



Produtos SRTM e RTC na caracterização morfométrica e topográfica: uma abordagem comparativa

Roberto FILGUEIRAS^{1*}, Maria Camila Alves RAMOS¹, Rayssa Balieiro RIBEIRO¹,
Tarcila Neves GENEROSO¹, Andreína Epifânia DÁVILA², Juliana Dias Lopes GALVÃO³

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

²Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil,

³Agência Nacional de Águas, Brasília, DF, Brasil.

*E-mail: betofilgueiras@gmail.com

Recebido em março/2017; Aceito em julho/2017.

RESUMO: Os modelos digitais de elevação (MDE) representam produtos comuns para extração de informações de bacias hidrográficas. Neste trabalho, comparou-se produtos provenientes do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e do RTC (*Radiometrically Terrain-Corrected*) no que se refere à obtenção de características morfométricas e topográficas da bacia do rio Paraopeba, MG. Como fonte de referência e comparação para a delimitação da hidrografia e da bacia, utilizou-se dados mapeados adquiridos da ANA (Agência Nacional de Águas). Após a aquisição e processamento das imagens, procederam-se as análises qualitativas e quantitativas dos resultados. Verificou-se que os resultados obtidos das imagens foram semelhantes para todos os parâmetros morfométricos avaliados, tendo apresentado diferenças mais expressivas apenas em relação aos valores obtidos com a base de dados mapeados. Quanto às características topográficas consideradas, também foram obtidos resultados similares entre os dois produtos, constatando-se um ganho nos aspectos área, perímetro, declividade e sombreamento devido ao refinamento dos dados RTC em relação ao SRTM. Concluiu-se que ambos os produtos são aptos a serem aplicados em estudos relacionados à hidrologia, tanto para os parâmetros morfométricos, quanto para os topográficos, visto que os resultados do RTC foram similares aos do SRTM já amplamente aplicado na literatura.

Palavra-chave: geoprocessamento, modelo digital de elevação, bacia hidrográfica.

SRTM and RTC products in the topological and morphometric characterization: a comparative approach

ABSTRACT: Digital elevation models (MDE) represent trivial products for extracting information from river basins. The objective of this work was to compare the products from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) and RTC (Radiometrically Terrain-Corrected) with regard to obtaining morphometric and topographic characteristics of the Paraopeba river basin, MG. A mapped data acquired from ANA (National Water Agency) was used as reference and comparison source for hydrographic and basin delineation. After the acquisition and processing of the images, the qualitative and quantitative analysis of the results were carried out. It was verified that the results obtained from the images were similar for all morphometric parameters evaluated, presenting difference more expressively only in relation to the values obtained with the mapped database. As for the topographic characteristics considered, similar results were also obtained between the two products, showing a small difference in area, perimeter, declivity and shading aspects, due to the refinement of RTC data in relation to SRTM. It was concluded that both products are apt to be applied in studies related to hydrology, both for morphometric and topographic parameters, since the results of the RTC were similar to the SRTM, that is widely applied in the literature.

Keywords: geoprocessing, digital elevation model, hydrographic basin.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos digitais de elevação (MDE) são uma representação matricial da superfície, na qual cada pixel da imagem assume um valor de elevação referente à média da altitude correspondente a toda a área do pixel. Esses modelos são obtidos, atualmente, por meio da interpolação de curvas de nível extraídas de uma carta topográfica ou através de imagens de sensores remotos (OLIVEIRA et al., 2010).

Os MDE representam um dos produtos mais comuns para extração de informações topográficas e da superfície (BOLCH et al., 2005) de maneira contínua. Em razão desse potencial, a utilização dos MDE nos sistemas de informações

geográficas (SIG) têm-se tornado cada vez mais frequentes, com destaque para estudos de modelagem hidrológica (MAGESH et al., 2013; GOULDEN et al., 2016).

Nos países em desenvolvimento, a falta de dados topográficos para grandes extensões geralmente dificulta a modelagem topográfica (VALERIANO et al., 2015). No Brasil a fonte de dados mais comumente utilizada para geração dos MDE são as curvas de nível e, de maneira complementar, a hidrografia mapeada obtida em cartas topográficas. Todavia, geralmente, as escalas desses dados não são apropriadas para estudos mais detalhados, e, devido a isso, observa-se uma crescente utilização de dados

provenientes de imagens de sensores remotos para geração desses modelos (CHAGAS et al., 2010).

De acordo com Seyler et al. (2009) as informações extraídas de um MDE podem variar expressivamente dependendo de suas características, como escala, resolução e origem (interpolação espacial). Os MDE gerados a partir de sensoriamento remoto como os da plataforma ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) e os provenientes da missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) são utilizados por diversos pesquisadores nacionais e internacionais para as modelagens e extração de informações do terreno (TSIMI; GANAS, 2015; KAWABATA; BANDIBAS, 2009; HUGGEL et al., 2008; HAYAKAWA et al., 2010; FRAU et al., 2011). Porém, tanto os produtos provenientes do ASTER quanto do SRTM possuem resolução espacial de 30 metros, o que, por vezes, pode limitar seu uso, devido à tendência de simplificação das características da superfície.

Neste contexto, é de capital importância a disponibilidade de dados altimétricos com uma resolução mais detalhada, a fim de elevar a capacidade e a precisão das modelagens que utilizam fontes do relevo como dados de entrada. Nesse sentido, é relevante destacar a disponibilidade de dados provenientes da plataforma ALOS (Advanced Land Observing Satellite) sensor PALSAR (Phase Array type L-band Synthetic Aperture Radar), o qual oferece gratuitamente, por meio do produto RTC (**Radiometrically Terrain-Corrected**), dados altimétricos com 12,5 metros de resolução espacial. Esse produto é um projeto do Alaska Satellite Facility, que disponibiliza dados SAR (Synthetic Aperture Radar) corrigidos no âmbito geométrico e radiométrico e permite acessibilidade a esse produto, no formato *Geotiff*, para comunidade internacional.

Visto a importância do detalhamento das informações do relevo para a obtenção de informações derivadas dos MDE, o trabalho teve como objetivo comparar e analisar dados do SRTM e dados provenientes do RTC entre si e com a hidrografia mapeada, no que se refere à obtenção de características morfométricas e topográficas de uma bacia hidrográfica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado para a região da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, a qual está localizada no sudeste do estado de Minas Gerais (Figura 1). Esse rio é um dos principais afluentes do rio São Francisco, com área de drenagem de aproximadamente 13.643 km², que corresponde a cerca de 2,5% do estado de Minas Gerais (MATOS; DIAS, 2012).

2.2. Aquisição de dados

As imagens de elevação foram adquiridas em duas plataformas online, a *Earthexplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), para as imagens SRTM, e a *Alaska Satellite Facility* (<https://www.asf.alaska.edu/>), para as imagens RTC, sendo para o acesso a ambas as plataformas necessário um cadastro prévio.

Visto a extensão da bacia trabalhada nesse estudo, houve a necessidade de utilização de sete imagens SRTM e nove imagens RTC (Figura 2), de forma a garantir a representatividade de toda a área de contribuição do rio Paraopeba.

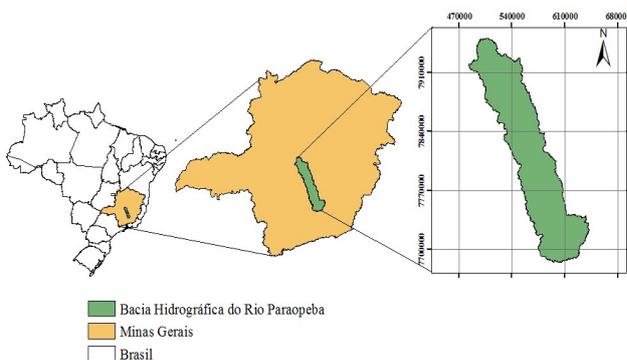


Figura 1. Localização geográfica da bacia do rio Paraopeba.
Figure 1. Geographical location of the Paraopeba river's basin.

Para comparação da hidrografia e da bacia hidrográfica geradas com base nas imagens de elevação, também foram utilizados arquivos mapeados em formato vetorial disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) na escala de 1:1.000.000 (<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=4100>).

Com intuito de analisar os dados gerados pelos produtos SRTM, RTC e os mapeados, foram adquiridos produtos de reflectância proveniente do satélite Sentinel-2A. As imagens Sentinel-2A foram utilizadas por serem disponibilizadas gratuitamente e apresentarem vantagens como maior largura de faixa (290 km) e maior resolução espacial (10 m).

2.3. Processamento de imagens

O software utilizado para o manuseio e processamento das imagens foi o ArcGis, de modo que o primeiro passo adotado foi a conversão do sistema de referência das imagens SRTM, RTC e Sentinel-2A de WGS-84, com coordenadas geográficas de latitude e longitude para o Datum SIRGAS 2000, projeção UTM (Universal Transversor de Mercator) zona 23 S. Esse mesmo sistema de referência de coordenadas foram adotados para a base de dados da ANA.

Após a reprojeção das imagens, foram montados os mosaicos correspondentes à área de estudo. Posteriormente, seguiram-se diversos procedimentos a fim de transformar os MDE em MDEHC (Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado).

A primeira etapa consistiu na remoção das depressões espúrias, para evitar que o escoamento superficial da bacia hidrográfica fosse direcionado para depressões inexplicáveis presentes nas imagens. Posteriormente, foi executada a direção de fluxo de escoamento da água, com o objetivo de definir o comportamento da água perante os pixels. A partir de então, calculou-se o fluxo acumulado, ou seja, o somatório de células a montante que estão contribuindo para cada célula, sendo para isso necessária a indicação do número de células que deve distinguir o que é componente da hidrografia. O número de células definido para os MDE foi igual a 50.000 para as imagens RTC e 8.680 para as imagens SRTM, os quais foram definidos a partir de uma comparação com a hidrografia mapeada e da relação da resolução espacial entre os produtos SRTM e RTC.

Estabelecidos os locais em que o escoamento tende a ocorrer, fizeram-se as possíveis correções na hidrografia. É importante executar essa etapa para diminuir a possibilidade de erros em situações que o fluxo ocorre em áreas planas, o que pode fazer com que o SIG interprete que nesse local

ocorram dois segmentos de rio, e assim prejudicar a análise. Ao final desses processos, a hidrografia em formato raster foi convertida em um vetor tipo linha.

De posse das hidrografias para ambos os produtos iniciais, delimitou-se a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, a partir da prévia identificação da sua foz por meio de um processo automático. Definidos os limites topográficos da área de estudo, deu-se início a extração dos valores para análise dos resultados obtidos por meio das imagens SRTM e RTC.

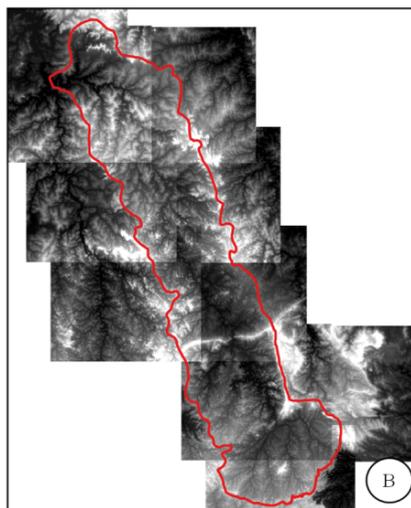
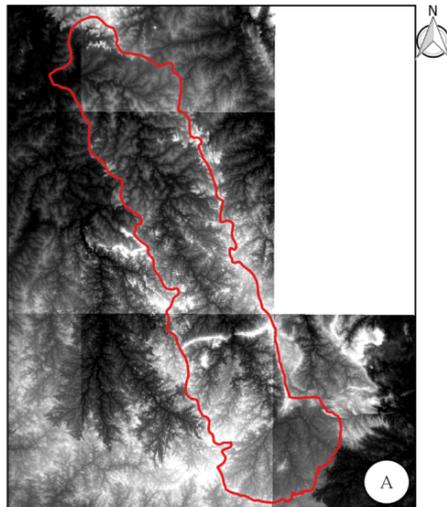


Figura 2. Imagens SRTM (A) e RTC (B) usadas para composição do mosaico correspondente a bacia do Paraopeba.
Figure 2. SRTM (A) and RTC (B) images used for composition of the mosaic corresponding to the Paraopeba basin.

A fim de analisar quantitativamente a concordância dos dados provenientes das imagens RTC e SRTM, procedeu-se uma estatística descritiva dos valores de altitude de aproximadamente 10.000 pontos amostrais distribuídos aleatoriamente ao longo da bacia do Paraopeba (Figura 4). A análise foi feita considerando valores de altitude observados em cada uma das imagens individualmente e a partir da combinação dessas por meio da diferença entre os valores dos pixels de mesma posição geográfica.

Para um estudo qualitativo das imagens RTC e SRTM em relação aos dados hidrográficos mapeados, foram estimadas

as características morfométricas da bacia: área de drenagem, perímetro, índice de circularidade, coeficiente de compacidade. Além disso, foram ainda estimadas para as imagens RTC e SRTM as características topográficas: declividade, direção das vertentes e sombreamento.

A área de drenagem e perímetro foram extraídas automaticamente através do *software* ArcGIS.

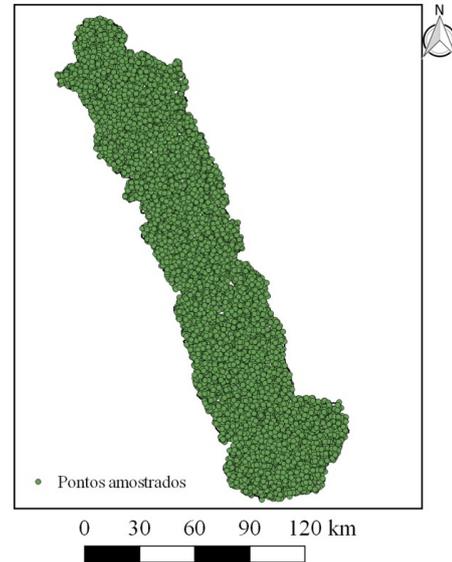


Figura 4. Distribuição dos pontos de altitude amostrados aleatoriamente ao longo da bacia do Paraopeba.
Figure 4. Distribution of altitude points randomly sampled along the Paraopeba basin.

O índice de circularidade (Equação 1) indica o quanto a forma de uma bacia se aproxima de um círculo, sendo que o valor diminui à medida que a bacia torna-se alongada. O coeficiente de compacidade (Equação 2), também está relacionado a forma e indica a susceptibilidade da bacia hidrográfica a enchentes, de maneira que quanto mais irregular for a bacia, maior será o valor desse coeficiente. Bacias circulares, com coeficiente de compacidade igual à unidade, estão mais sujeitas a ocorrência de cheias (VILLELA; MATOS, 1975).

$$IC = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad \text{(Equação 1)}$$

em que: IC = Índice de Circularidade, adimensional; A = Área da bacia, em km²; P = Perímetro da bacia, em km.

$$Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{(Equação 2)}$$

em que: Kc = Coeficiente de compacidade, adimensional; P = Perímetro da bacia, em km; A = Área da bacia, em km².

A declividade, direção das vertentes e sombreamento também foram estimadas automaticamente por meio do *software* ArcGIS. Para o estabelecimento das classes de declividades utilizou-se os intervalos definidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - EMBRAPA (2013).

A Figura 3 apresenta o fluxograma descrevendo a rotina desenvolvida para o processamento das imagens analisadas.



Figura 3. Fluxograma dos procedimentos para obtenção do MDECH e das características morfométricas e topográficas da bacia do Paraopeba.
 Figure 3. Flowchart of the procedures to obtain DEMHC and the morphometric and topographic characteristics of the Paraopeba basin.

3. RESULTADOS

Na Tabela 1 está apresentado o resultado da estatística descritiva obtida com base nos valores de altitude observados em cada uma das imagens RTC e SRTM.

Na Figura 5 é apresentado um histograma referente à diferença de altitude entre o SRTM e o RTC nos pontos amostrados ao longo da bacia.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados para a hidrografia e a bacia hidrográfica do rio Paraopeba obtidos por meio dos produtos SRTM e RTC, apresentados comparativamente à hidrografia mapeada da ANA. As hidrografias e as bacias hidrográficas foram sobrepostas a uma imagem de reflectância da superfície proveniente do satélite Sentinel-2A.

Na Tabela 2, tem-se o comportamento das características morfométricas da bacia obtidas por meio dos produtos SRTM e RTC, apresentadas comparativamente aos obtidos para a hidrografia mapeada.

Tabela 1. Média, desvio padrão e valores máximo e mínimo para os pontos amostrados nas imagens SRTM e RTC.

Table 1. Mean, standard deviation, and maximum and minimum values for the points sampled in the SRTM and RTC images.

	RTC	SRTM
Média	827,73	835,05
Desvio padrão	152,85	150,83
Mínimo	555,00	568,00
Máximo	1558,00	1563,00

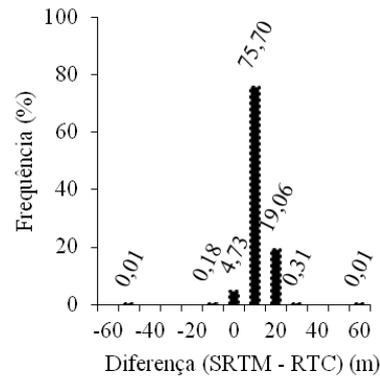


Figura 5. Histograma referente à diferença de altitude entre as imagens SRTM e o RTC.
 Figure 5. Histogram for altitude difference between SRTM and RTC images.

Tabela 2. Características morfométricas da bacia do rio Paraopeba frente aos diferentes dados de entrada.
 Table 2. Morphometric characteristics of the Paraopeba river basin versus different input data.

Características geométricas	Mapeada	SRTM	RTC
Área de drenagem (km ²)	13860,64	13596,24	13594,83
Perímetro (km)	764,06	999,04	1037,61
Coefficiente compacidade	1,83	2,42	2,51
Índice de circularidade	0,30	0,17	0,16

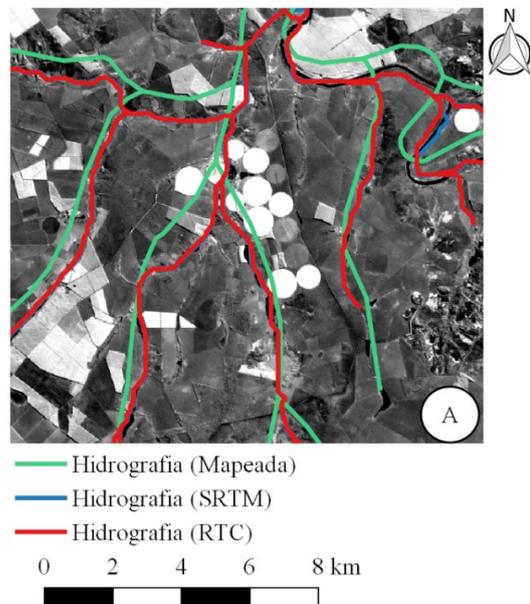


Figura 6. Hidrografias do rio Paraopeba obtida pelos produtos SRTM e RTC e hidrografia mapeada sobrepostas a imagem Sentinel-2A.

Figure 6. Hydrographies of the Paraopeba river obtained by the SRTM and RTC products and mapped hydrography, superimposed on the Sentinel-2A image.

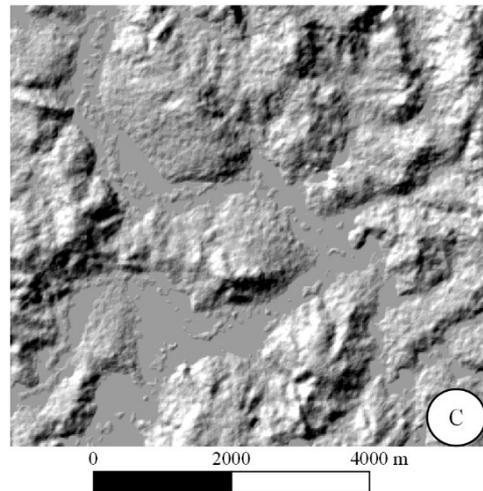
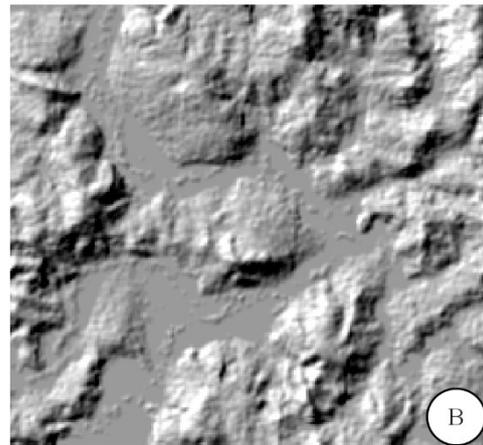
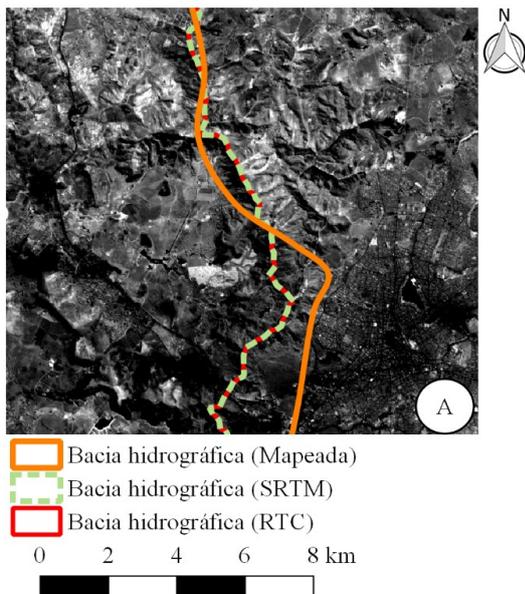


Figura 7. Delimitação da bacia do rio Paraopeba obtida pelos produtos SRTM e RTC e bacia mapeada sobrepostas a imagem Sentinel-2A.

Figure 7. Delimitation of the Paraopeba river basin obtained by the SRTM and RTC products and mapped basin superimposed on the Sentinel-2A image.

Na Figura 8 observa-se os histogramas de altitude obtidos pelos produtos SRTM e RTC para a bacia do rio Paraopeba.

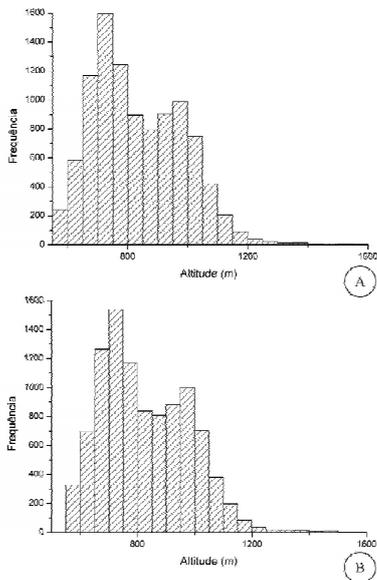


Figura 8. Histograma de altitude dos produtos SRTM (A) e RTC (B).

Figure 8. Altitude histogram for SRTM (A) and RTC (B) products.

A Figura 9 evidencia uma área inserida no interior da bacia do rio Paraopeba com intuito de detalhar a visualização dos produtos RTC e SRTM no que se refere ao nível de refinamento das nuances da superfície. Na Figura 9A a área está apresentada em uma composição RGB cor natural, relativa as imagens do Sentinel-2A. Essa composição foi realizada com intuito de se ter a idéia dos diferentes usos da terra da área detalhada da bacia e assim, ser capaz de perceber as diferentes representações dos produtos de sombreamento, providos do SRTM (9B) e RTC (9C).

Figura 9. Detalhamento de área inserida no interior da bacia do rio Paraopeba, representada por uma composição RGB cor natural (A); pelo sombreamento da superfície provinda do produto SRTM (B) e do produto RTC (C).

Figure 9. Detail of an area inside the Paraopeba river basin: represented by a natural color RGB composition (A); Shading of the SRTM product surface (B) and shading of the RTC product surface (C).

Para uma análise mais qualitativa das imagens foi gerado um mapa comparativo da direção das vertentes (Figura 10), buscando a observação de diferenças mais expressivas entre os produtos em estudo.

Estão apresentados na Figura 11 os histogramas polares das direções das vertentes obtidas para a bacia do rio Paraopeba, por meio dos produtos SRTM e RTC.

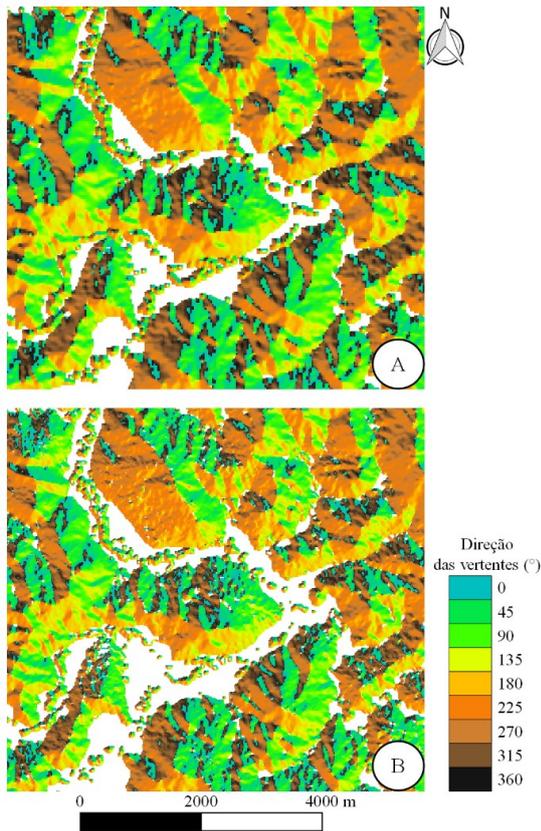


Figura 10. Detalhe da direção das vertentes derivada do produto SRTM (A) e RTC (B).

Figure 10. Detail of aspect derived from SRTM model (A) and RTC model (B).

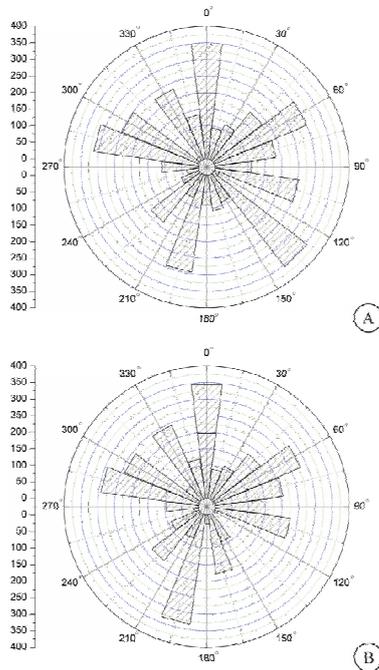


Figura 11. Histograma polar do ângulo das direções das vertentes: provindas do SRTM (A) e RTC (B).

Figure 11. Polar histogram of the surface aspect: from SRTM (A) and RTC (B).

Na Figura 12 tem-se, para uma determinada região da bacia, o nível de detalhamento da declividade obtido pelas imagens SRTM e RTC, em que se evidenciam diferenças notáveis e importantes a depender da finalidade para o qual um estudo esteja sendo desenvolvido.

Está apresentado na Figura 13 o histograma de declividade oriunda dos produtos SRTM e RTC.

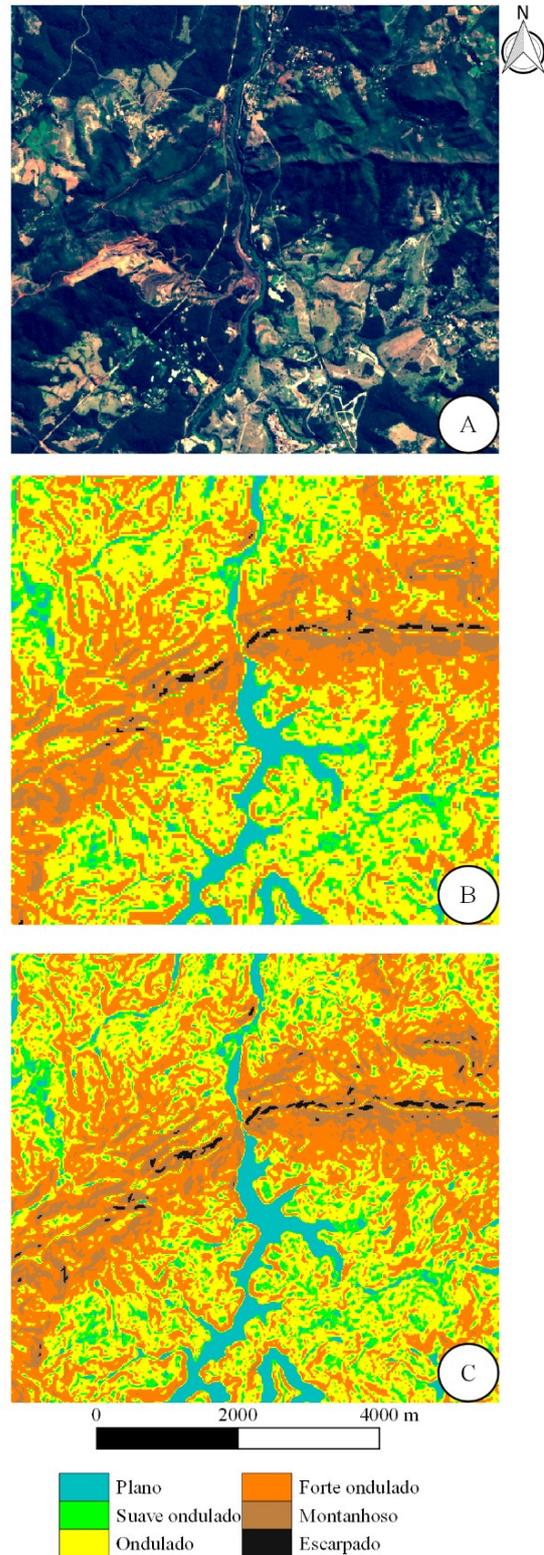


Figura 12. Detalhamento de uma área inserida no interior da bacia do rio Paraopeba, representada por: composição RGB cor natural (A); declividade da superfície provinda do produto SRTM (B) e do produto RTC (C).

Figure 12. Detail of an area inside the Paraopeba river basin: represented by a natural color RGB composition (A); slope of the SRTM product surface (B) and slope of the RTC product surface (C).

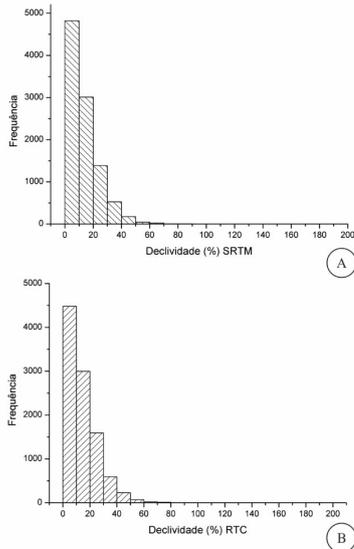


Figura 13. Histograma da declividade para os produtos SRTM (A) e RTC (B).

Figure 13. Slope histogram for SRTM (A) and RTC (B) products.

4. DISCUSSÃO

Com base nos valores da estatística descritiva (Tabela 1) obtida considerando individualmente cada uma das imagens, observou-se bastante similaridade entre as variáveis média e desvio padrão, sendo a primeira dessas cerca de 0,9% superior e a segunda 1,32% inferior no SRTM em relação ao RTC.

Avaliando-se o histograma apresentado na Figura 5, observa-se que quase 95% dos valores correspondentes à diferença de altitude (SRTM – RTC) situam-se entre o intervalo de 0 a 10 m. Esse resultado permite inferir que houve uma predominância da superfície do SRTM em ser superior a do produto RTC, o qual somente em cerca de 5% se mostrou mais elevado. Verificou-se que em apenas dois pontos amostrados, foram observadas variações mais expressivas, da ordem de 50 m. A diferença média de altitude (SRTM – RTC) foi igual 7,33 m e o desvio padrão 4,08 m.

Através da análise visual das Figuras 7 e 8 é possível inferir que apesar da diferente resolução espacial das imagens SRTM e RTC, correspondentes a 30 e 12,5 m, respectivamente, os resultados finais da hidrografia e da bacia hidrográficas obtidos foram semelhantes, com um evidente ganho de detalhamento em relação à hidrografia mapeada. Se observado com maior detalhe a Figura 7, percebe-se que a hidrografia mapeada sobrepõe-se a áreas de cultivo irrigado (pivô central), ao passo que, as hidrografias geradas pelos produtos SRTM e RTC não.

Um fator que pode ter influenciado esse resultado é a escala, isto é, o nível de detalhamento da hidrografia mapeada (1:1.000.000), que pode contribuir para ocorrência desse tipo de inconsistência. Esse fato deixa claro a importância de se levar em consideração as informações provenientes de sensoriamento remoto, visto que por vezes a hidrografia mapeada não se encontra detalhada e nem atualizada, o que constitui uma realidade no mapeamento sistemático no Brasil. Vale ressaltar que o número de células adotados para a geração da hidrografia nos dois produtos foram proporcionais à resolução espacial. Caso tivesse procedido com o mesmo número de células para o

delineamento da hidrografia, o produto RTC se mostraria mais detalhado, devido principalmente ao maior refinamento de resolução espacial.

Na Figura 3, nota-se com mais clareza como os produtos provenientes do SRTM e RTC obtiveram precisão no delineamento dos divisores topográficos, ao passo que a bacia hidrográfica mapeada obteve maior distorção, quando sobreposta à imagem do Sentinel-2A.

No que se refere às características morfométricas obtidas a partir das imagens SRTM e RTC (Tabela 2), os resultados obtidos se mostraram bastante próximos, variando de forma semelhante quando comparados à hidrografia mapeada. As áreas de drenagem obtidas por meio do MDEHC, para ambos os produtos, foram aproximadamente 1,9% menor que a mapeada, enquanto que os perímetros da bacia foram 30 e 35% maior para os estimados por meio do SRTM e do RTC, respectivamente. A diminuição das áreas de drenagem associadas ao aumento dos perímetros parece inconsistente, mas se justifica pelo ganho de detalhamento no contorno da bacia, que se apresentou maior para a melhor resolução espacial, advinda do produto RTC.

Os coeficientes de compacidade estimados para as bacias hidrográficas obtidas por meio do SRTM e do RTC foram, respectivamente, cerca de 32 e 37% maiores que o estimado para a bacia mapeada, que se justifica pelo incremento de perímetro, devido ao ganho de detalhamento, ter sido substancialmente maior que o da área para essas imagens.

Quanto ao índice de circularidade, os valores estimados por meio do SRTM e do RTC foram aproximadamente 43 e 46%, respectivamente, menores que o estimado para a bacia mapeada. Sendo um parâmetro que consiste na relação entre área total da bacia e a área do círculo de perímetro igual ao da área total da bacia, seu comportamento tem a mesma justificativa apresentada anteriormente.

A bacia considerada pode ser caracterizada, com base nesses resultados obtidos para o coeficiente de compacidade e índice de circularidade, como de formato alongado, com maiores tempos de concentração e menores tendências à ocorrência de picos de enchentes.

Oliveira et al. (2010), em trabalho realizado na bacia do ribeirão Salobra, Mato Grosso do Sul, classificou, com base no valor do coeficiente de compacidade afastado da unidade, como uma bacia de baixa suscetibilidade a enchentes em condições normais de precipitação.

Também podemos observar, pela análise dos histogramas (Figura 8), um comportamento semelhante entre os dois produtos, o que mostra a consistência do RTC, visto que o SRTM é um produto amplamente validado na literatura.

Conforme os resultados apresentados na Figura 9, na imagem de sombreamento do SRTM nota-se que além de um menor detalhamento da superfície, ainda é perceptível nessa imagem pequenos ruídos longitudinais e transversais, os quais não se encontram presentes nas imagens do RTC. O relevo é notado com mais detalhamento na Figura 9C, quando comparado com a Figura 9B, tanto nas partes mais planas, quanto nas mais onduladas. Portanto, a representação da superfície foi alcançada com maior refinamento no produto de sombreamento proveniente do RTC.

Pode-se observar na Figura 10, que apesar da hidrografia gerada com base nos produtos SRTM e RTC não terem apresentado resultados qualitativamente distintos para as análises anteriores, a maior resolução espacial associada ao

RTC, permitiu a obtenção de um mapa de direção de vertente com melhor representatividade, uma vez que foi capaz de captar variações na superfície que não foram observadas no modelo SRTM. Observa-se ainda, que os produtos apresentaram ângulo de direções de vertentes relativamente similares (Figura 11), apresentando algumas diferenças em 135° e 165° em relação ao norte, ambos em sentido horário.

Essa melhor representação é ainda mais nítida ao observar porções do relevo com maiores variações de declividade. Isso pode ser evidenciado comparando-se os mapas de declividade, nos quais comportamentos de relevo escarpado identificados pelo RTC não foram observados pelo SRTM (Figura 12). Esse fato é ratificado na análise da declividade média da bacia, a qual foi 13,33% para o mapa de declividade advindo do produto SRTM e 14,09% no correspondente ao RTC, cerca de 5,7% maior. Com esse resultado é notável que o produto RTC foi mais sensível em mensurar as regiões mais declivosas, visto que a média geral da declividade desse produto foi superior. Porém, de acordo com a classificação da EMBRAPA (2013), a declividade média de ambos os produtos caracteriza a região como sendo de relevo ondulado. Destaca-se que apesar da similar estimativa de declividade para os produtos, o SRTM considerou uma maior frequência para as declividades entre 0 e 10%, ao passo que o RTC mostrou-se mais efetivo em diferenciar essas superfícies (Figura 13).

Ludwig et al. (2006), em trabalho no sul da Alemanha, propuseram validar o produto SRTM para aplicações hidrológicas. Para avaliar a qualidade geral dos dados, esses pesquisadores utilizaram dados de perfil de elevação, pontos de controle no campo, além de imagem subtração. Os mesmos constataram que existe uma relação direta do erro altimétrico do produto e o ângulo de imageamento do radar. Outro aspecto que esses pesquisadores relataram é que a disposição e o tipo de uso da terra exercem influência no erro do produto. Em posterior teste do SRTM em um modelo hidrológico, esses autores concluem que este apresenta-se de maneira geral satisfatório para tais aplicações, apesar de apresentar baixa precisão em áreas escarpadas, devido principalmente ao efeito do sombreamento nas imagens radar.

Com base na presente pesquisa e nas demais relatadas, é fato dizer que o SRTM é um produto já validado na literatura, de maneira global. Dessa forma, pode indicar o produto RTC, assim como o SRTM, para aplicações em extração de características morfométricas e topográficas, visto que ambos apresentaram resultados semelhantes, divergindo na qualidade visual mais refinada do RTC para representação de parâmetros relativos ao relevo.

5. CONCLUSÕES

A geração de hidrografia e delimitação de bacia hidrográfica por meio de produtos SRTM e RTC permitiram similar ganho de detalhamento em relação à hidrografia mapeada, se mostrando bastante promissores como modelos para estimativa das características morfométricas de bacias em estudos hidrológicos.

Com relação à análise do comportamento topográfico da bacia, as imagens RTC apresentaram vantagens em relação às imagens SRTM, permitindo a captação de maior detalhamento da superfície, apresentando, dessa forma, maior sensibilidade na identificação das faixas de transição do relevo, ou seja, produtos com maior qualidade visual.

Em geral, regiões de relevo mais acidentados apresentam uma melhor representatividade das imagens de elevação quando comparados à de relevo plano, principalmente quando se trata de uma região vegetada. Recomenda-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros verificações com relação à precisão dos modelos digitais advindos de satélite considerando áreas com características diferenciadas quanto ao uso do solo e características do relevo, a fim de avaliar qual gera a melhor representação dessas superfícies.

Ambos os produtos estão aptos a serem aplicados em estudos relacionados à hidrologia, visto que os resultados do RTC foram bastante próximos ao do já validado SRTM. Em aspectos como área, perímetro, declividade e sombreamento, percebeu-se um notável ganho de informação quando utilizadas as imagens RTC. Outra vantagem advinda do RTC é a representação de áreas com menor extensão, visto a sua melhor resolução espacial.

6. REFERÊNCIAS

- BOLCH, T.; KAMP, U.; OLSENHOLLER, J. Using ASTER and SRTM DEMs for studying geomorphology and glaciation in high mountain areas. **New Strategies for European Remote Sensing**, p.119-127, 2005.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W. D.; 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000200014>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- FRAU, C. M.; PINO, L. M.; ROJAS, Y. O.; HERNÁNDEZ, Y. M. Generalización de modelo digital de elevación condicionada por puntos críticos de terreno. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v.17, n.3, p.439-457, jul/set. 2011.
- GOULDEN, T.; HOPKINSON, C.; JAMIESON, R.; STERLING, S. Sensitivity of DEM, slope, aspect and watershed attributes to LiDAR measurement uncertainty. **Remote Sensing of Environment**, v.179, p.23-35, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.005>
- HAYAKAWA, E. H.; ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Applying DEM-SRTM for reconstructing a late Quaternary paleodrainage in Amazonia. **Earth and Planetary Science Letters**, v.297, n.1, p.262-270, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.028>
- HUGGEL, C.; SCHNEIDER, D.; MIRANDA, P. J.; GRANADOS, H. D.; KÄÄB, A. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v.170, n.1, p.99-110, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.005>
- LUDWIG, R.; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.60, n.5, p.339-358, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.05.003>

- KAWABATA, D.; BANDIBAS, J. Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN). **Geomorphology**, v.113, n.1, p.97-109, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.006>
- MAGESH, N. S.; JITHESHLAL, K. V.; CHANDRASEKAR, N.; JINI, K. V.. Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. **Applied Water Science**, v.3, n.2, p.467-477, 2013. DOI: [10.1007/s13201-013-0095-0](https://doi.org/10.1007/s13201-013-0095-0)
- MATOS, F.; DIAS, R. A gestão dos recursos hídricos no estado de Minas Gerais e a situação da bacia hidrográfica do rio Paraopeba. **Gestão & Regionalidade**, v.29, n.83, p.21-34, 2012. DOI: [10.13037/gr.vol28n83.1375](https://doi.org/10.13037/gr.vol28n83.1375)
- OLIVEIRA, P. T. S. D.; ALVES SOBRINHO, T.; STEFFEN, J. L.; RODRIGUES, D. B. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.8, p. 819-825, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000800005>
- SEYLER, F.; MULLER, F.; COCHONNEAU, G.; GUIMARÃES, L.; GUYOT, J. L. Watershed delineation for the Amazon sub-basin system using GTOPO30 DEM and a drainage network extracted from JERS SAR images. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 22, p.3173-3185, 2009. DOI: [10.1002/hyp.7397](https://doi.org/10.1002/hyp.7397)
- TSIMI, C.; GANAS, A. Using the ASTER global DEM to derive empirical relationships among triangular facet slope, facet height and slip rates along active normal faults. **Geomorphology**, v.234, p.171-181, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.018>
- VALÉRIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES, J. N.; TAUFIK, M.; PUTRA, Y. S.; HAYATI, N. The utilization of global digital elevation model for watershed management a case study: Bungbuntu Sub Watershed, Pamekasan. **Procedia Environmental Sciences**, v.24, p.297-302, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.038>
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill, 1975. 245p.