

ANÁLISE COMPARATIVA DO USO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA DO RIO JAPARATUBA

Acácia Maria Barros de Souza¹, Marcus Aurélio Soares Cruz² & Ricardo de Aragão³

RESUMO --- A aplicação de ferramentas de geotecnologias tem se tornado corrente em estudos de caracterização morfológica de bacias hidrográficas associados à modelagem computacional. A difusão de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) provenientes de sensores remotos contribuiu mais recentemente para esse crescimento. No entanto, muitos dos resultados obtidos com algoritmos de determinação das direções de escoamento sobre esses MDEs são utilizados sem a análise crítica necessária. Neste estudo foi realizada a delimitação da bacia do rio Japaratuba e de cinco sub-bacias, aplicando o algoritmo disponível no programa ArcGIS sobre os MDEs SRTM, TOPODATA e ASTER. Foram determinados então parâmetros físicos, incluindo área, perímetro e comprimentos de drenagem. Os resultados obtidos mostraram que os produtos considerados apresentam grande potencial para caracterização hidrográfica, no entanto todos foram deficientes na delimitação de uma sub-bacia com exutório situado sob vegetação.

ABSTRACT --- The application of geotechnologies have become common in morphological characterization of watersheds associated to computational modelling. The diffusion of Digital Elevation Models (DEM) from remote sensing has contributed to this growth recently. However, many products obtained by applications of flow direction algorithms don't have a rigorous analysis. In this study was performed the delimitation of Japaratuba watershed and five sub-basins, applying the ArcGIS flow direction algorithm on SRTM, TOPODATA and ASTER DEM. It was obtained physic parameters: area, perimeter and drainage length. The results showed that the DEM product from remote sensing have a great potential for watersheds characterization, however, all of DEM studied were inefficient in the delimitation of a sub-basin which its exutory was located under vegetation.

Palavras-chave: modelo digital de elevação, bacias hidrográficas, modelagem hidrológica.

¹ Bolsista de Iniciação Científica Fapitec/Embrapa Tabuleiros Costeiros, Avenida Beira Mar 3250, Jardins, Aracaju-SE. CEP:49025-040. E-mail: acaciaravel30@hotmail.com

² Pesquisador Embrapa Tabuleiros Costeiros, Avenida Beira Mar 3250, Jardins, Aracaju-SE. CEP:49025-040. E-mail: mascruz@cpac.embrapa.br

³ Professor Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil, Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão-SE. CEP:49100-000. E-mail: ricardoaragao@yahoo.com

INTRODUÇÃO

A utilização de ferramentas de sistemas de informações geográficas na caracterização física de bacias hidrográficas tem sido difundida em proporções exponenciais nos últimos anos. Tal crescimento deve-se principalmente à facilidade de obtenção de informações a partir de dados secundários disponibilizados de forma gratuita, associada a uma distribuição acentuada de programas em código aberto com alto grau de desempenho (Buarque et al., 2009; Marques et. al, 2011). A legislação brasileira de recursos hídricos instituiu a bacia hidrográfica como a unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos, estabelecida como o sistema “fechado” de balanço dos processos constituintes do ciclo hidrológico. Assim sendo, a avaliação das alterações sobre estes processos decorrentes de intervenções humanas no uso e cobertura do solo em uma determinada região deve considerar a bacia como o espaço geográfico de ação. Segundo Zeiler (1999) os sistemas de informação geográfica (SIGs) têm como função proporcionar uma estrutura espacial para auxiliar as tomadas de decisões para o uso racional dos recursos naturais e gerenciamento das ações antrópicas sobre estes recursos. Os SIGs constituem-se em um conjunto harmônico composto por uma base de dados, um ou mais softwares que permitam a manipulação de informações e uma interface gráfica para acesso do usuário (Câmara & Queiroz, 2008).

Os SIGs apresentam facilidade para a manipulação de mapas, organização de banco de dados e obtenção de informações geomorfológicas das bacias hidrográficas. Assim, as ferramentas de geotecnologias têm foco de aplicação, por exemplo, nos processos de delimitação de bacias e determinação de caminhos de escoamento, a avaliação de variáveis de cobertura e uso do solo, variabilidade espacial de parâmetros climáticos, identificação de fontes poluidoras significativas e mapeamento de áreas vulneráveis a processos erosivos.

Os produtos de sensoriamento remoto têm destaque dentre as geotecnologias aplicadas em larga escala em estudos de bacias hidrográficas. Este avanço, deve-se dentre outros fatores, aos modelos digitais de elevação (MDE), que até pouco tempo atrás tinham a sua obtenção restrita a técnicas de interpolação a partir de pontos cotados da superfície da Terra, e recentemente tornaram-se produtos também de sensoriamento remoto (Chagas et al, 2010). A principal fonte de MDEs atualmente são os produtos SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), que constituiu-se em um projeto internacional conduzido pela Agencia Espacial Norte-Americana (NASA). As informações, disponibilizadas gratuitamente na internet, são constituídas por dados de altimetria da superfície terrestre para as regiões compreendidas entre as latitudes 56° N e 60,25° S, em uma resolução espacial aproximada de 90 m (3 arc-segundos). Estes produtos foram obtidos a partir do sistema de radar instalado a bordo do ônibus espacial Endeavour, que realizou durante 11 dias, em fevereiro de

2000, a varredura da superfície do planeta, cobrindo aproximadamente 80% de toda a superfície de terra (NASA, 2010).

A partir de dados SRTM, foi elaborado o Projeto TOPODATA, que se constituiu em um refinamento do MDE original, alterando a resolução espacial original de 90 m para 30 m, por meio da aplicação de processos geoestatísticos (krigagem) (Valeriano e Rosseti, 2009). Os dados resultantes do projeto podem ser obtidos gratuitamente por meio de download na internet (<http://www.dpi.inpe.br/topodata/data/grd/>).

As imagens GDEM (Global Digital Elevation Model) provenientes do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), constituem-se também em fontes bastante utilizadas na produção de MDEs. Os produtos são disponibilizados pelo USGS (United States Geological Survey). Trata-se de cenas de altimetria produzidas a partir das bandas 3 N (Nadir) e 3 B (Back) de uma imagem ASTER Nível-1A, obtida pelo sensor no infravermelho próximo (0.78 a 0.86 micrometros). Este sensor é composto por dois telescópios independentes que permitem a produção dos dados estereoscópios. Os produtos finais possuem extensão de 60 km e resolução espacial de 1 arc-segundo, resultando em células de aproximadamente 30 m (USGS, 2010). Apesar da melhor discretização espacial, esses produtos apresentam, em geral, um nível de ruído superior ao SRTM, uma vez que sofrem a influência da presença de nuvens nas respostas radiométricas, ocasionando a ocorrência de picos e depressões de dimensões excessivas (Chagas et al., 2010). As cenas ASTER podem ser obtidas também na internet no endereço <https://wist.echo.nasa.gov/api/>, mediante cadastro simplificado e determinação da área de interesse, sem nenhum custo.

Uma crítica comum aos MDEs oriundos de alguns produtos de sensoriamento remoto reside no fato de que estes representariam, na grande maioria das vezes, modelos digitais de superfície e não de elevação, devido a dificuldades de penetração das ondas recebidas pelo sensor nas camadas de cobertura do solo, como no caso de vegetação fechada, por exemplo. As informações do SRTM, por exemplo, apesar de caracterizar-se como um sensor ativo, o comprimento de onda utilizado pelo radar na varredura da superfície, possui baixa capacidade de penetração em alvos com vegetação intensa, o que impede muitas vezes a determinação da altimetria mais próxima de valores obtidos em campo, incluindo, por exemplo, as alturas da vegetação ou intermediárias nos seus valores (Hofton et al., 2006). Tal fato pode ocasionar problemas na utilização dos MDEs para diversas atividades relacionadas à produção de informação em bacias hidrográficas, incluindo, imprecisões nas direções de fluxo e por conseqüência, nas áreas contribuintes aos pontos de controle. A Figura 1 apresenta um exemplo das diferenças altimétricas em MDEs obtidos por SRTM em áreas abertas e com a presença de vegetação (floresta) em uma região do Arizona (EUA). Observa-se a maior proximidade do perfil obtido do SRTM (linha vermelha) com o perfil natural do terreno (linha azul)

nas áreas desprovidas de florestas, enquanto nas áreas cobertas há um aumento médio de cerca de 20 m nos valores de cotas altimétricas (Jacobsen, 2006).

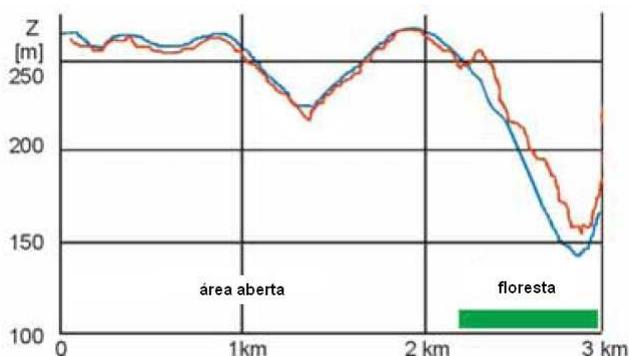


Figura 1 – Exemplo da influência da cobertura vegetal no MDE obtido a partir de dados SRTM (Adaptado de Jacobsen (2006))

As macrobacias hidrográficas no Estado de Sergipe apresentam-se em diferentes estágios de degradação resultantes de atividades agrícolas, extrativistas, urbanas e industriais, que promovem alterações significativas nos processos hidrológicos e na qualidade das águas dos rios do Estado. A caracterização morfométrica destas bacias associada aos usos e cobertura do solo preponderantes, constituem-se em pré-requisitos indispensáveis para o adequado processo de gestão dos recursos hídricos e planejamento de estratégias de manejo dos solos. Nestas atividades a aplicação de geotecnologias vem representando ganhos significativos de tempo e economia de recursos públicos.

A bacia do rio Japarutuba mostra-se como singular nesta situação, pois apresenta o rio principal de mesmo nome, com processos de degradação avançados em alguns trechos, resultado de avanços históricos nas atividades agropecuárias, de extração mineral e despejos industriais sem o devido controle. Esta bacia possui uma importância estratégica para o estado de Sergipe, pois abriga o maior campo petrolífero terrestre do país, o campo de Carmópolis, com mais de 150km² e 1.200 poços, que faz uso da porção inferior do rio Japarutuba para o despejo das águas residuárias do processo de exploração, causando alterações significativas na biota do rio, resultado da presença de metais na água e no sedimento.

Este estudo objetivou realizar uma análise comparativa do desempenho de MDEs gratuitos na obtenção automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas em escalas diferentes, submetidas a um mesmo algoritmo.

MATERIAIS E MÉTODO

O estudo foi desenvolvido na bacia do rio Japarutuba em Sergipe, localizado entre as coordenadas geográficas 37°19' O, 10°13' S e 36°47' O, 10°47' S, que se constitui na menor bacia

principal em extensão territorial, com cerca de 1.700 km², o que representa aproximadamente 7,8% da área do Estado de Sergipe e é totalmente contida pelos limites deste.

O rio Japarutuba tem aproximadamente 92 km de extensão, nasce na Serra da Boa Vista, na divisa entre os municípios de Feira Nova e Graccho Cardoso, e deságua no Oceano Atlântico, no município de Pirambu. A vazão média do rio Japarutuba é da ordem de 11,0 m³/s e a mínima (Q_{7,10}) de 0,22 m³/s, o que demonstra o baixo potencial hídrico da bacia, caracterizando-a como uma bacia com deficiência hídrica (JICA/SEPLANTEC, 2000). Apesar da sua baixa disponibilidade hídrica, os usos múltiplos da água superficial apresentam-se intensos na bacia, destacando-se a utilização da água nas atividades de exploração mineral, principalmente de petróleo/gás e potássio, abastecimento humano e irrigação.

A população residente na bacia é de aproximadamente 92.200 habitantes, o que representa 5,6% da população do Estado, dos quais cerca de 61% moram nas parcelas urbanas de municípios como Capela, Japarutuba, Carmópolis, Rosário do Catete e Siriri, entre outros.

O limite noroeste da bacia é atingido pelo Polígono das Secas, abrangendo cerca de 13% da área total da bacia. A precipitação na bacia apresenta valores anuais médios de 1.270mm, com cerca de 900mm/ano na sua porção extrema noroeste e 1.500mm/ano junto à sua foz.

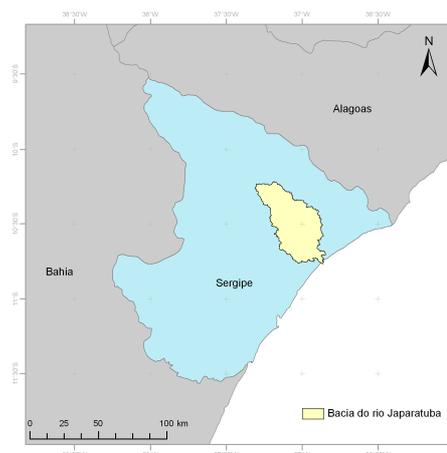


Figura 2 – Localização da bacia do rio Japarutuba no Estado de Sergipe

A aplicação de ferramentas de geotecnologias foi realizada por meio do software ArcGIS versão 9.3 (ESRI, 2010) e objetivou caracterizar a bacia fisicamente, utilizando funções do módulo *Spatial Analyst - Hydrology*. A partir dos Modelos Digitais de Elevação para a região, obtidos de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) segundo produtos refinados por Miranda (2005), TOPODATA (Valeriano e Rosseti, 2009) e ASTER (USGS, 2010), foram extraídas informações úteis para os processos de simulação hidrológica, incluindo área, perímetro e comprimentos de redes de drenagem. Comparativamente, foram realizadas as delimitações das sub-bacias avaliadas também de forma manual, utilizando cartas planialtimétricas na escala 1:100000 (SUDENE, 1974).

Para a verificação das redes de drenagem nas sub-bacias, fez-se uso do mapeamento disponível para todo o Estado de Sergipe que apresenta o levantamento da hidrografia nas bacias locais, realizado a partir de imagens SPOT com 5,0m de resolução espacial (SERGIPE, 2011).

O principal algoritmo utilizado no módulo *Hydrology* do ArcGIS é o de determinação da direção de fluxo (*Flow Direction*), que é baseado na metodologia apresentada por Jenson e Domingue (1988). Segundo este algoritmo, a direção de fluxo é determinada pela direção de maior desnível célula-a-célula, ou seja, o algoritmo avalia a distância centro-a-centro da célula avaliada com relação às adjacentes, realiza a subtração entre os valores de cotas altimétricas, divide estes valores entre si e seleciona a direção que apresente o maior resultado. Caso não seja escolhida uma célula adjacente, o algoritmo avança para avaliar demais células do entorno, até que uma direção seja determinada. A direção de fluxo é então obtida para todo o MDE na forma de uma nova matriz (*raster*), onde cada célula armazena um valor correspondente à direção escolhida, segundo é apresentado na Figura 3A e exemplificado na Figura 3B. Esse *raster* é então utilizado para a acumulação das áreas contribuintes e delimitação de bacias.

Conforme se observa, pequenas alterações em valores das células podem provocar alterações significativas nas direções de fluxo obtidas pelo algoritmo. Estas alterações podem ocorrer em MDEs produzidos a partir de sensoriamento remoto, principalmente pela interferência da vegetação que localiza-se próxima aos caminhos de drenagem.

A aplicação do algoritmo acima descrito traz consigo algumas limitações, relacionadas às deficiências dos MDEs utilizados nos processos de delimitação de bacias contribuintes. No entanto considera-se que todos os MDEs estarão sujeitos às mesmas condições do algoritmo, portanto a análise comparativa pode ser realizada.

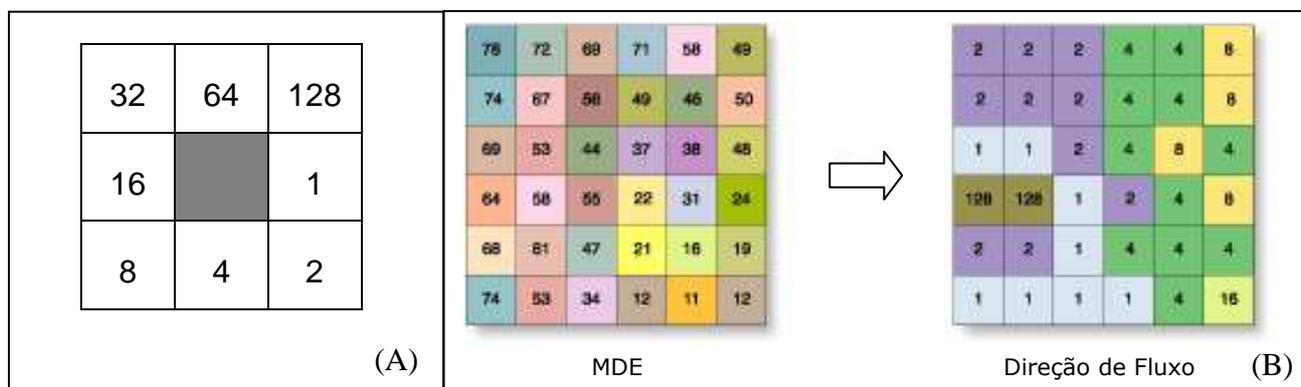


Figura 3 – Processo de determinação das direções de fluxo (Jenson e Domingue, 1988). (A) Numeração padronizada para cada direção de fluxo. (B) Exemplo de geração de matriz de direção de fluxo a partir de MDE.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir de dados SRTM (resolução espacial de 90 m), TOPODATA (30 m) e ASTER (30 m) foi realizada a delimitação da bacia do rio Japaratuba e das 5 sub-bacias contribuintes aos postos de monitoramento fluviométrico em operação, por meio do módulo *Hydrology* presente na extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS. Para SRTM, foi utilizado o recorte da cena SC24ZB (Miranda, 2005), para TOPODATA, a cena 10_375ZN e para ASTER um mosaico resultante das imagens S11W037 e S11W038 (USGS, 2010). Todos os MDEs foram recortados pelo retângulo envolvente da área de estudo. O MDE ASTER foi submetido ainda a um processo de correção por meio da passagem de filtros para a eliminação dos ruídos presentes na imagem original. A Figura 4 apresenta os três MDEs utilizados com a indicação dos postos fluviométricos existentes na bacia.

Os três MDEs, foram submetidos então ao processo de preenchimento de depressões (Comando *Fill*), bem como geração do mapa de direção de fluxo (Comando *Flow Direction*). A partir do mapa de direção de fluxo produziu-se o mapa de fluxo acumulado (Comando *Flow Accumulation*) e, na seqüência, foram definidos limites das bacias contribuintes (Comando *Basin*). A partir de pontos georreferenciados, com coordenadas obtidas por GPS em campo, foram determinados os limites das sub-bacias contribuintes aos postos fluviométricos existentes (comando *Watershed*). Realizados os passos, os polígonos de cada sub-bacia foram obtidos, partindo-se para a determinação dos valores de parâmetros físicos comparativos. A determinação dos valores de área e perímetro das bacias foi realizada por meio do uso da ferramenta *Measure* do ArcGIS, a partir da conversão dos produtos de matrizes para vetores. A obtenção dos valores de comprimentos de drenagem foi realizada por meio da vetorização dos caminhos obtidos nas matrizes e posterior cálculo de *Length* nas tabelas de atributos com utilização de linguagem VBA. Buscou-se neste parâmetro determinar para cada MDE o número de células mínimo para considerar o início do caminho de drenagem, de forma a representar adequadamente o início dos caminhos existentes no levantamento disponível no Estado.

Antes de analisar os resultados finais, vale citar que todos os MDEs utilizados foram, com o algoritmo aplicado, incapazes de delimitar adequadamente a bacia do rio Japaratuba. Tal afirmação reside no fato de uma área localizada na porção nordeste da bacia, correspondendo a 34 km² aproximadamente, ter sido direcionada para fora da bacia, conforme pode ser observado na Figura 5. Acredita-se que tal ocorrência deveu-se a existência de cobertura vegetal intensa em um ponto de equivalência de cotas altimétricas entre a bacia do rio Japaratuba e a do rio São Francisco, onde, coincidentemente a linha drenagem aproxima-se do divisor de águas real, provocando a falha do algoritmo. Desta forma, foi realizada uma adequação em todos os MDEs, corrigindo as cotas para

valores de superfície do solo, para que neste local, o correto direcionamento das águas fosse detectado pelo algoritmo.

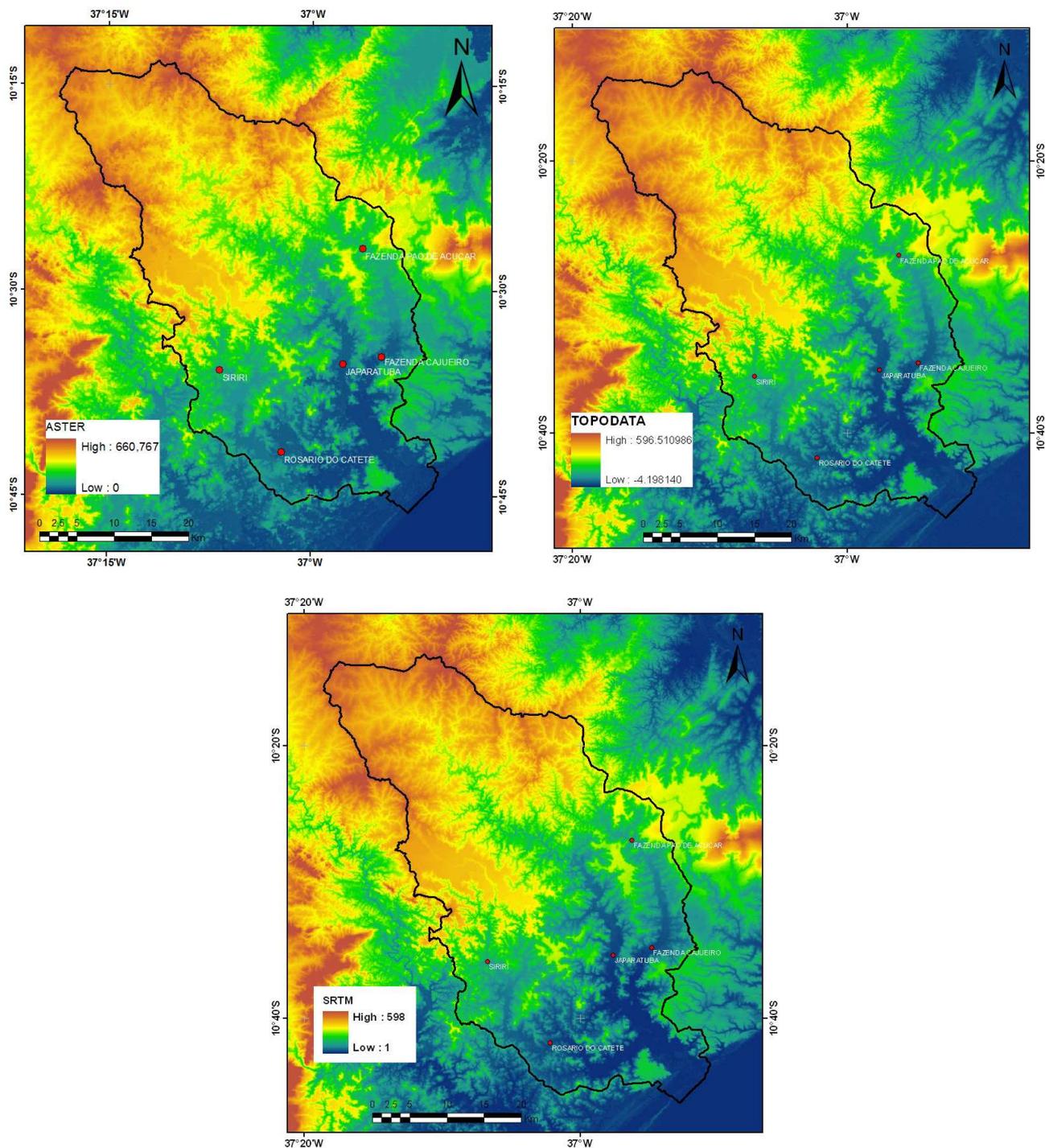


Figura 4 – Modelos Digitais de Elevação com a localização dos postos fluviométricos disponíveis na bacia do rio Japarutuba. (A) ASTER, (B) TOPODATA, (C) SRTM.

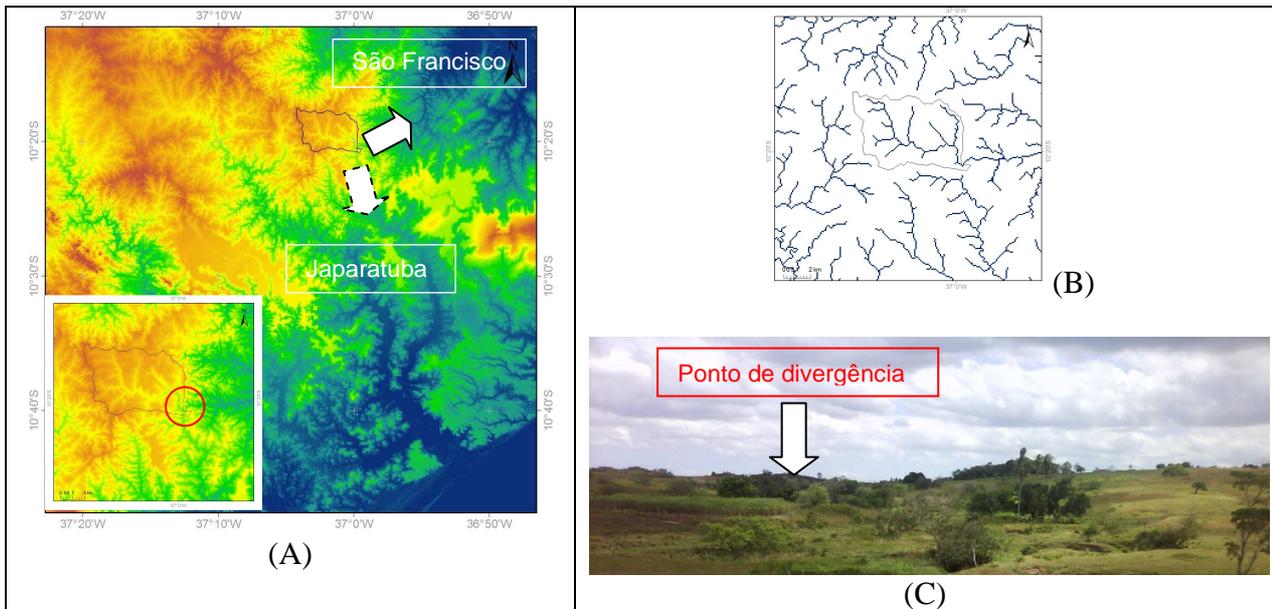


Figura 5 – Falha na delimitação da bacia do rio Japarutuba. (A) Sub-bacia contribuinte erroneamente à bacia do rio São Francisco; (B) Recorte da sub-bacia com indicação do ponto de divergência do fluxo; (C) Fotografia do local obtida em visita de campo.

As delimitações de bacias obtidas estão apresentadas para os MDEs e a manual nas Figuras 6 a 8. Observa-se boa proximidade na maioria dos resultados obtidos, considerando os MDEs entre si e com a delimitação manual. Excetua-se neste caso a região mais próxima a foz do rio Japarutuba (Figura 8 – B), onde as cotas altimétricas das células têm valores próximos em longas extensões, gerando inconsistências nos resultados do algoritmo aplicado, principalmente para TOPODATA.

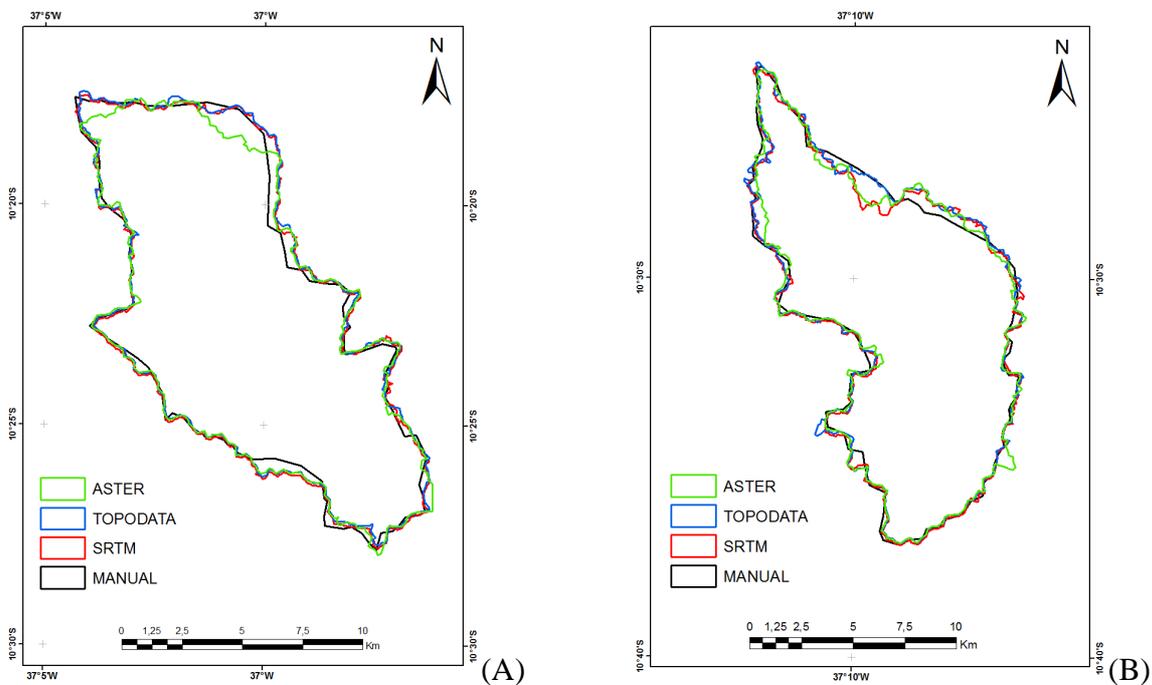


Figura 6 – Comparação visual entre os produtos obtidos pela delimitação automática de sub-bacias na bacia do rio Japarutuba. (A) Estação Pão de Açúcar, (B) Estação Siriri.

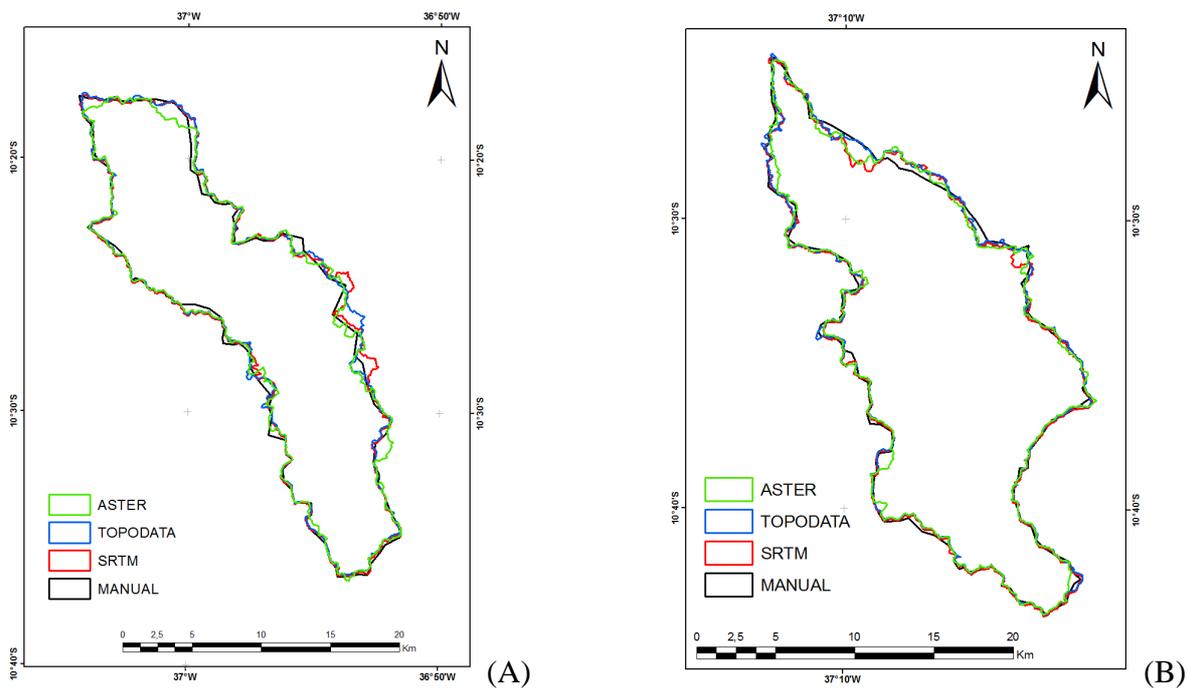


Figura 7 – Comparação visual entre os produtos obtidos pela delimitação automática de sub-bacias na bacia do rio Japarutuba. (A) Estação Faz. Cajueiro, (B) Estação Rosário do Catete.

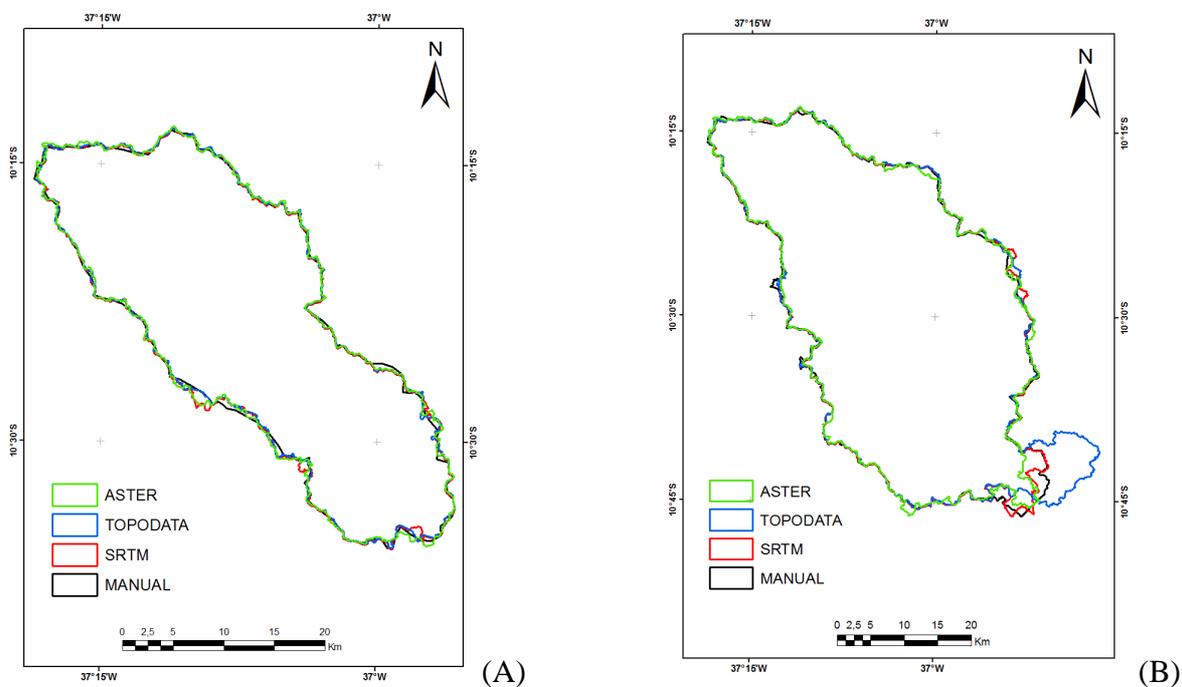


Figura 8 – Comparação visual entre os produtos obtidos pela delimitação automática de sub-bacias na bacia do rio Japarutuba. (A) Estação Japarutuba, (B) Bacia do rio Japarutuba.

Avaliando os resultados obtidos para “área”, apresentados na Tabela 1, verifica-se que a variação entre os MDEs foi baixa, com diferenças médias absolutas de 1,5% para ASTER, 1,5% para TOPODATA e 1,3% para SRTM, comparativamente aos valores obtidos manualmente. Esta dimensão de erro permitiria avaliar o processo como excelente, em virtude da economia de tempo e trabalho obtidos. No entanto não se pode afirmar isso de forma efetiva, em virtude dos ajustes que tiveram que ser realizados nos MDEs, conforme já comentado anteriormente.

Observa-se ainda que não se apresentou um padrão com relação a superestimação ou subestimação nos valores de área, variando aparentemente de forma aleatória. Neste caso o processo deve estar sendo influenciado por outras variáveis, como declividade entre as células, por exemplo. Deveria ser esperada ainda, uma melhora na estimativa com o aumento da área da bacia, no entanto tal expectativa não se verificou. Acredita-se que a presença de áreas excessivamente planas nos MDEs, gerando o descarte de áreas contribuintes e/ou o acréscimo de áreas não-contribuintes à bacia, como na região próxima ao exutório da bacia do rio Japaratuba no MDE TOPODATA, por exemplo, tenha influenciado seriamente o algoritmo de delimitação.

Tabela 1 – Quadro comparativo de áreas obtidas a partir dos processos estudados para as sub-bacias e bacia do rio Japaratuba

Área contribuinte (km²)						
	Pão de Açúcar	Siriri	Fazenda Cajueiro	Rosário	Posto Japaratuba	Bacia Japaratuba
MANUAL	132,4	149,7	276,9	311,0	733,0	1674,3
ASTER	132,6	146,7	274,0	301,9	739,3	1644,2
TOPODATA	136,9	151,1	280,2	310,3	731,8	1724,0
SRTM	137,9	149,3	281,2	308,1	734,4	1685,1
Porcentagem de erro						
	Pão de Açúcar	Siriri	Fazenda Cajueiro	Rosário	Posto Japaratuba	Bacia Japaratuba
MANUAL	-	-	-	-	-	-
ASTER	0,2%	-2,0%	-1,0%	-2,9%	0,9%	-1,8%
TOPODATA	3,4%	0,9%	1,2%	-0,2%	-0,2%	3,0%
SRTM	4,1%	-0,2%	1,6%	-0,9%	0,2%	0,6%

Para o perímetro, observou-se uma superestimação em todas as bacias, esta sim já esperada, pois o traçado manual executa menos curvaturas que o processo automático naturalmente faz, em virtude da resolução da célula do MDE. Assim este parâmetro aumentou com o aumento da resolução espacial, ou seja, o perímetro tem maiores valores de acordo com a redução do tamanho da célula do MDE. Assim, as diferenças médias absolutas com relação ao traçado manual foram de 6,9% para o MDE ASTER; 6,0% para TOPODATA e 3,4% para SRTM. Neste parâmetro, observou-se uma tendência a redução do erro com aumento da área da bacia, partindo de um valor médio de 7,0% para bacias pequenas, para 2,5% para bacias maiores. Tal fato retrata a influência da

escala de trabalho no processo de delimitação manual, onde o detalhamento em bacias pequenas é aumentado segundo a resolução espacial do MDE.

Tabela 2 – Quadro comparativo de perímetros obtidos a partir dos processos estudados para as sub-bacias e bacia do rio Japaratuba

Área contribuinte (km ²)						
	Pão de Açúcar	Siriri	Fazenda Cajueiro	Rosário	Posto Japaratuba	Bacia Japaratuba
MANUAL	62,2	66,2	106,9	106,9	144,7	233,5
ASTER	71,7	82,5	130,7	128,0	183,1	280,5
TOPODATA	70,2	81,9	123,7	127,6	172,6	287,4
SRTM	65,9	76,7	115,4	118,7	160,9	256,2
Porcentagem de erro						
	Pão de Açúcar	Siriri	Fazenda Cajueiro	Rosário	Posto Japaratuba	Bacia Japaratuba
MANUAL	-	-	-	-	-	-
ASTER	7,2%	10,9%	8,6%	6,8%	5,2%	2,8%
TOPODATA	6,0%	10,5%	6,0%	6,6%	3,8%	3,2%
SRTM	2,8%	7,0%	3,1%	3,8%	2,2%	1,4%

A Figura 9 apresenta um recorte dos caminhos de drenagem determinados pelos MDEs comparados aos traçados oficiais disponíveis no Estado. Observa-se que em virtude da resolução dos MDEs, estes não permitiram a representação detalhada que a informação utilizada como base de comparação apresenta, com a representação de todos os meandros ao longo de vários trechos dos cursos d'água nas bacias estudadas, diferentemente do detalhamento obtidos pela delimitação manual das bacias. Isso gerou resultados muito ruins, com subestimação acentuada em todas as escalas de avaliação. O MDE SRTM, por apresentar resolução espacial mais baixa (90 m), apresentou os piores resultados com subestimação de comprimentos da ordem de cinco vezes.

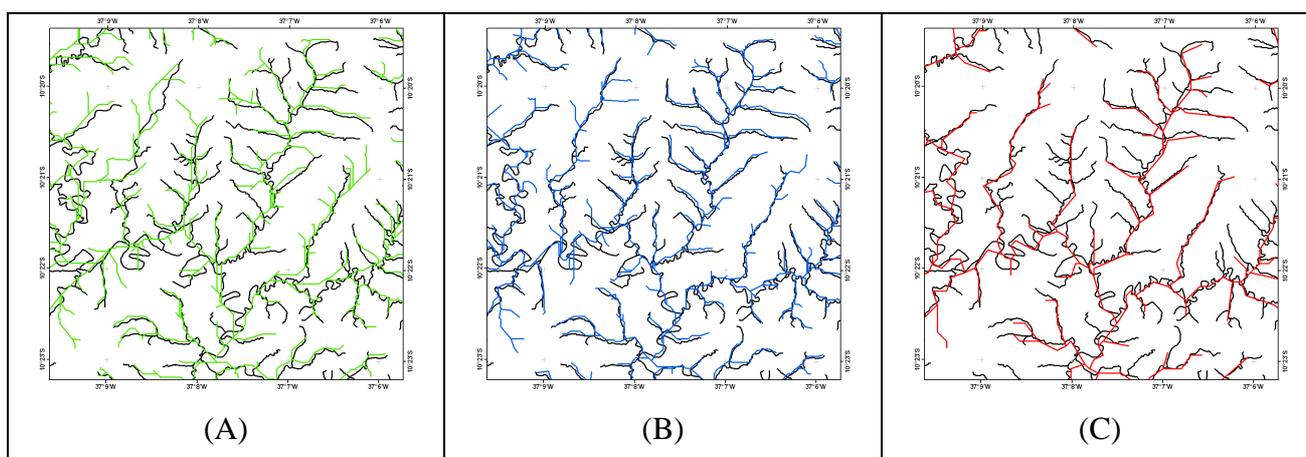


Figura 8 – Região exemplo de caminhos de drenagem obtidos pela determinação automática em MDEs e a informação disponibilizada (em cor preta) na bacia do rio Japaratuba. (A) ASTER, (B) TOPODATA, (C) SRTM.

A Tabela 3 apresenta a compilação dos valores obtidos bem como os erros cometidos na análise decorrentes do uso dos MDEs. Observou-se ainda que a seleção do limite mínimo a partir do qual inicia-se a formação do caminho de drenagem tem muita influência sobre a quantificação deste parâmetro e que o seu critério de seleção deve ter maior aprofundamento em trabalhos futuros, não se restringindo a comparação visual com mapas disponíveis.

Tabela 3 – Quadro comparativo de perímetros obtidos a partir dos processos estudados para as sub-bacias e bacia do rio Japaratuba

Área contribuinte (km²)						
	Pão de Açúcar	Siriri	Fazenda Cajueiro	Rosário	Posto Japaratuba	Bacia Japaratuba
MANUAL	887,2	668,5	1320,0	1440,0	3972,9	7451,8
ASTER	296,1	340,9	629,0	686,8	1680,6	3770,9
TOPODATA	289,8	341,1	603,6	681,3	1499,3	3729,2
SRTM	175,9	190,2	368,7	399,1	954,8	2250,1
Porcentagem de erro						
	Pão de Açúcar	Siriri	Fazenda Cajueiro	Rosário	Posto Japaratuba	Bacia Japaratuba
MANUAL	-	-	-	-	-	-
ASTER	-446,3%	-218,9%	-249,6%	-242,2%	-312,7%	-219,9%
TOPODATA	-451,1%	-218,7%	-258,8%	-244,0%	-337,5%	-222,3%
SRTM	-537,1%	-319,5%	-343,6%	-334,7%	-411,8%	-310,7%

Observa-se um grande potencial do uso de geotecnologias por meio de produtos oriundos de sensores remotos ativos e passivos para a caracterização de bacias hidrográficas, no entanto há que se reforçar a necessidade de acurácia na interpretação dos resultados obtidos pelos algoritmos existentes, não dispensando a visita ao local de estudo e a busca de outras fontes de informações.

Os resultados obtidos alertam também para a necessidade de avaliação de performance de outros algoritmos para o traçado automático de caminhos de drenagem, que atuem de forma mais efetiva em regiões de baixa declividade do terreno.

CONCLUSÕES

1. A partir de Modelos Digitais de Elevação obtidos de sensores remotos foi possível a delimitação da bacia e de sub-bacias do rio Japaratuba em Sergipe;
2. Foram determinadas de forma satisfatória as áreas das bacias estudadas, com erro médio absoluto de área 1,5% para ASTER, 1,5% para TOPODATA e 1,3% para SRTM;
3. Os perímetros das bacias foram determinados também de forma satisfatória, com erro médio absoluto de 6,9% para o MDE ASTER; 6,0% para TOPODATA e 3,4% para SRTM;
4. Todos os MDEs foram deficientes na estimativa dos comprimentos de drenagem, no entanto deve-se reavaliar os critérios utilizados para trabalhos futuros;

5. Os MDEs foram deficientes para a delimitação correta de uma sub-bacia cujo exutório situava-se em região de cobertura vegetal intensa;
6. Há a necessidade da utilização com cautela de tais produtos, sempre com suporte de outras fontes de informação.

BIBLIOGRAFIA

BUARQUE, D.C., FAN, F.M., PAZ, A.R., COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 14, N. 2, 2009. ABRH. p. 91-103.

CÂMARA, G.; QUEIROZ, G.R. Arquitetura de sistemas de informações geográficas. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. *Introdução à ciência da geoinformação*. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 4 jul. 2008.

CHAGAS, S.C., FERNANDES FILHO, E.I., ROCHA, M.F., CARVALHO JÚNIOR, W., SOUZA NETO, N.C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V.14, n.2, p.218-226, 2010.

ESRI. *ArcGIS desktop help*. V. 9.1. Disponível em: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.1/index.cfm>. Acesso em: 15 de jun. 2010.

JACOBSEN, K. SRTM Height Models. *GEOconnexion International Magazine*. July/August, 2006.

JENSON S. K. AND J. O. DOMINGUE. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593-1600. 1988.

JICA/SEPLANTEC. *Estudo sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos no Estado de Sergipe na República Federativa do Brasil*. Japan International Cooperation Agency. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia. Aracaju. 2000.

MARQUES, H.G., PENATTI, N.C., PARANHOS FILHO, A.C., FROELICH, O., ALMEIDA, T. I. R., SHIMABUKURO, Y. Comparação entre os modelos de elevação SRTM, TOPODATA e ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. *Anais.XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE. Curitiba, 2011.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 27 ago. 2009.

NASA. *Shuttle Radar Topography Mission*. Mission to Map the World. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acesso em: 15 de jul. 2010.

ROCHA, J.C.S., CORREIA, C.O., ROCHA, C.L. Bacia hidrográfica do rio Japarutuba: uma visão da gestão de recursos hídricos frente ao uso e ocupação da terra. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE. 2., 2009, Aracaju. *Anais...* Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2009.

SERGIPE. Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe. Versão 2011.1. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Aracaju, SE. 2011. DVD-ROM.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Japarutuba: SC.24-Z-B-V. Aracaju, 1974. 1 mapa. Escala 1:100.000. 1974.

USGS. *Global Digital Elevation Model*. Land Processes Distributed Active Archive Center. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov>. Acesso em: 10 de jul. 2010.

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2009.

ZEILER, M. *Modeling our real world – The ESRI guide to geodatabase design*. Califórnia: Published by Environmental Systems Research Institute, 1999. 202p.