Geografia Física e Mudanças Globais, 11/2019, ed. 1, 1, Edições UFC, Vol. 1, pp. 9, pp.1-9, 2019.

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

MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação de modelos digitais de elevação para delimitação automática de bacias hidrográficas. Revista Brasileira de Cartografia, v. 61, n. 2, 11, 2009.

NICOLETE, D. A. P.; CARVALHO, T. M.; POLONIO, V. D.; LEDA, V. C.; ZIMBACK, C. R. L. **Delimitação automática de uma Bacia Hidrográfica utilizando MDE TOPODATA: aplicações para estudos ambientais na região da Cuesta de Botucatu - SP**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015. p. 3988-3994.

SILVA, C. L. **Análise da tectônica cenozoica da região de Manaus e adjacências**. (Tese de Doutorado). Rio Claro – SP.: UNESP, 309p. 2005.

SILVA, V. V. da; SCHUMM, L.; FERREIRA, A. M. M. **Dinâmica da cobertura vegetal na Bacia Hidrográfica do Rio Paquequer, Teresópolis, RJ**. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 7, p. 132-139, 2007.

SILVA, G. M.; BRAGA, D. P.; MOURA, M. T. M.; PINTO, M. K. S. **O geoprocessamento na delimitação da bacia hidrográfica do Rio Cauípe, região metropolitana de Fortaleza - Ceará**. Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS), v. 21, p. 686-695, 2019.

SILVEIRA, C. S.; SILVA, V. V. **Dinâmicas de regeneração, degeneração e desmatamento da vegetação provocadas por fatores climáticos e geomorfológicos: uma análise geoecológica através de SIG**. Revista árvore, v. 34, n. 6, p. 1025-1034, 2010.

SOBRINHO, T. A.; 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.

STRAHLER A.N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. Trans Am Geophys Union n.38, p.913–920, 1957.

UERJ/IBGE. **Estudo ambiental como subsídio à metodologia para o ordenamento territorial através de análise de caso: município de Teresópolis, RJ**. Projeto PADCT Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 1999. 3v.

VIEIRA, A.F.G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. (Tese de doutorado). Florianópolis: UFSC/CFH, 2008.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. **On the effect of DEM accuracy on hydrology and geomorphology models**. Water Resource Research, Washington, v.357, n.7, p.2.259-2.268, 1999.