

Evaluation of digital elevation models in the delimitation of hydrographic basins in the south of Amazonas region

Miqueias L. Duarte^{*}, Douglas M. P. da Silva^{**}, Tatiana A. da Silva^{***}, Leonardo R. Guimarães^{****}

^{*}Mestre em Geografia; Doutorando em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Av. Três de Março, Alto do Boa Vista, Sorocaba-SP, Brasil. E-mail: miqueiaseng@hotmail.com (Corresponding autor)

^{**}Mestre em Agronomia Tropical, área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

^{***}Mestranda em Ciências Ambientais pela Unesp, Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba-SP

^{****}Graduado em Agronomia pela UFAM

Received 8 May 2019; accepted 19 September 2019

Abstract

This study evaluates the vertical accuracy of Digital Elevation Models (MDEs) distributed free of charge for the delimitation of a watershed in an area located in the Amazon. The analysis is done in two ways, and the first evaluates the precision of the products generated in the delimitation of the watershed, and the second uses control points with elevation known to compare with coincident points of the MDE applying models statistical. The hydrographic basin was delimited using free software, the analysis of vertical precision was performed based on points obtained with geodetic GPS for comparison with the elevation obtained by each model. The results showed that when comparing the elevation of the MDEs with the control points obtained in the field, the SRTM presented the highest values of mean error (21.45), standard deviation of the error (3.85), and mean quadratic error (± 119.45), and the ASTER GEDEM presented the Second lowest value for the mean error (13.00), standard deviation of the error (2.33), and mean quadratic error (± 72.39), however, this model presented processing difficulties due to the presence of null pixels and a "brindle" pattern that attributed discontinuity of data. The ALOS PALSAR in turn was the one that presented the lowest mean error (12.35), standard deviation of error (2.75) and mean quadratic error (± 33.94), which characterized as the best model evaluated, being the most appropriate for studies in the region.

Keywords: ASTER, SRTM, ALOS, bacias hidrográficas.

Avaliação de Modelos Digitais de Elevação na delimitação de bacias hidrográficas na região Sul do Amazonas

Resumo

Este estudo avalia a precisão vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) distribuídos de forma gratuita para a delimitação de uma bacia hidrográfica em uma área localizada na Amazônia. A análise é feita de duas maneiras, sendo que a primeira avalia a precisão dos produtos gerados na delimitação da bacia hidrográfica, e a segunda utiliza pontos de controle com elevação conhecida para comparar com pontos coincidentes do MDE aplicando modelos estatísticos. A bacia hidrográfica foi delimitada com uso de softwares livres, a análise da precisão vertical foi realizada com base em pontos obtidos com GPS geodésico para comparação com a elevação obtido por cada modelo. Os resultados obtidos revelam que quando comparado a elevação dos MDEs com os pontos de controle obtidos em campo, o SRTM apresentou os maiores valores de erro médio (21,45), desvio-padrão do erro (3,85), e erro médio quadrático ($\pm 119,45$), e o ASTER GEDEM apresentou o segundo menor valor para o erro médio (13,00), desvio-padrão do erro (2,33), e erro médio quadrático ($\pm 72,39$), entretanto, esse modelo apresentou dificuldades de processamento em função da presença de pixels nulos e um padrão "rajado" que lhe atribuiu descontinuidade de dados. Já o ALOS PALSAR por sua vez foi o que apresentou menor erro médio (12,35), desvio-padrão do erro (2,75) e erro médio quadrático ($\pm 33,94$), o que caracterizou como o melhor modelo avaliado, sendo o mais apropriado para estudos na região.

Palavras-chave: ASTER, SRTM, ALOS, bacias hidrográficas.

1. Introdução

A bacia hidrográfica é definida como a área coletora de água de precipitação que, na superfície do solo, flui para um único ponto de saída. Por apresentar-se como um sistema bem definido, ela tem sido utilizada como área base para estudos ambientais

(Santos, 2004), e também considerada unidade territorial de referência ou de intervenção, instituído pela Política Nacional dos Recursos Hídricos Lei Nº 9.433/97 (Brasil, 1997).

Em virtude de tal importância, conhecer os limites de uma bacia hidrográfica é primordial para o planejamento e gerenciamento ambiental de uma

região. Os limites das bacias hidrográficas eram obtidos tradicionalmente de modo manual a partir de mapas e levantamento de campo. No entanto, nas duas últimas décadas, com o avanço da plataforma do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a disponibilização de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) permitiu uma maior agilidade na obtenção e extração desses atributos espaciais (Gorokhovich e Voustianiouk, 2006; Karbee et al., 2008).

Uma das grandes contribuições para esse avanço foi à disponibilização de MDE gratuitos com resolução espacial mais acurada. Dentre eles destacam o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA (*National Aeronautics Space Administration*), o modelo de elevação global ASTER-GDEM versão 2 (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer/ Global Digital Elevation Model*) e o modelo global ALOS PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite*).

O conjunto de dados SRTM é resultante de um esforço colaborativo entre a (NASA) e a National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) bem como a participação de agências alemã e italiana (Scalco et al., 2018). Inicialmente, os dados SRTM foram disponibilizados continente Sul Americano com resolução espacial de 3 arcos de segundo (~90m), a partir de novembro de 2014 a USGS (U.S. Geological Survey) passou a disponibilizar dados com resolução espacial de 1 arco de segundo (~30m) para a América do Sul (USGS, 2016).

O Modelo Digital de Elevação Global ASTER-GDEM versão 2 é um conjunto de produtos desenvolvidos e disponibilizados ao público pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) do Japão e os Estados Unidos (NASA). Este foi gerado a partir de dados coletados a partir do *Spaceborne* avançado da emissão térmica e da reflexão *Radiometer* (ASTER), da Terra pelo instrumento óptico (Jing et al., 2014). Dentre os aspectos positivos deste modelo, destacam-se a representação de quase toda a superfície terrestre e a construção de um produto com 30m de resolução espacial (Abrams e Hook, 2016).

O modelo ALOS PALSAR, produto da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) disponibiliza dados topográficos a nível global desde 2016. A disponibilidade desse banco de dados constitui um avanço importante, uma vez que as avaliações de precisão indicam que esse modelo é mais preciso que os demais modelos gratuitos de abrangência global disponível (Becek, 2014).

A disponibilidade de MDEs com abrangência global possibilitou preencher os “vazios cartográficos” da topografia global, além de proporcionar um ganho significativo em análises da geomorfologia do terreno, possibilitando melhores

resultados na extração de atributos ambientais (Farhan et al., 2015; Jacques et al., 2014).

Assim, estudos vêm sendo conduzidas em várias partes do mundo com o objetivo de analisar, comparar e atualizar informações da superfície terrestre por meio de MDEs (Hayakawa et al., 2008; Mantelli et al., 2011; Neumann et al., 2012; Suwandana et al., 2012; Júnior et al., 2014; Moulatlet et al., 2015; Ouerghil et al., 2015). Os MDEs tem sido utilizado expressivamente em estudos ambientais, apresentando um suporte significativo no melhor conhecimento do terreno em seus diversos usos (Chagas et al., 2010).

Segundo Moulatlet et al. (2015), os MDEs têm se mostrado uma fonte de dados de confiança para a descrição de terreno na Amazônia, uma vez que as características derivadas do MDE podem ser fortemente correlacionadas com propriedades do solo e hidrologia da região. No entanto, esses dados devem ser interpretados com cuidado, pois uma vez que o método de aquisição das imagens de radar leva em consideração o dossel da floresta, que mal avaliados, podem gerar informações que não condizem com a realidade local (Mashimbye et al., 2014; Oliveira et al., 2014; Moulatlet et al., 2015).

A região sul do estado do Amazonas tem presenciado o avanço do cultivo de soja em áreas planas em campos naturais, a proximidade da BR 230 (Transamazônica); implantação de assentamentos na região tem impulsionado a ocupação de novas áreas e consequentemente o avanço no desmatamento. A balneabilidade do rio Ipixuna e a proximidade com a capital do estado de Rondônia tem aumentado a especulação imobiliária na região. O que torna de suma importância o conhecimento geomorfológico da área uma vez que pode servir de base para o planejamento do uso da terra.

Nesse contexto, objetivou-se com o estudo avaliar MDEs derivados de dados do sensor ASTER-GDEM versão 2, SRTM, e ALOS PALSAR na delimitação da bacia hidrográfica do rio Ipixuna, na região Sul do estado do Amazonas com intuito de verificar o modelo mais adequado para estudos de geomorfologia de bacias hidrográficas da região.

2. Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A área abrangida compreende a bacia hidrográfica do rio Ipixuna localizado nos municípios de Humaitá, Canutama e Tapauá, no estado do Amazonas e no município de Porto Velho estado de Rondônia (Figura 1). O rio Ipixuna é um rio desagua no rio Purus próximo a cidade de Tapauá, possui vazão média de $98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com altitude máxima de 120 e mínima de 40 metros.

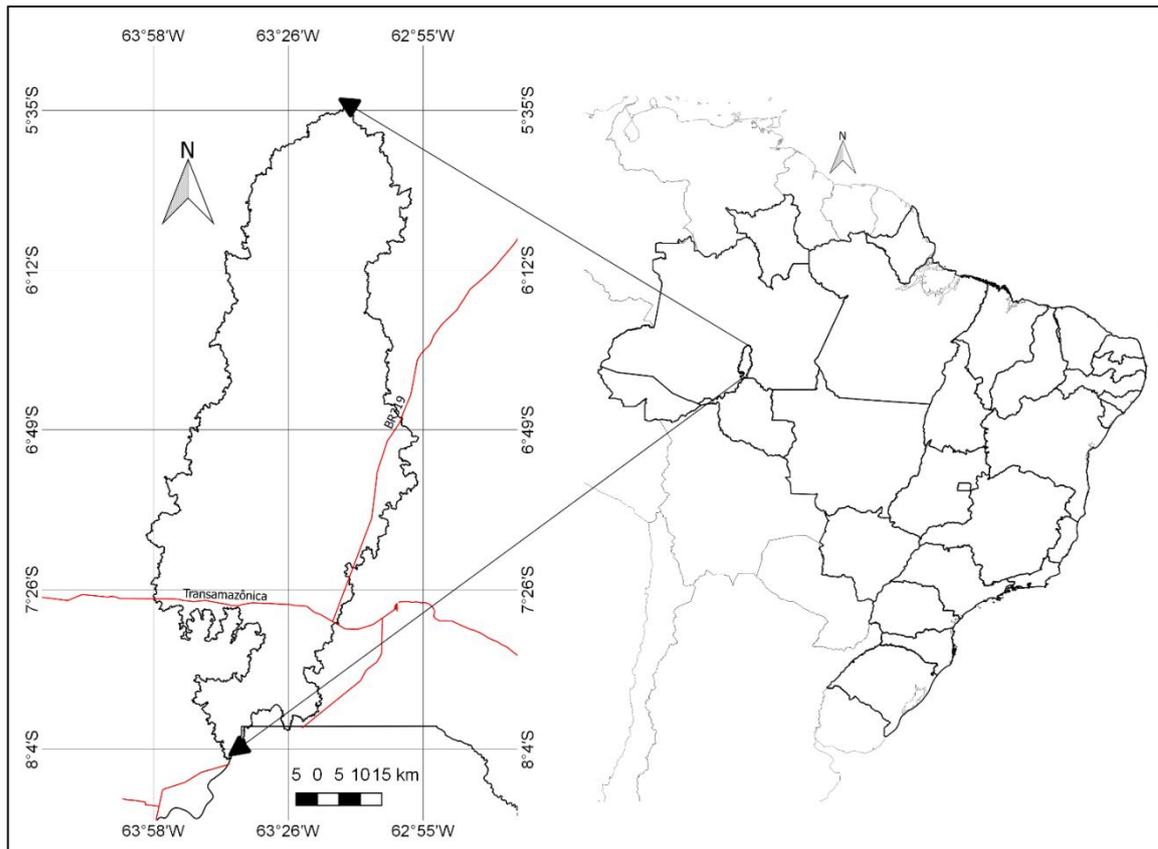


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Ipixuna.

O clima da região é quente e úmido com chuvas do tipo monção de 2.250 a 2.750 mm anuais que favorecem a formação de florestas densas devido à alta atividade biológica, luminosidade, água e temperatura propícias da região.

Com respeito a geomorfologia, a área de estudo encontra-se situada entre os domínios da Planície Amazônica e Tabuleiros da Amazônia Centro-Ocidental (Maia, 2010). As Planícies Amazônicas são representadas por planícies de inundação e terraços fluviais muito amplos, por vezes com dezenas de quilômetros de largura, que ocorrem ao longo dos principais rios da região. São normalmente recobertos por vegetação de igapó e matas de várzea adaptadas a ambientes inundáveis.

Já os Tabuleiros da Amazônia Centro-Ocidental, ou também denominada de “Depressão Amazônica” constituem o mais amplo domínio geomorfológico do estado do Amazonas ocupando mais da metade de sua superfície. Toda esta vasta zona de tabuleiros que se estende para oeste das calhas do rio Madeira e Negro, até a fronteira brasileira com a Colômbia, na Bacia Sedimentar do Solimões, está inserida na Depressão Amazônica (Maia, 2010).

Obtenção e processamento dos dados

Contou-se com dados de três modelos de elevação para extração da bacia hidrográfica do Rio Ipixuna, sendo eles: ALOS PALSAR disponibilizado pelo portal de dados de Facilidade de Satélite do Alasca a UAF e SRTM e ASTER-GDEM versão 2 disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos, a USGS (Tabela 1).

O processamento dos dados foi realizado no software QGIS 2.8.3, onde foi criado um mosaico para cada MDE utilizado, em seguida um recorte da área de interesse. Posteriormente, o sistema de coordenadas do projeto foi definido para a projeção Universal Transversal de Mercator (UTM), Datum SIRGAS 2000, Zona 20S.

Após a padronização dos dados, com auxílio da ferramenta *Contorno*, foi extraído as curvas de nível para cada modelo com intervalo de 10m para construção do Modelo Digital de Terreno-MDT, em seguida, foi realizada uma interpolação pelo método *Spline* como descrito por Her e Heatwole (2008), por ser o método mais adequado para derivação de rede de drenagem e demais atributos referentes a delimitação de bacias hidrográficas. A interpolação foi realizada com auxílio do conjunto de ferramentas SAGA GIS 2.8.3 integrado ao QGIS.

Tabela 1 - Características dos dados brutos utilizados no estudo.

Imagem Utilizada	Resolução (arc sec)	Satélite	Número de cenas	Download
SRTM	1 (30m)	Suttle Radar	8	https://earthexplorer.usgs.gov/
ASTER	1 (30m)	ASTER	8	https://earthexplorer.usgs.gov/
ALOS	1 (30m)	ALOS	12	https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#

Para delimitação da bacia hidrográfica, foi utilizado o conjunto de ferramentas TauDEM no QGIS. Os algoritmos utilizados foram: *Pit Remove*, *D8 Flow Directions*; *D8 Contributing Area*, *Stream Definition by Threshold*; *Stream Reach and Watershed*, em seguida, os dados foram vetorizados para manipulação e confecção das bases cartográficas.

Foi construído perfis de elevação a partir dos modelos a fim de comparar a relação entre os modelos avaliados na direção NNE-SSO e W-E, esses perfis foram construídos a partir da extração de cotas topográficas obtidas diretamente nos MDEs com uso da ferramenta *Terrain Profile*.

Para determinar o nível de erro vertical ou incerteza contido nos conjuntos de dados avaliados, utilizaram-se 31 pontos de elevação (pontos de controle) obtidos com um GPS Trimble modelo R4. Os pontos foram coletados em campo nas imediações da rodovia Transamazônica (BR-230) e BR-319 (Manaus-Porto Velho). Os dados obtidos em campo foram processados pelo método PPP-IBGE (Posicionamento por Ponto Preciso), conforme descrito pelo IBGE (2009), uma vez que constitui um método vantajoso no que se refere a precisão, além de ser gratuito e apresentar grande facilidade de manuseio (Klein et al., 2010; Almeida e Dal Poz, 2016).

A análise da exatidão dos MDEs ALOS, SRTM e ASTER foram realizados comparando com a elevação obtida pelo GPS a partir da análise do Erro médio (ME) e Erro médio quadrático (RMSE) e Desvio-padrão do erro (Std) conforme apresentado na Equação 1, 2 e 3 abaixo (Patel et al., 2016; Hu et al., 2017).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_0 - E_m) \quad (\text{Equação 1})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_0 - E_m)^2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_0 - \bar{E}_m)^2}{n}} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo que E_0 corresponde a elevação observada pelo GPS e E_m a elevação do MDE e n o número de pontos observados e \bar{E} corresponde à média da elevação observada no MDE.

3. Resultados e discussão

A partir de dados SRTM, ASTER GDEM versão 2 e ALOS PALSAR, foi realizado a extração automática da bacia hidrográfica do rio Ipixuna com a utilização do conjunto de ferramentas TauDEM presente no QGIS. No total, utilizaram-se oito cenas do modelo SRTM e ASTER e 12 cenas do modelo ALOS, todos os MDEs foram recortados em um retângulo envolvente para área de interesse, esse procedimento é de suma importância, pois uma menor área minimiza o tempo de processamento de dados pelo software.

A partir da manipulação dos dados no software foi possível verificar a qualidade de cada modelo, onde verificou-se que o MDE ASTER GDEM versão 2 foi o que apresentou complicações em relação a sua manipulação, uma vez que apresentou pixels “nulos” além de um padrão “rajado” em sua extensão. A presença de pixels nulos segundo Hayakawa et al. (2008) é característico de locais de terreno de baixa altitude (<100 m de altitude ou <6° de inclinação).

Já a forma “rajada” distribuída em boa parte da área de estudo (Figura 2), segundo Zhao et al. (2011) e Jing et al. (2014), pode estar relacionada com certas descontinuidades no MDE, que podem ser proveniente de problemas de calibração ou ajuste relacionado ao processamento do par estereoscópico originário do modelo gerado, bem como a cobertura de nuvem, presença de corpos hídricos que dificultam a aquisição de informação pelo sensor (Kolecka e Kozak, 2014).

Segundo Chagas et al. (2010) e Mouratidis e Ampatzidis (2019), os erros grosseiros em MDEs gerados a partir de dados de sensoriamento remoto podem ser atribuídos a muitos fatores, dentre os quais destaca-se os ruídos gerados nos processos de aquisição e transferência de dados, erros de geometria da orbita ou, ainda, a presença de nuvens nas imagens.

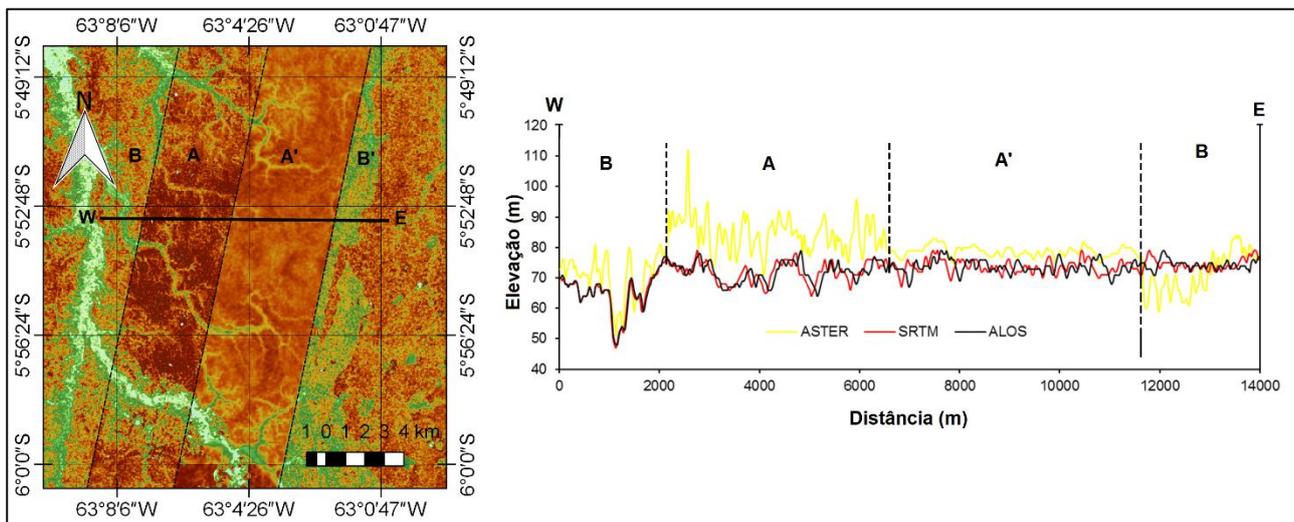


Figura 2 - Descontinuidade em forma de "rajados" no MDE ASTER e comparação de elevação com o SRTM e ALOS.

A Figura 2 apresenta um perfil de elevação W-E que ilustra a descontinuidade em forma de "rajados", o que causa uma diferença de elevação média de 10 metros, destacando as faixas A e A', enquanto que os modelos SRTM e ALOS apresentaram perfil de elevação próximos, não apresentando essa diferença de elevação para o mesmo local. Vale ressaltar que a área que compreende o perfil de elevação é constituída por floresta preservada, não possuindo alterações na cobertura vegetal ao longo do tempo o que poderia causar essa diferença de altitude entre os modelos.

Essa diferença de elevação em função da descontinuidade no modelo ASTER GEDEM pode comprometer a identificação de interflúvios na delimitação de bacias hidrográficas, bem como a retirada de cobertura vegetal como observado na Figura 3, no qual ilustra um perfil de elevação em uma seção na BR-319 (Manaus/AM - Porto Velho/RO). O método empregado na aquisição dos MDEs avaliados leva em consideração o dossel das árvores, identificando-as como sendo a superfície do terreno. Nesse caso, se as áreas localizadas nas proximidades do divisor de águas na bacia hidrográfica estiverem desflorestadas, certamente irá causar confusão na identificação do interflúvio da bacia hidrográfica, bem como nos locais identificados como curso hídricos, uma vez que essa diferença de elevação pode variar em até 15 metros, como ilustra a Figura 3.

Dependendo da aplicação, pequenos erros podem afetar significativamente a utilidade de produtos derivados, por exemplo, pequenos erros em MDE

podem levar a derivações imprecisas da inclinação, aspecto e curvatura do terreno, que por sua vez, pode ocasionar na previsão de direção de fluxo hídrico impreciso, além de geração de malha hídrica errônea (Januchowski et al., 2010).

Comparando a elevação do MDE ASTER com os demais modelos apresentados no perfil da Figura 2 e 3, observa-se que o modelo ASTER apresenta elevação superior aos demais modelos. Com intuito de verificar esse comportamento ao longo da bacia hidrográfica, foram traçados perfis de elevação na direção NNE-SSO e W-E como ilustra a Figura 3. Os perfis topográficos construídos exibem uma relação entre os modelos SRTM e ALOS, ambos apresentando boa proximidade, enquanto que o modelo ASTER apresentou valores de elevação superiores aos demais, sendo que essa diferença, em grande parte é positiva, ou seja, o ASTER GDEM representa uma superfície mais elevada do que o SRTM e ALOS (Figura 4). Comportamento semelhante foram observados por Chagas et al. (2010), Arefi e Reinartz (2011) e Athmania e Achour (2014).

Esse comportamento pode ser observado pela distribuição de classes apresentado no histograma, a Figura 5 mostra a variabilidade das elevações para os dados avaliados. Ambos os modelos apresentam assimetria negativa, sendo que os valores de pico para o modelo SRTM ocorre aos 85 metros, e o modelo ALOS aos 93 metros, seguido pelo ASTER com valores de pico de 86 metros, sendo que os modelos SRTM e ALOS apresentam achatamento semelhante (curtose).

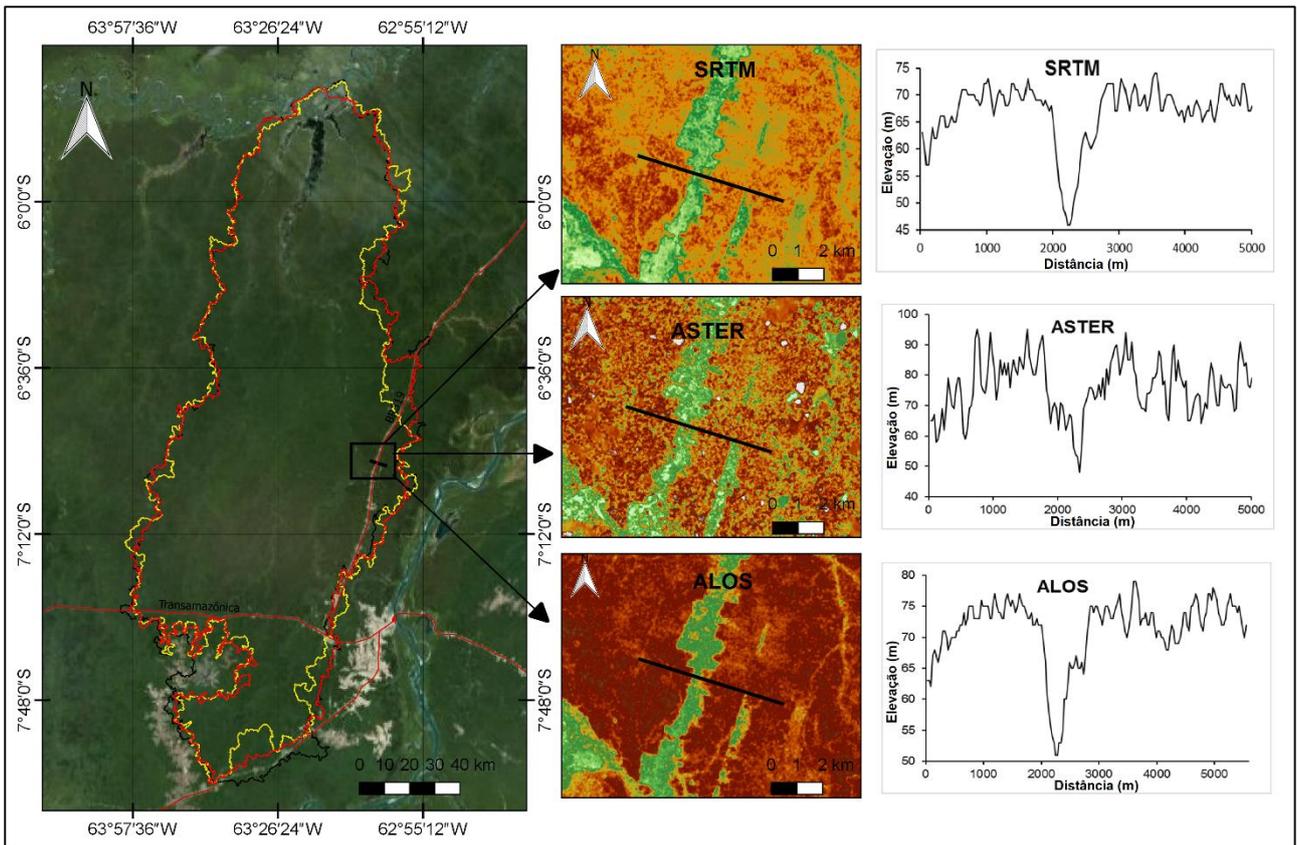


Figura 3 - Perfil de elevação com base nos diferentes MDE em uma área da BR 319.

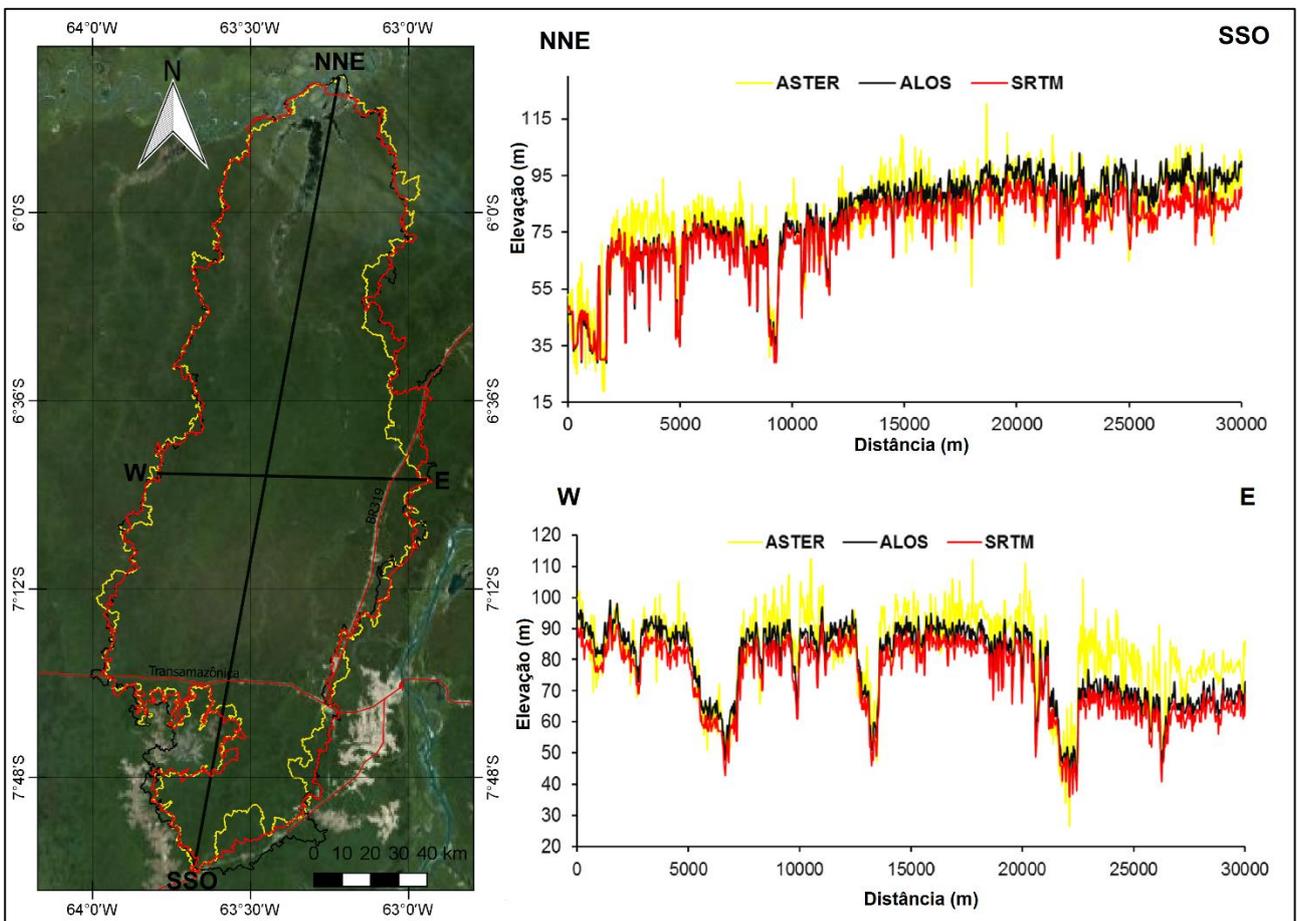


Figura 4 - Diferença de elevação na seção NNE-SSO e W-E nos diferentes MDEs avaliados.

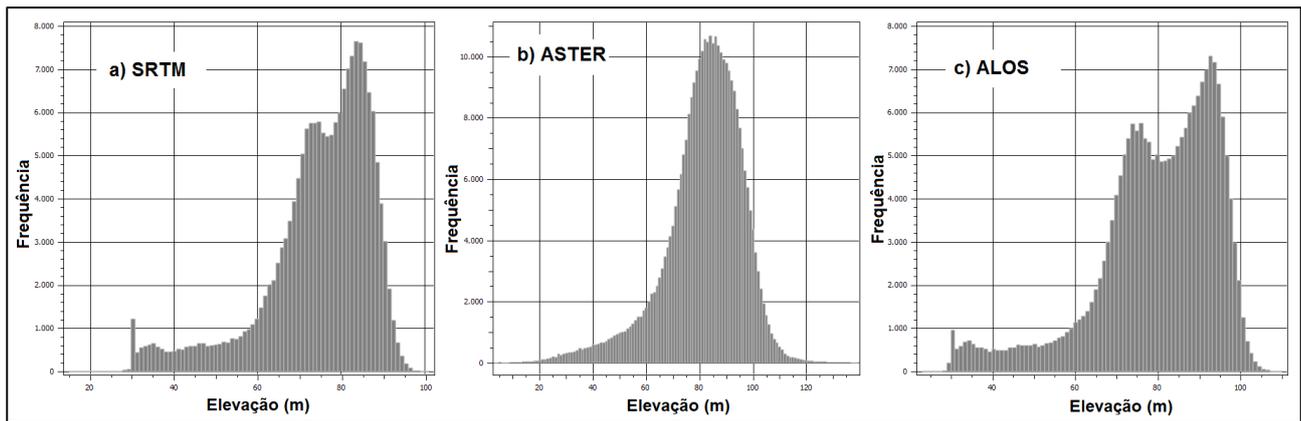


Figura 5 - Histograma de frequência de valores dos dados analisados.

Apesar do modelo ASTER apresentar certa descontinuidade de dados em função da forma “rajada” ao longo da área de estudo, no que se refere a área e perímetro da bacia hidrográfica, os valores observados diferem pouco em relação aos demais modelos, revelando a proximidade entre os produtos

gerados. Essa proximidade pode ser observada na Tabela 2 no qual dispõe os resultados, sendo que o MDE SRTM foi o que apresentou maior área e menor extensão, seguido pelos modelos ASTER GEDEM e ALOS PALSAR.

Tabela 2 - Área e perímetro obtido com os diferentes MDEs.

MDE	Área (km ²)	Perímetro (km)
SRTM	179.342,16	2.169,16
ASTER	173.930,85	2.370,07
ALOS	175.123,32	2.447,08

A avaliação estatística dos MDEs possibilitou obter resultados mais apurados quanto à qualidade dos modelos avaliados. A Tabela 3 apresenta os dados estatísticos apresentando valores da elevação máxima, mínimo e média, desvio-padrão, erro médio, desvio-padrão do erro e erro médio quadrático para todos os dois produtos avaliados.

Os valores estatísticos básicos para o erro médio (ME) mostraram que os MDEs SRTM, ASTER e ALOS PALSAR apresentaram valores positivos em relação ao ponto de referência. Esse corresponde ao

fato que a elevação apresentada no MDE avaliado foi superior à elevação do ponto de controle extraído pelo GPS em campo.

Com relação ao STD e RMSE, o modelo SRTM foi o que apresentou maiores valores em relação aos demais, apresentando o pior desempenho dentre os MDEs avaliados para área de estudo. Já o MDE ALOS PALSAR foi o que apresentou menor ME, STD e RMSE, o que atribuiu a este MDE maior confiança na extração de atributos para a área de estudo.

Tabela 3 - Dados estatísticos dos diferentes MDEs.

MDEs	Máx	Mín	Méd	SD	ME	STD	RMSE (m)
SRTM	80,00	42,00	59,12	10,65	21,45	3,85	±119,45
ASTER	88,00	49,00	67,58	10,54	13,00	2,33	±72,39
ALOS	89,00	46,00	65,22	11,97	12,35	2,75	±33,94

*Elevação Máxima (Máx); Mínima (Mín); Média (Méd); Desvio-padrão (SD); Erro Médio (ME); Desvio-padrão do erro (STD); Erro médio quadrático (RMSE).

4. Conclusões

Em todos os casos o modelo ALOS PALSAR apresentou melhor desempenho em comparação com os demais modelos avaliados, apresentando menor ME, STD e RMSE, que nesse caso, sendo

classificado como melhor modelo para extração de atributos geomorfológicos. Apesar do modelo ASTER GDEM ter apresentado complicações quanto a presença de pixels nulos e uma descontinuidade de informações em forma de “rajados”, o MDE apresentou o segundo melhor desempenho podendo

também ser utilizado na extração de atributos na área de estudo.

O modelo SRTM por sua vez foi MDE que apresentou os piores desempenhos estatísticos em comparação com os demais modelos avaliados, apesar de apresentar altos valores de ME, STD e RMSE, o modelo exibiu poucos pixels nulos podendo ser utilizado sem muitas complicações.

As características locais, tais como: terreno plano, baixa elevação e coberto em sua maioria por vegetação nativa densa não contribuem para a extração de atributos geomorfológicos com boa precisão na área de estudo, pois tais características cooperam para uma maior incidência de erros em consequência do método de aquisição de imagens que cada MDE foi obtido.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo para o primeiro e terceiro autor, e a Universidade Federal do Amazonas-UFAM (Campus Vale do Rio Madeira) pelo apoio logístico durante o trabalho de campo.

Referências

- Abrams, M., Hook, S., 2016. ASTER User Handbook - Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. v. 2 Disponível: asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf. Acesso: 5 jan. 2016.
- Almeida, M.S., Dal Poz, W.R., 2016. Posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo com GNSS: qual é o método mais acurado atualmente? *Boletim de Ciências Geodésicas* 22, 175-195.
- Arefi, H., Reinartz, P., 2011. Accuracy Enhancement of ASTER Global Digital Elevation Models using ICESat Data. *Remote Sensing* 3, 1323-1343.
- Athmania, D., Achour, H., 2014. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sensing* 6, 4600-4620.
- Becek, K., 2014. Assessing global digital elevation models using the runway method: the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer versus the shuttle radar topography mission case. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing* 52, 4823-4831.
- Brasil, 1997. Lei nº. 9.433, de 8 de janeiro.
- Chagas, C.S., Fernandes Filho, E.I., Rocha, M.F., Carvalho Júnior, W., Souza Neto, N.C., 2010. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 218-226.
- Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., Al-Shaikh, N., 2015. Quantitative analysis of geomorphometric parameters of Wadi Kerak, Jordan, using remote sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection* 7, 456-475.
- Gorokhovitch, Y., Voustantiouk, A., 2006. Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment* 104, 409 - 415.
- Hayakawa, Y.S., Oguchi, T., Lin, Z., 2008. Compare digital models of new and existing global rise: ASTER G-DEM e SRTM-3. *Geophysical Research Letters* 35, 1-5.
- Her, Y., Heatwole, C., 2008. Assessment of interpolation methods for refining SRTM and DEM, ASABE Annual International Meeting. Paper No. 085214. Providence, Rhode Island.
- Hu, Z., Peng, J., Hou, Y., Shan, J., 2017. Evaluation of recently released open Global Digital Elevation Models of Hubei, China. *Remote Sensing* 9, 262. doi: <https://doi.org/10.3390/rs9030262>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009. Manual do Posicionamento por Porto Preciso. Versão março.
- Jacques, P.D., Salvador, E.D., Machado, R., Grohmann, C.H., Nummer, A.R., 2014. Application of morphometry in neotectonic studies at the eastern edge of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. *Geomorphology* 213, 13-23.
- Januchowski, S.R., Pressey, R.L., VanDerWal, J., Edwards, E., 2010. Characterizing errors in digital elevation models and estimating the financial costs of accuracy. *International Journal of Geographical Information Science* 24, 1327-1347.
- Jing, C., Shortridge, A., Lin, S., Wu, J., 2014. Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China. *International Journal of Digital Earth* 7, 969-992.
- Carvalho Júnior, O.A., Guimarães, R.F., Montgomery, D.R., Gillespie, A.R., Gomes, R.A.T., Martins, É.S., 2014. Karst Depression Detection Using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil. *Remote Sensing* 6, 330-351.
- Karbee, M., Brian, L., Aziz, S.A., 2008. Improving quality of public domain digital elevation models through data fusion. *Biosystems engineering* 101, 293-305.
- Klein, I., Matsouka, M.T., Souza, S.F., 2010. Análise do serviço on-line de PPP (GDGPS - APPS) para

- receptores de dupla frequência: um estudo envolvendo dados de estações da RBMC. *Gaea - Journal of Geoscience* 6, 90-98.
- Kolecka, N., Kozak, J., 2014. Assessment of the accuracy of SRTM C- and X-Band high mountain elevation data: a case study of the polish tatra mountains. *Pure and Applied Geophysics* 171, 897-912.
- Maia, M.A.M., 2010. Geodiversidade do Estado do Amazonas. CPRM, Manaus.
- Mantelli, L.R., Barbosa, J.M., Bitencourt, M.D., 2011. Assessing ecological risk through automated drainage extraction and watershed delineation. *Ecological Informatics* 6, 325-331.
- Mashimbye, Z.E., Clercq, W.P., Niekerk, A.V., 2014. An evaluation of digital elevation models (DEMs) for delineating land components. *Geoderma* 213, 312-319.
- Moulatlet, G.M., Rennó, C.D., Costa, F.R.C., Emilio, T., Schietti, J., 2015. Mapping hydrological environments in central Amazonia: ground validation and surface model based on SRTM DEM data corrected for deforestation. *Earth System Science Data* 7, 29-34.
- Mouratidis, A., Ampatzidis, D., 2019. European Digital Elevation Model validation against extensive global navigation satellite systems data and comparison with SRTM DEM and ASTER GDEM in Central Macedonia (Greece). *International Journal of Geo-Information* 8, 1-18.
- Neumann, M.R.B., Roig, H.L., Souza, A.L.F., 2012. Digital Elevation models obtained by contour lines and SRTM/Topodata, for digital soil mapping. *Journal of Soil Science and Environmental Management* 3, 104-109.
- Oliveira, J.R.F., Ortiz, J.O., Rosim, S., 2014. Comparison Between Drainage Network Extracted From Elevation and Surface Models. *GEOProcessing* 89-93.
- Ouerghi, S., Elsheikh, R.F.A., Achour, B.S., 2015. Evaluation and validation of recent freely-available ASTER-GDEM V.2, SRTM V.4.1 and the DEM derived from topographical map over SW Grombalia (Test Area) in North East of Tunisia. *Journal of Geographic Information System* 7, 266-279.
- Patel, A., Katiyar, S.K., Prasad, V., 2016. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). *Egyptian Journal Remote Sensing and Space Science* 19, 7-16.
- Santos, R.F., 2004. Planejamento Ambiental: teoria e prática. Oficina de Texto, São Paulo.
- Scalco, P.A.P., Iescheck, A.L., Corrêa, I.C.S., Oliveira, R.M., Franchini, R.A.L., 2018. Validação do modelo digital de elevação (SRTM) com levantamento GNSS aplicado à bacia hidrográfica da Lagoa Mirim. *Boletim de Ciências Geodésicas* 24, 407-425.
- Suwandana, E., Kawamura, K., Sakuno, Y., Kustiyo, E., Raharjo, B., 2012. Evaluation of ASTER GDEM2 in Comparison with GDEM1, SRTM DEM and topographic-map-derived DEM using inundation area analysis and RTK-dGPS data. *Remote Sensing* 4, 2419-2431.
- USGS. Star Science Geological Survey, 2016. SRTM Topography. Disponível: https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/Documentation/SRTM_Topo.pdf. Acesso: 15 dez. 2016.
- Zhao, S., Cheng, W., Zhou, C., Chen, X., Zhang, S., Zhou, Z., Liu, H., Chai, H., 2011. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China. *International Journal of Remote Sensing* 32, 8081-8093. doi: 10.1080/01431161.2010.532176