





Otimização de Modelos Digitais de Elevação para a Obtenção de Variáveis Geomorfológicas e Hidrológicas: Avaliação da Convolução Bidimensional sobre os Produtos ALOS, ASTER-GDEM e SRTM

On the Optimization of Digital Elevation Models to Obtain Geomorphological and Hydrological Variables: Evaluation of the Bidimensional Convolution on ALOS, ASTER-GDEM and SRTM Products

Monique de Paula Neves¹ , Ana Flávia Roland Padilha¹ ,
Vandoir Bourscheidt²  & José Augusto Di Lollo³ 

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, SP, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Ciências Ambientais, São Carlos, SP, Brasil

³Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, Ilha Solteira, SP, Brasil

E-mails: moniqueneves.ambiental@gmail.com; afrpadilha@gmail.com; vandoir@ufscar.br; jose.lollo@unesp.br

Resumo

As variáveis geomorfológicas e hidrológicas refletem as características de uma bacia hidrográfica e constituem dados essenciais nas análises espaciais do terreno. Com a disseminação de dados digitais utilizam-se cada vez os modelos digitais de elevação (MDE) gratuitos oriundos de sensores orbitais, entretanto esses modelos costumam apresentar limitações inerentes ao processo de aquisição dos dados, comprometendo a extração de informações espaciais deles derivadas. O presente trabalho teve como o objetivo avaliar a aplicação da técnica de convolução bidimensional em três MDE: ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model*) e SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e verificar a influência da ferramenta na otimização destes produtos, e nas variáveis geomorfológicas e hidrológicas. A avaliação foi desenvolvida com base em dados topográficos convencionais, e como método de análise utilizou-se a raiz do erro médio quadrático (REM_Q) e testes estatísticos. Os resultados demonstraram que os MDE podem ser otimizados em boa parte com o uso da técnica de convolução, mas para isto é fundamental adotar valores adequados para o raio de busca que realiza a operação entre os *pixels* vizinhos. A técnica corrigiu as irregularidades na superfície, eliminando os ruídos e garantindo a representação mais consistente dos mapas de declividade e fluxo acumulado. As análises quantitativas e comparativas mostraram que o uso da estatística focal presente nos pacotes de SIG promove um ganho na qualidade de MDE gratuitos, favorecendo a aquisição de variáveis morfológicas com maior acurácia.

Palavras-chave: Análise espacial; MDE; Estatística focal

Abstract

The geomorphological and hydrological variables reflect the characteristics of a watershed and constitute essential data in spatial analysis of the terrain. With the dissemination of digital data, freely available digital elevation models (DEM) based on satellite data are being increasingly used. However, these models have known limitations inherent to errors resulting from the data acquisition process, compromising the extraction of spatial information derived from them. The present work aim to evaluate the application of a two-dimensional convolution technique in three DEM: ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model*) and SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) as well as to verify the influence of the tool in the optimization of these products in geomorphological and hydrological variables. The DEM were compared to conventional topographic data and further evaluated based on root of the mean square error (RMSE) other statistical tests. The results showed that the elevation models can be considerably optimized with the use of the convolution technique, but for this it is essential to adopt an adequate window size on the neighboring pixels. The technique was able to reduce the irregularities on the surface, showing an improved representation of the slope and accumulated flow maps. The analyzes shows that those geoprocessing tools available in GIS packages can promote a gain in the quality of free DEM, favoring the acquisition of morphological variables with greater accuracy.

Keywords: Spatial analyst; DEM; Focal statistics

1 Introdução

O MDE (Modelo Digital de Elevação) é um modelo matemático de superfície contínua interpolado com base nos valores de elevação, e nesse estudo se refere especificamente ao modelo de terreno (Montgomery 2003). Esses modelos são essenciais nas análises geomorfológicas e hidrológicas pois possibilitam a aquisição de parâmetros morfométricos primários, que auxiliam na caracterização do relevo e predição de processos geodinâmicos (Arabameri, Pradhan & Rezaei 2018; Montgomery 2003; Nitheshnirmal et al. 2019).

Diferentes métodos podem ser utilizados para obter os MDE, como levantamento topográfico (GPS), mapas topográficos, ortofotografia, LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e sistemas de radar baseados em satélite (Nelson et al. 2009). Recentemente, com a maior disseminação de dados digitais, utilizam-se cada vez mais MDE oriundos de sensores orbitais, alguns disponibilizados gratuitamente na internet: ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model*) e SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*).

Nos últimos anos, diversos estudos utilizaram os MDE ALOS, ASTER-GDEM e SRTM para obtenção de variáveis morfométricas, como exemplo citam-se: Buitrago & Martínez (2016); Chagas et al. (2009); Carmo et al. (2015); Khal et al. (2020); Kovalchuk, Lukianchuk & Bogdanets (2019). No entanto, apesar da vasta aplicação, esses MDE não estão livres de erros, o que pode interferir na precisão das variáveis geomorfológicas e hidrológicas deles derivadas.

De acordo com Paradella et al. (2005) e Chagas et al. (2009), a qualidade das informações espaciais pode ser influenciada por fatores como ruídos na aquisição e erros oriundos da geometria da órbita. Além desses fatores, a cobertura vegetal (Orlandi et al. 2019; Machado et al. 2019) e as características do relevo (Araújo et al. 2018) podem influenciar na acurácia altimétrica dos modelos. Assim, é fundamental realizar o pré-processamento dos dados visando a correção das irregularidades na superfície, geradas principalmente pela presença de depressões (*sinks*) e ruídos.

Para remoção dos *sinks* é comum utilizar filtros como a ferramenta *Fill* para o preenchimento de depressões (Tarboton et al. 1991) e, atualmente, em arquivos matriciais tem sido utilizado a estatística focal (Dobos, Daroussin & Montanarella 2005; Ironside et al. 2018; Rademann et al. 2019; Smith et al. 2006). Especificamente no MDE, a estatística focal realiza uma operação de vizinhança (convolução) e corrige as diferenças altimétricas dos *pixels*

adjacentes, aprimorando a qualidade do modelo do terreno, e dos parâmetros morfométricos primários.

Este trabalho investigou o efeito da estatística focal no pré-processamento de três MDE (ALOS, ASTER-GDEM e SRTM) e sua capacidade de corrigir as irregularidades do modelo, de forma a melhorar a representação espacial de variáveis geomorfológicas e hidrológicas.

2 Área de Estudo

A área na qual foi desenvolvida a análise compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio, localizada no município de São Pedro, na região centro-leste do estado de São Paulo. A área é limitada pelas coordenadas UTM 194000 - 199000 E e 7507000 - 7491000 N, zona 23S e possui uma área de 48,06 km², na qual 5 km² correspondem a uma porção da área urbana do município de São Pedro (SP) (Figura 1).

Em relação as unidades geológicas, na região ocorrem rochas sedimentares das Formações Itaqueri, Pirambóia e Botucatu (compostas essencialmente por arenitos), e rochas ígneas da Formação Serra Geral (Pejon 1992). A Formação Pirambóia ocupa 91,4% da área de estudo, sendo composta por arenitos finos a médios, e caracteriza-se pela presença de arenitos de granulação fina a média, de cores variegadas com estratificações cruzadas.

Segundo Gomes (2002), na BHRM ocorrem três sistemas de terreno (A, B e C), compostos por 16 unidades, agrupadas conforme suas características morfométricas (Figura 2). A área de planaltos corresponde ao Sistema A; a região de escarpas com declividades elevadas e sopé de talude compõem o Sistema B; e a área de depressão é representada pelo Sistema C.

A caracterização destes terrenos foi utilizada como base nas análises desenvolvidas, e para isto foram considerados quatro sistemas (A, B, C_A e C_B). A divisão dos sistemas C em C_A e C_B foi adotada de forma a favorecer a análise da área em parcelas com menor heterogeneidade do relevo. A maioria dos terrenos do Sistema C_A são encostas retilíneas com baixa declividade, enquanto os terrenos do Sistema C_B são caracterizados por vertentes convexas de declividade moderada.

A escolha da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio se deve a disponibilidade de dados cartográficos, como as cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC); e mapas básicos (unidades do terreno) que auxiliaram a compreensão das respostas dos MDE, e das variáveis geomorfológicas e hidrológicas frente aos diferentes sistemas do terreno (planalto, escarpas e depressão).

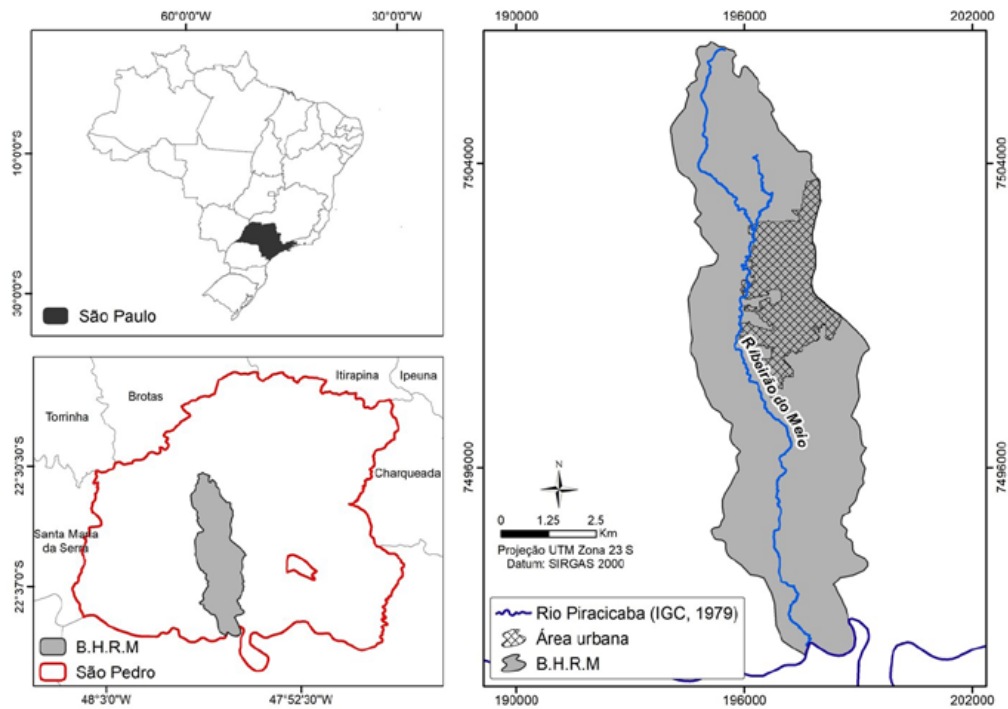


Figura 1 Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Meio (BHRM) no município de São Pedro (SP).

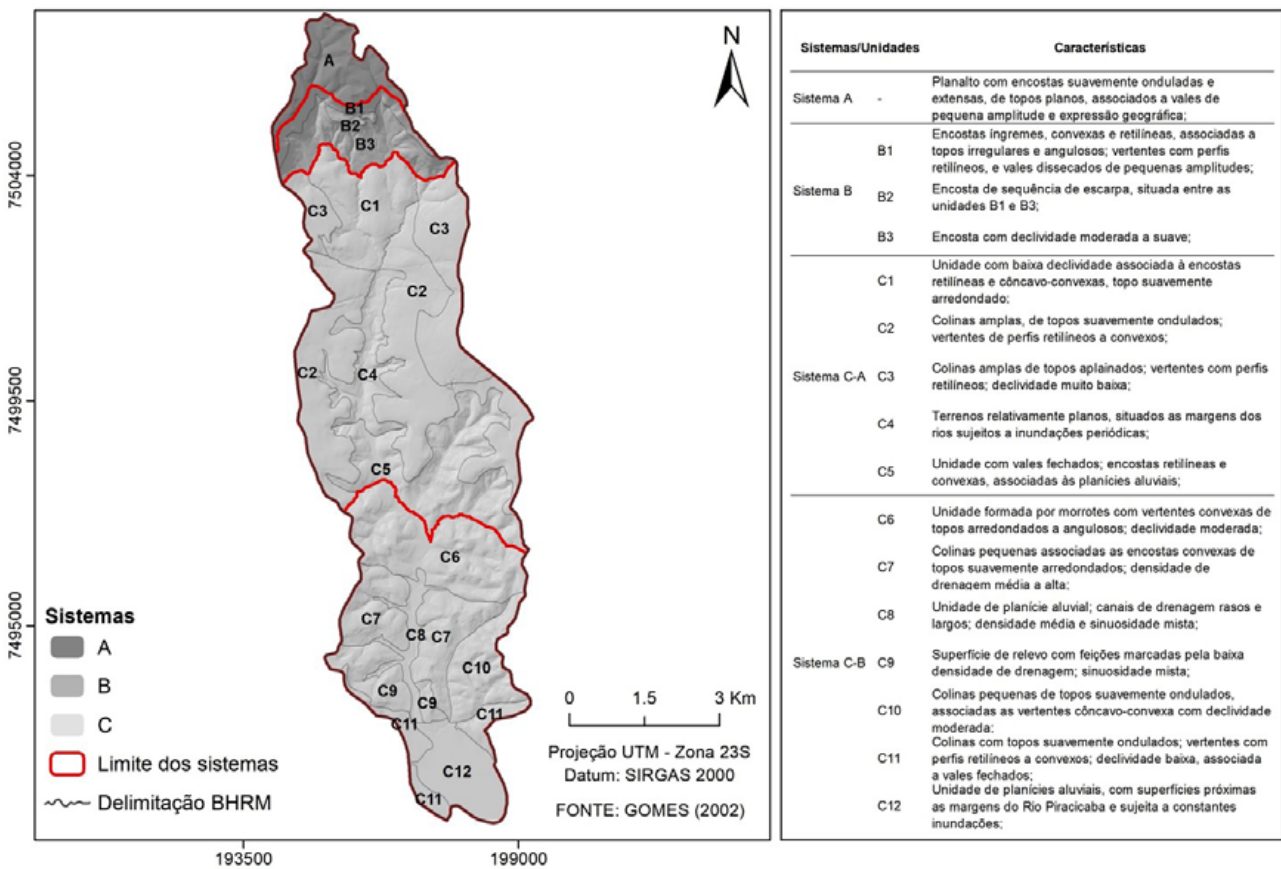


Figura 2 Mapa de unidades do terreno, destacando os quatro sistemas (A, B, C_A e C_B) e as características das 16 unidades.

Proof - 23-08-2021 - 15:02

3 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados os MDE globais ALOS (Japan Aerospace Exploration Agency 2020), ASTER-GDEM (National Aeronautics and Space Administration 2020), e SRTM (United States Geological Survey 2020), obtidos a partir de dados orbitais; e o modelo de elevação obtido através das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico (1979). A Tabela 1 apresenta a descrição dos MDE globais gratuitos, que foram selecionados por apresentarem a mesma resolução espacial (30 m).

É interessante ressaltar que os MDE (ALOS, ASTER-GDEM e SRTM) são compatíveis com escalas de 1:100.000 e 1:50.000 conforme os padrões de classes de exatidão cartográfica (PEC) (Miceli et al. 2011; Souza et al. 2019), e as cartas topográficas estão na escala 1:10.000 (Instituto Geográfico e Cartográfico 1979). Nesse sentido, poderão ser observadas diferenças nos perfis topográficos e nos mapas derivados, entretanto por ser o produto topográfico mais convencional disponível no banco de dados da área de estudo utilizou-se o MDE oriundo da carta topográfica como referência nas análises comparativas.

Outra ressalva deve ser feita em relação aos sistemas de referência das altitudes ortométricas. Como mostra a Tabela 1, os MDE globais utilizam o modelo EGM 96 (*Datum* vertical WGS84), enquanto as cartas topográficas utilizam o *Datum* Altimétrico do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), denominado comumente *Datum* de Imbituba. Segundo Luz (2002) e Barros et al. (2007), as diferenças altimétricas encontradas entre estes sistemas são de aproximadamente 0,1 m e 0,54 m. Valores dessa magnitude poderiam implicar diferenças de 0,02% a 0,1% na altitude, considerando a altitude média de 556 m para a área de estudo. Como esses valores não são significativos, optou-se por não realizar a compatibilização.

O modelo digital de elevação ALOS *World* 3D (AW3D30), com resolução horizontal de aproximadamente 30 m (1 arco-segundo) foi gerado a partir de imagens coletadas pelo sensor óptico *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM) a bordo do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), de 2006 a

2011 (Japan Aerospace Exploration Agency 2020). É importante destacar que neste trabalho não foi utilizado o MDE ALOS/PALSAR, uma vez que os dados disponíveis para o Brasil consistem em uma reamostragem do SRTM GL1 (Alaska Satellite Facility 2015).

A missão ASTER é um projeto cooperativo entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *Japan's Ministry of Economy Trade and Industry* (METI) desenvolvido com o objetivo de obter imagens de alta resolução (15 a 90 m) da superfície terrestre. O ASTER-GDEM v3 com resolução espacial de 30 m foi gerado a partir das imagens (pares estéreo) coletadas pelo instrumento ASTER a bordo do satélite TERRA (National Aeronautics and Space Administration 2020).

A missão SRTM é um projeto conjunto desenvolvido pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e NASA, lançado em 2002 com o objetivo de coletar dados topográficos da superfície terrestre com pontos localizados a cada 1 arco-segundo, banda C, com precisão vertical de 16 m (United States Geological Survey 2020).

Os métodos foram divididos em quatro etapas principais e todos os processamentos foram executados no *software* ArcGIS 10.5 (ArcGIS 2016).

3.1 Aquisição e Preparação da Base de Dados

Na primeira etapa foram obtidos os MDE a partir de três fontes de dados distintas, conforme descrito na Tabela 1. Além destes modelos, também foi gerado um quarto modelo por meio da interpolação dos arquivos vetoriais (vetorização manual) derivados das cartas topográficas. A interpolação foi realizada com a ferramenta *Topo to Raster*, utilizando como dados de entrada as curvas de nível, pontos cotados e rede drenagem. Segundo Augusto Filho (2013), essa ferramenta tem como vantagem a possibilidade de utilizar a rede de drenagem e conexão entre os canais, permitindo a obtenção de um modelo mais consistente do ponto de vista hidrológico. O MDE Carta Topográfica, com resolução de 30 m foi utilizado como dado de referência neste trabalho por ser a base topográfica mais exata, de forma similar a estratégia adotada em outros estudos, como Kovalchuck et al. (2019).

Tabela 1 Descrição dos MDE (ALOS, ASTER-GDEM e SRTM).

PRODUTO	MÉTODO	ALTITUDE	FONTE
ALOS <i>WORLD</i> 3D AW3D30	Fotogrametria orbital	Ortométrica pelo modelo geoidal EGM96	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm
ASTER GDEM v3	Fotogrametria orbital	Ortométrica pelo modelo geoidal EGM96	https://earthdata.nasa.gov
SRTM v3	InSAR (Banda C)	Ortométrica pelo modelo geoidal EGM96	https://earthexplorer.usgs.gov

Todos os MDE utilizados neste trabalho foram referenciados no sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM) - Datum SIRGAS 2000 (Zona 23 S).

3.2 Pré-processamento

A segunda etapa consistiu no pré-processamento dos MDE com a aplicação de ferramentas de análise espacial (Figura 3). Inicialmente a ferramenta *Fill* foi aplicada para remover os *sinks* e garantir a obtenção de dados hidrologicamente consistentes. Na etapa seguinte, realizou-se a aplicação de um filtro espacial utilizando a técnica de convolução bidimensional através da ferramenta *Focal Statistics*, que executa uma operação de vizinhança entre os *pixels* e calcula novos valores com base na média dos *pixels* no entorno (ArcGIS 2020). Na operação da estatística focal considerou-se um raio de busca circular com diferentes tamanhos, sendo 2, 3, 4 e 5 *pixels*, como valor máximo, para evitar uma generalização excessiva na paisagem (Dobos, Daroussin & Montanarella 2005). Outras geometrias de vizinhança podem ser usadas no processamento, mas segundo Cohen et al. (2018), a ferramenta de busca circular garante uma suavização uniforme.

3.3 Análise dos Dados Altimétricos

Para avaliar o desempenho dos MDE após o uso estatística focal considerou-se o cálculo da raiz do erro médio quadrático (REM_Q), conforme a Equação 1. Segundo Augusto Filho (2013), o REM_Q é um método útil para validar quantitativamente os MDE.

$$REM_Q = \sqrt{EMQ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_0 - z_i)^2}{N}} \quad (1)$$

Onde: z_0 é o valor extraído para o MDE (Carta Topográfica); z_i é o valor para o MDE; e N = número total de pontos testados.

A comparação múltipla dos dados altimétricos foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA). A ANOVA é um teste estatístico que realiza uma comparação entre as médias de diferentes grupos amostrais e testa a hipótese de que todas as médias são iguais. O procedimento de comparação múltipla adotado neste trabalho foi o Teste *Tukey*, aplicado para um conjunto de dados com tamanhos amostrais iguais (Field 2009).

Para a obtenção dos valores altimétricos foram gerados 270 pontos de forma aleatória distribuídos de maneira homogênea na área de estudo. Os pontos foram gerados a partir da ferramenta *Create Random Points* e os valores de altitude foram extraídos por meio da ferramenta *Extract by value points*, na qual os valores para cada ponto são calculados para uma determinada camada *raster* por meio interpolação bilinear a partir das células adjacentes. O tamanho da amostra foi definido com base na *grid* da bacia, composto por 106.080 *pixels* de 30 m e para aplicação do teste de comparação múltipla (*Tukey*) utilizou-se o *software IBM SPSS Statistics 26* (SPSS 2019).

Após a aplicação do *Fill* e *Focal Statistics* foram gerados os perfis topográficos para o sistema de terreno A, no sentido Oeste-Leste (perpendicular à orientação geral da bacia hidrográfica). Como a estatística focal realiza uma operação suavizando as diferenças entre os *pixels* vizinhos no MDE, buscou-se avaliar seu efeito na alteração morfológica do terreno por meio dos perfis. Nesta etapa, considerou-se apenas o sistema de terreno A por ser uma região com características morfológicas homogêneas (Gomes 2002).

3.4 Declividade e Fluxo Acumulado

Na terceira etapa realizou-se a aquisição de variáveis geomorfológicas e hidrológicas. Inicialmente foi realizada a análise hidrológica para obtenção do mapa de fluxo acumulado com auxílio do *plugin TauDEM*, que utiliza o algoritmo *D-Infinity* e distribui de maneira proporcional a direção de fluxo entre os *pixels* (Tarboton 1997). Posteriormente, também foram gerados os mapas de

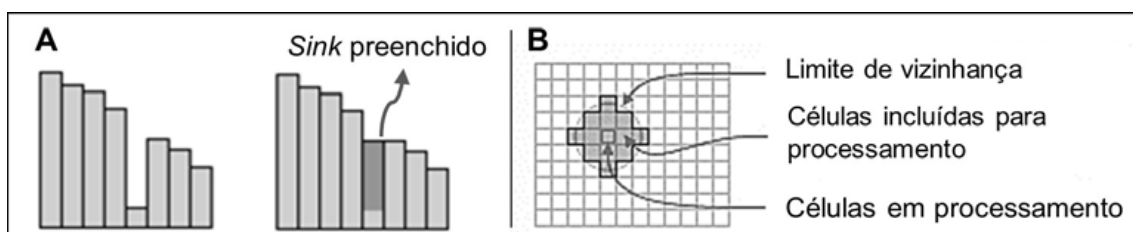


Figura 3 Ferramentas *Fill* (a) e *Focal Statistics* com operação de vizinhança circular, $r = 2$ (b).

Fonte: ArcGIS (2020).

declividade em valores percentuais através da ferramenta *Slope*. Para classificação do mapa de declividade, adotou-se os critérios recomendados pelo Instituto Geológico (1993), que considera os efeitos do escoamento superficial nas classes de declividade.

Por fim, para avaliar o efeito da ferramenta *Focal Statistics* nas variáveis geomorfológicas e hidrológicas realizou-se uma análise estatística de correlação no *software IBM SPSS Statistics 26* (SPSS 2019). A comparação foi realizada considerando os valores extraídos com os diferentes MDE (ALOS, ASTER-GDEM e SRTM) e os dados oriundos do MDE Carta Topográfica. Assim como na aquisição dos dados altimétricos, nesta etapa foram utilizados os 270 pontos aleatórios e os valores foram extraídos a partir da ferramenta *Extract by value points*.

4 Resultados

4.1 MDE

Os MDE Carta Topográfica, ALOS e SRTM apresentaram pequenas variações em relação aos valores de elevação, enquanto o MDE ASTER-GDEM apresentou uma distribuição de valores máximo e mínimo diferente dos

demais (Figura 4). Com relação à média e desvio padrão os valores obtidos foram $556,81 \pm 105,31$ m; $562,20 \pm 104,81$ m; $564,35 \pm 104,25$ m e $564,04 \pm 104,86$ m respectivamente para os dados oriundos da Carta Topográfica, ALOS, SRTM e ASTER-GDEM.

Buscando avaliar a exatidão dos MDE ALOS, ASTER-GDEM e SRTM realizou-se uma comparação com os valores de altitude obtidos do MDE Carta Topográfica. Analisando os dados estatísticos (Tabela 2) e o REMQ (Figura 5), nota-se que a variação quantitativa produzida com a aplicação do *Focal Statistics* é relativamente pequena, quando comparado com os dados brutos, entretanto, deve-se destacar que no geral o uso da ferramenta reduziu os valores do REMQ.

Em relação aos resultados do Teste *Tukey* é possível concluir que todos os valores altimétricos são significativamente próximos (*sig.* > 5%). Entretanto, o MDE ALOS possui maior similaridade com o MDE Carta Topográfica, ou seja, menor diferença entre os valores de altitude. Apesar de serem estatisticamente iguais, os dados mostram uma pequena discrepância entre o MDE SRTM e ASTER-GDEM quando comparados com o MDE Carta Topográfica (diferença média > 5 m). Observa-se também que ao adotar valores de raio de busca maiores para a

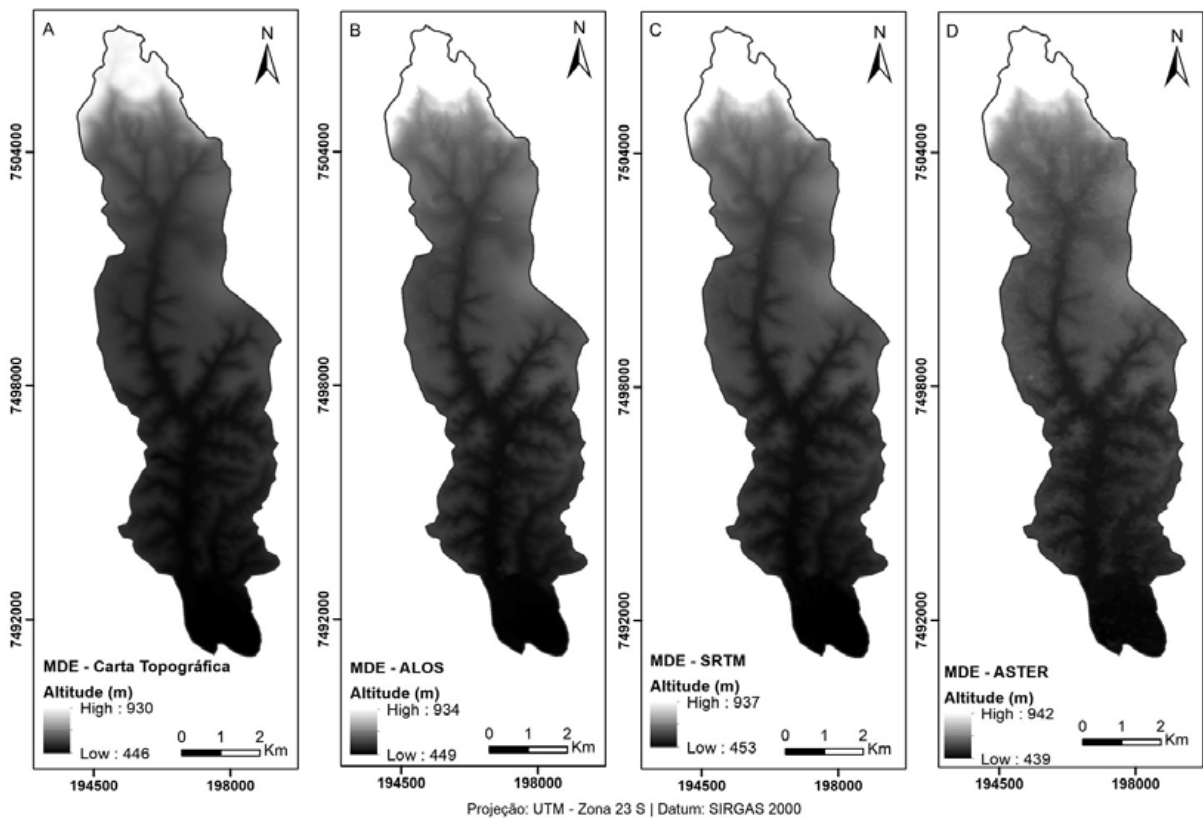


Figura 4 MDE: Carta Topográfica (a), ALOS (b), SRTM (c) e ASTER-GDEM (d).

Tabela 2 Resultado do Teste *Tukey* e REMQ para os MDE (ALOS, SRTM E ASTER-GDEM) com diferentes configurações para a estatística focal.

TESTE TUKEY							
MDE		Diferença média	Erro padrão	Sig.	Limite inferior	Limite superior	REMQ
Sem Focal Statistics	ALOS	-5,815	8,788	0,911	-28,428	16,798	7,760
	SRTM	-8,260	8,788	0,783	-30,873	14,354	10,230
	ASTER-GDEM	-8,026	8,788	0,798	-30,639	14,587	11,440
Focal Statistics com raio de 2 pixels	ALOS	-5,924	8,778	0,907	-28,510	16,663	7,720
	SRTM	-8,281	8,778	0,781	-30,868	14,305	10,220
	ASTER-GDEM	-7,963	8,778	0,801	-30,549	14,624	10,980
Focal Statistics com raio de 3 pixels	ALOS	-5,996	8,769	0,903	-28,559	16,566	7,910
	SRTM	-8,337	8,769	0,777	-30,899	14,226	10,380
	ASTER-GDEM	-8,056	8,769	0,795	-30,619	14,506	10,950
Focal Statistics com raio de 4 pixels	ALOS	-6,078	8,755	0,899	-28,606	16,450	8,290
	SRTM	-8,399	8,766	0,773	-30,954	14,157	10,630
	ASTER-GDEM	-8,146	8,766	0,789	-30,701	14,410	11,060
Focal Statistics com raio de 5 pixels	ALOS	-6,151	8,729	0,895	-28,612	16,310	8,870
	SRTM	-8,473	8,729	0,766	-30,934	13,988	11,080
	ASTER-GDEM	-8,221	8,729	0,782	-30,682	14,240	11,360

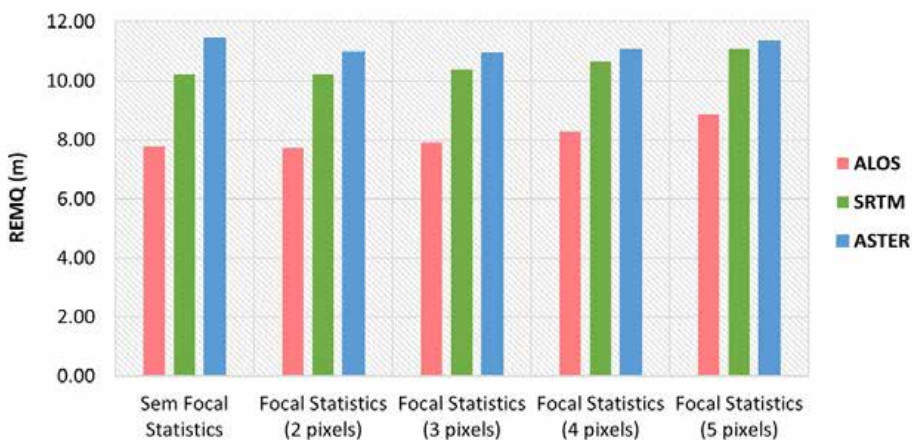


Figura 5 REMQ para os MDE ALOS, SRTM e ASTER-GDEM com diferentes configurações para a estatística focal.

ferramenta *Focal Statistics*, a diferença entre as médias aumenta, o que ocorre possivelmente por conta de uma suavização em excesso da superfície.

Os resultados demonstram que o valor de raio de busca ideal deve proporcionar uma melhora na qualidade do MDE reduzindo as diferenças médias em relação a uma base topográfica mais exata. Nesse sentido, para os MDE ALOS, ASTER-GDEM e SRTM o raio com 2 pixels apresentou melhores resultados. Deve-se destacar que a aplicação da estatística focal otimizou de maneira significativa o MDE ASTER-GDEM, reduzindo a diferença entre os valores de altitude e o REMQ.

4.2 Aplicação da ferramenta *Focal Statistics* x Perfis Topográficos

A análise do impacto da estatística focal na morfologia do terreno foi feita com o uso dos perfis topográficos, que mostram o efeito dos diferentes valores do raio de busca (Figura 6). Inicialmente, pode-se observar a presença dos ruídos provenientes dos dados brutos (MDE sem o uso do *Focal Statistics*), principalmente no MDE ASTER-GDEM. Conforme esperado, observa-se que o perfil derivado do MDE (Carta Topográfica) representa melhor os fundos de vale, o que se deve a escala do produto original (1:10.000).

Proof – 23-08-2021 - 15:02

Proof – 23-08-2021 - 15:02

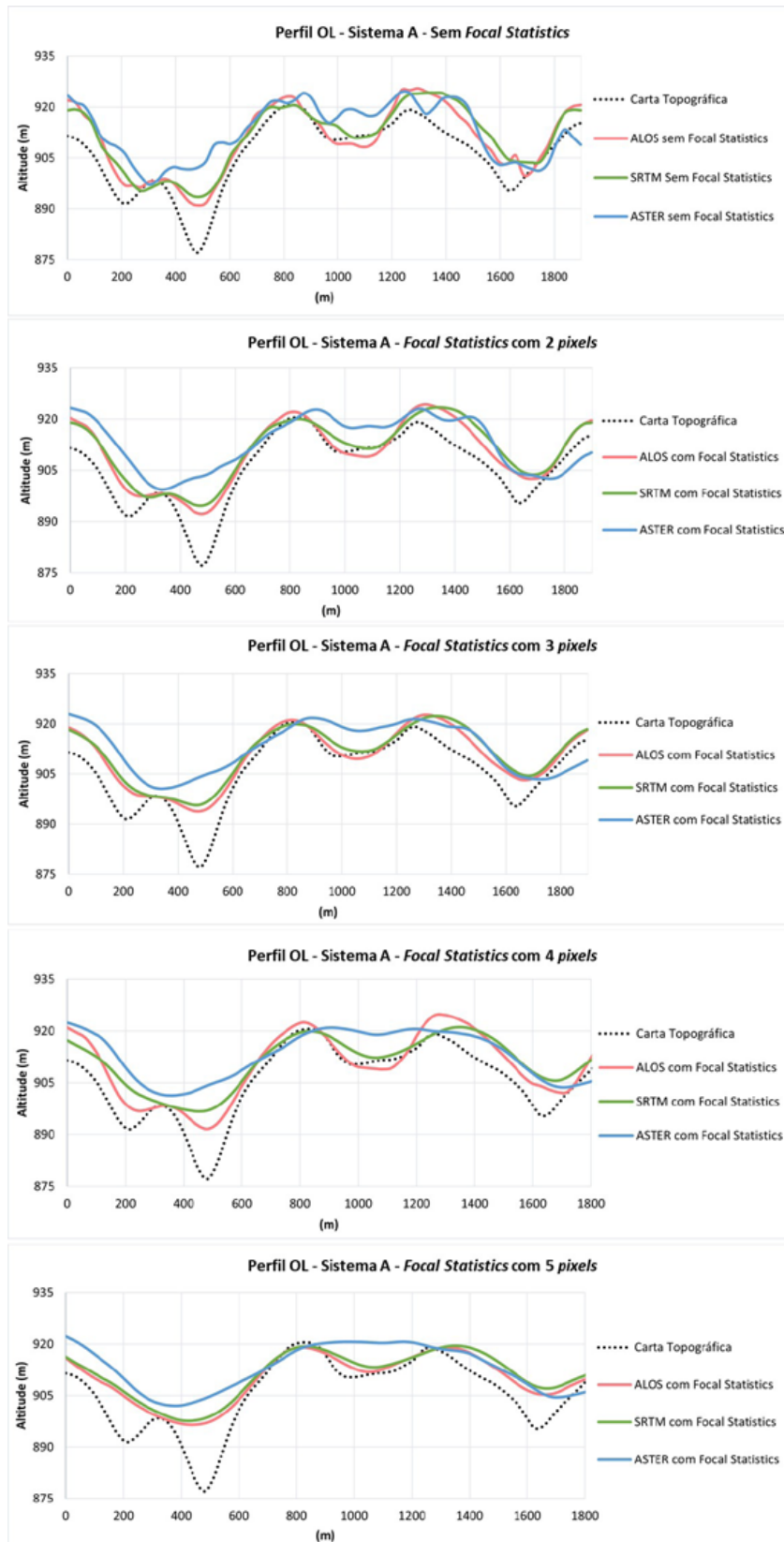


Figura 6 Perfis topográficos do sistema A derivados dos MDE (Carta Topográfica, ALOS, SRTM e ASTER-GDEM) com diferentes valores de raio de busca para a estatística focal.

Ao analisar os diferentes valores de raio de busca, nota-se que a operação com círculo de 5 pixels condicionou uma generalização excessiva na paisagem para os três modelos (ALOS, ASTER-GDEM e SRTM), distorcendo principalmente a morfologia nos vales. De modo geral, valores menores garantem uma menor generalização do perfil topográfico e promovem ganhos quantitativos para os MDE, conforme apresentado na Tabela 2.

Analisando os perfis nota-se que o tamanho do círculo ideal, ou seja, aquele que removeu os ruídos sem afetar a representação do relevo foi raio com 2 pixels, para todos os MDE. Esse resultado corrobora com os resultados

obtidos com a análise estatística e REMQ. Embora o efeito da suavização tenha um efeito positivo da redução dos ruídos (conforme pode ser observado na Figura 6), limitações nos dados brutos do próprio modelo acabam afetando os dados quantitativos (diferença entre os valores médio de altitude e REMQ).

A Figura 7 apresenta os perfis no sentido Oeste-Leste elaborados para outros sistemas de terreno (B, C_A e C_B), apenas para o MDE ALOS, que, conforme a análise anterior, apresentou menores valores em relação a diferença média dos valores de altitude.

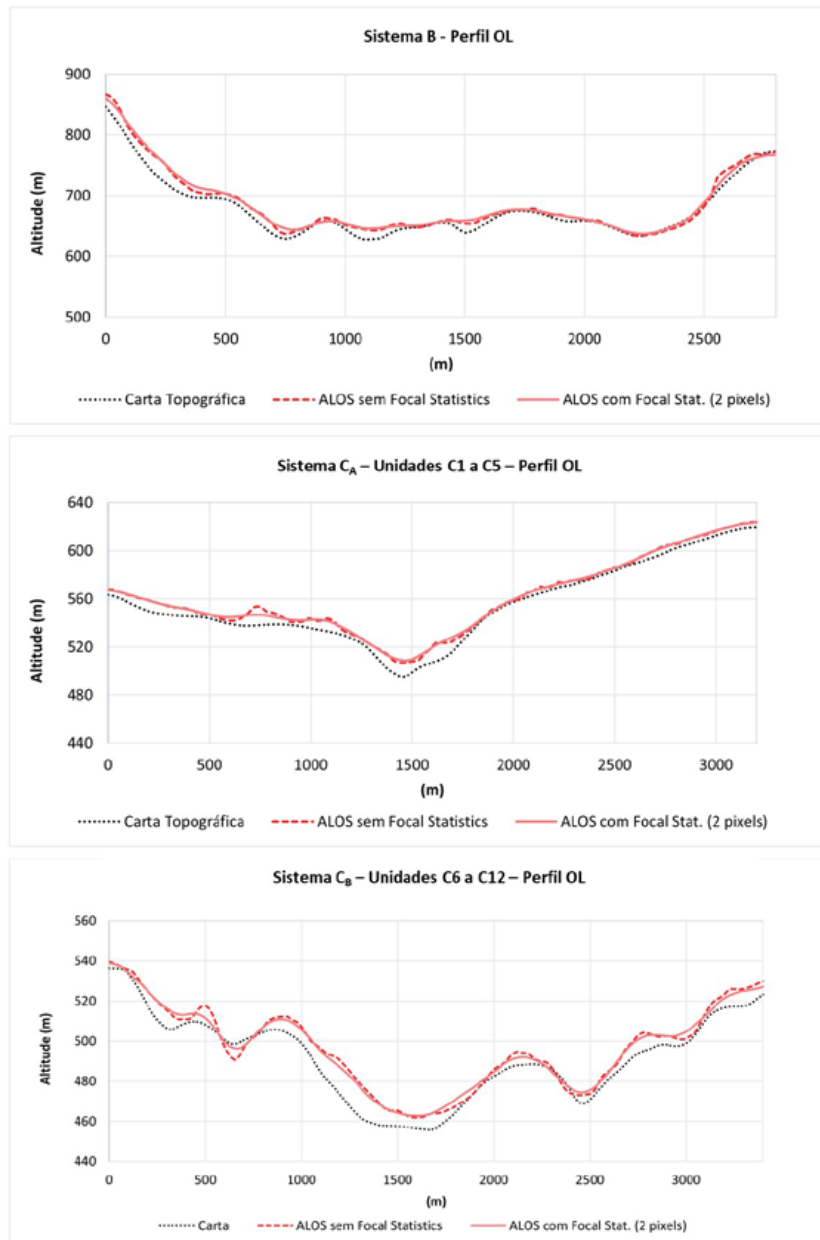


Figura 7 Perfis topográficos dos sistemas B, C_A e C_B derivados dos MDE (Carta Topográfica e ALOS) com diferentes valores de raio de busca para a estatística focal.

Proof - 23-08-2021 - 15:02

Analisando os perfis e os dados apresentados na Tabela 3, verifica-se que a aplicação do *Focal Statistics* também proporcionou uma melhora na qualidade e representação dos perfis do sistema de terreno C, reduzindo os valores do REMQ. Por outro lado, os resultados do Teste *Tukey* e REMQ para o sistema de terreno B evidenciam que houve uma perda de qualidade, quando comparada com

o perfil gerado sem a aplicação da ferramenta estatística. Especificamente para o sistema C a aplicação do *Focal Statistics* (raio de 2 *pixels*) reduziu a diferença média e o REMQ. Ou seja, o uso da estatística focal tende a gerar resultados melhores para regiões com relevo suavemente ondulado com baixa declividade, característico dos sistemas de terreno A, C_A e C_B.

Tabela 3 Resultado do Teste *Tukey* para os sistemas B, C_A e C_B utilizando como base o MDE ALOS (com e sem a estatística focal).

TESTE TUKEY							
MDE		Diferença média	Erro padrão	Sig.	Limite inferior	Limite superior	REMQ
Sistema B	ALOS sem <i>Focal Statistics</i>	-8,158	7,552	0,527	-25,951	9,636	11,885
	ALOS com <i>Focal Statistics</i>	-8,886	7,552	0,468	-26,680	8,908	12,641
Sistema C _A (Unidades C1 a C5)	ALOS sem <i>Focal Statistics</i>	-5,537	4,376	0,416	-15,840	4,767	6,483
	ALOS com <i>Focal Statistics</i>	-5,595	4,376	0,408	-15,899	4,709	6,401
Sistema C _B (Unidades C6 a C12)	ALOS sem <i>Focal Statistics</i>	-5,499	2,746	0,113	-11,963	0,964	7,200
	ALOS com <i>Focal Statistics</i>	-5,162	2,746	0,146	-11,626	1,302	6,392

4.3 Efeito do Pré-processamento nas Variáveis Geomorfológicas e Hidrológicas

Para verificar a influência da ferramenta *Focal Statistics* na representação espacial das variáveis geomorfológicas e hidrológicas foram gerados os mapas de declividade e fluxo acumulado para os três MDE (ALOS, ASTER-GDEM e SRTM) sem a técnica de convolução e com a técnica, adotando raio circular com 2 *pixels*. Comparando com os mapas derivados do MDE (Carta Topográfica), nota-se que esses são mais homogêneos quanto a representação das classes de declividade e fluxo acumulado, o que se deve a escala do levantamento topográfico.

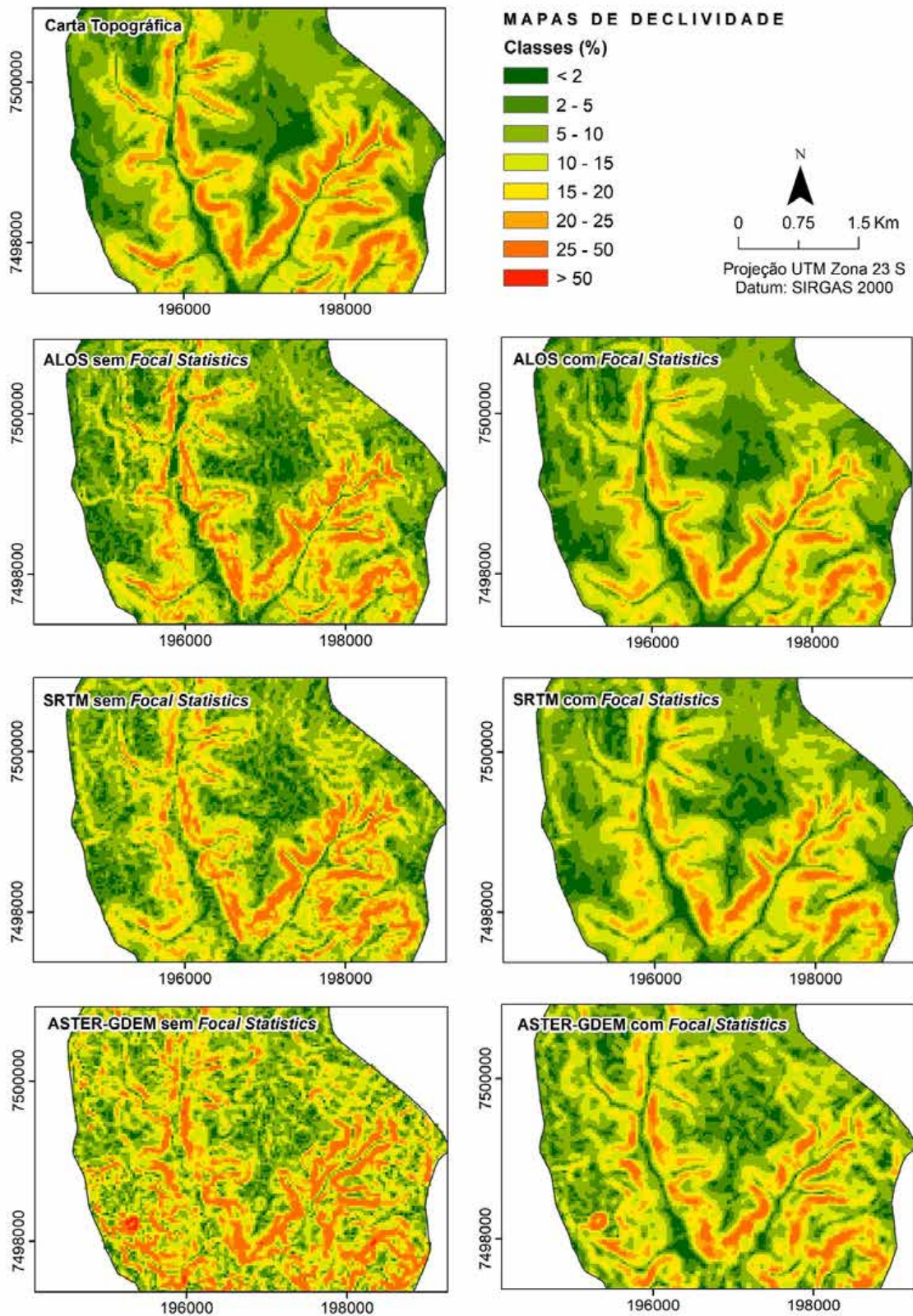
Ao analisar os mapas de declividade e fluxo acumulado dos MDE globais observa-se que no geral a presença dos ruídos compromete a representação espacial (Figuras 8 e 9). Verifica-se que o uso da estatística focal promove uma suavização das classes de declividade e fluxo acumulado, e consequentemente favorece a aquisição de produtos mais similares a dados topográficos convencionais, como o MDE Carta Topográfica.

Em termos quantitativos, ao analisar os valores de correlação de *Pearson* nota-se que, de fato, a aplicação do *Focal Statistics* permite uma melhor representação da declividade e fluxo acumulado (Tabela 4), ou seja,

aplicar a estatística focal como etapa adicional ao pré-processamento do MDE melhora a qualidade do produto e garante uma menor variação em relação a dados topográficos convencionais.

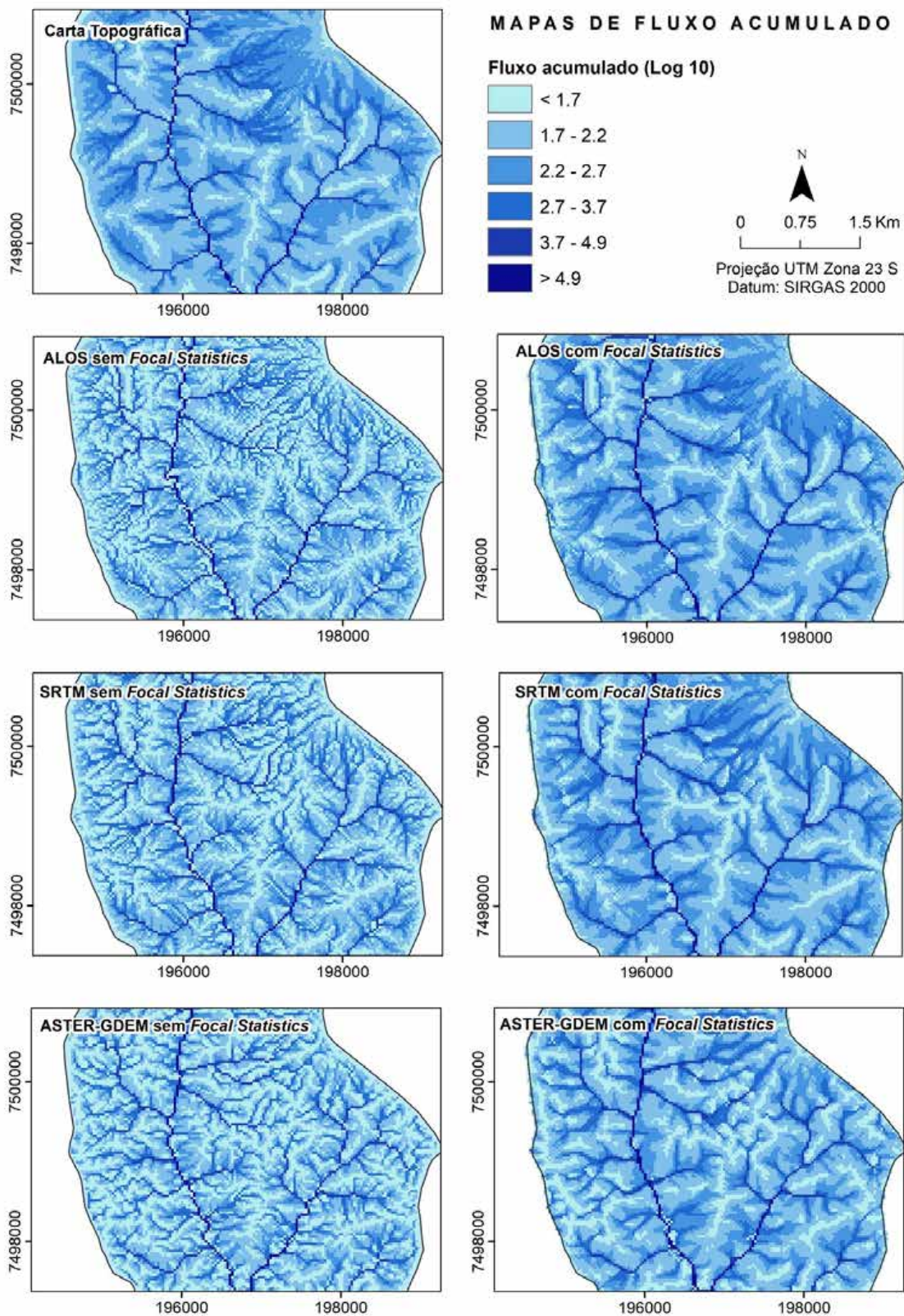
No geral, o MDE ALOS apresentou os melhores resultados, tanto para declividade quanto para o fluxo acumulado. Apesar de não apresentar ganhos significativos em relação a análise altimétrica (Tabela 2), é importante destacar que a aplicação da técnica de convolução proporcionou ganhos para as variáveis morfológicas derivadas do MDE SRTM. As variáveis extraídas do MDE ASTER-GDEM também apresentaram ganhos após a aplicação da técnica, entretanto os resultados evidenciam que este modelo possui qualidade inferior aos demais.

É importante destacar que o fluxo acumulado derivado dos MDE com aplicação do *Focal Statistics* retornou melhores valores de correlação, entretanto, os valores foram menores quando comparados com os valores de declividade. Isso ocorre, porque o fluxo acumulado representa o valor de todos os *pixels* que fluem para cada *pixel* a jusante, acumulando os dados no *raster* de saída e os erros associados. Consequentemente, as diferenças entre os valores advindos de cada MDE se tornam mais evidentes, diferente da declividade, que considera apenas os valores para um único *pixel*.



Proof - 23-08-2021 - 15:02

Figura 8 Mapas de declividade utilizando como base o MDE Carta Topográfica e diferentes configurações para os MDE: ALOS, SRTM e ASTER-GDEM.



Proof - 23-08-2021 - 15:02

Figura 9 Mapas de fluxo acumulado utilizando como base o MDE Carta Topográfica e diferentes configurações para os MDE: ALOS, SRTM e ASTER-GDEM.

Tabela 4 Coeficiente de correlação das variáveis declividade e fluxo acumulado derivadas dos MDE (ALOS, SRTM e ASTER-GDEM), com e sem a estatística focal.

Variável	MDE	Sem a estatística focal		Com a estatística focal	
		Coefficiente de correlação de Pearson (R)	Sig.	Coefficiente de correlação de Pearson (R)	Sig.
Declividade	ALOS	0,879	0,000	0,924	0,000
	SRTM	0,869	0,000	0,908	0,000
	ASTER-GDEM	0,692	0,000	0,812	0,000
Fluxo acumulado	ALOS	0,485	0,000	0,520	0,000
	SRTM	0,235	0,000	0,416	0,000
	ASTER-GDEM	0,336	0,000	0,374	0,000

A correlação é significativa ao nível de 0,01 (bilateral).

5 Discussões

De maneira geral o uso da técnica de convolução nos MDE melhorou a qualidade dos modelos, assim como o desempenho das variáveis derivadas. Houve redução dos ruídos para os três MDE, melhorando a representação do relevo nos perfis topográficos, e dos mapas de declividade e fluxo acumulado. Os dados quantitativos e comparativos evidenciam o ganho na qualidade, em comparação com MDE convencionais (Carta Topográfica).

Comparando os três MDE, pôde-se concluir que o MDE ALOS possui qualidade superior aos demais, visto que a diferença média entre os valores de altitude e REMQ para o MDE com *Focal Statistics* foram menores e, portanto, entre os produtos analisados é o mais preciso. É importante destacar que o efeito da estatística focal foi mais positivo em regiões de relevo suavemente ondulados com baixa declividade, característico dos sistemas de terreno A e C.

Em relação aos demais MDE, houve ganhos em relação ao valor do REMQ para o MDE ASTER-GDEM e SRTM, entretanto as diferenças entre os valores médios de altitude foram relativamente maiores. Buitrago & Matínez (2016) e Kovalchuck et al. (2019) em suas pesquisas, também concluíram que esses modelos podem apresentar amplitudes adversas e menor qualidade quando comparado com os demais MDE, como o ALOS.

Desta forma, para garantir o aprimoramento da qualidade dos MDE deve-se estabelecer um valor adequado para o raio de busca, condizente com as características topográficas da área. Os resultados deste trabalho mostraram que ao aumentar o raio de busca (5 *pixels*) ocorre uma generalização excessiva na paisagem, comprometendo a representação de aspectos do relevo, como os vales. Smith et al. (2006) concluíram que o tamanho ideal da operação de vizinhança na estatística focal depende de cada paisagem e do MDE.

Nesse sentido, o melhor resultado para os três MDE foi obtido com raio de 2 *pixels*. Dobos, Daroussin & Montanarella (2005) adotou valores entre 4 e 6 *pixels* para MDE SRTM (90 m); Ironside et al. (2018) usou um raio circular de 2 *pixels* para um MDE de 30 m; e Rademann et al. (2019) considerou um raio de 3 *pixels* para o MDE SRTM (90 m). Esses resultados evidenciam a necessidade de realizar uma análise preliminar considerando as características morfológicas para estabelecer um valor ideal para a operação de vizinhança.

Em relação as variáveis geomorfológicas e hidrológicas, verifica-se que a aplicação do *Focal Statistics* também proporciona uma representação espacial mais uniforme da declividade e fluxo acumulado. Os dados derivados do MDE com estatística focal apresentaram menor variação em relação aos dados oriundos da Carta Topográfica. Dobos, Daroussin & Montanarella (2005) destaca que a estatística focal favorece a representação homogênea das classes de declividade, e para Rademann et al. (2019), o uso do *Focal Statistics* melhora a representação do índice de rugosidade, e assim proporciona uma melhor identificação dos padrões de relevo.

As pequenas variações nos valores de declividade e fluxo acumulado se justificam em função dos diferentes métodos de aquisição (carta topográfica *versus* radar/estereoscopia). Além disso, os MDE são conhecidos por apresentar forte influência de áreas com florestas e silvicultura, que acabam gerando flutuações nos modelos do terreno, por isso, a aplicação do *Focal Statistics* se faz necessária.

6 Conclusões

Os resultados deste trabalho mostraram que o uso da estatística focal como ferramenta adicional ao pré-processamento de MDE, melhora a qualidade da superfície do

terreno e dos parâmetros derivados, pois reduz os ruídos, depressões espúrias, e corrige as diferenças altimétricas entre *pixels* adjacentes. Esse efeito positivo também foi observado nos produtos derivados (mapas de declividade e fluxo acumulado). Contudo, é importante que sejam realizados testes para definir o tamanho da operação de vizinhança (raio de busca), de maneira que esse valor preserve as características morfológicas, evitando uma suavização em excesso da paisagem.

Ao comparar o efeito da ferramenta nos MDE ALOS, ASTER-GDEM e SRTM, concluiu-se que o MDE ALOS apresentou melhor desempenho, em relação a análise altimétrica e variáveis geomorfológicas e hidrológicas. Para os MDE ASTER-GDEM e SRTM também foram obtidos bons resultados quantitativos, porém com qualidade inferior ao MDE ALOS, entretanto o pré-processamento nestes modelos proporcionou uma melhoria significativa nos perfis topográficos e variáveis geomorfológicas. Nesse sentido, o uso da técnica de convolução agrega qualidade aos MDE disponíveis gratuitamente, e, portanto, fornece melhores condições para o desenvolvimento de análises espaciais do terreno.

A aplicação da estatística focal proporcionou uma distribuição espacial mais homogênea das variáveis geomorfológicas e hidrológicas. Ou seja, a correção das irregularidades do terreno, permitiu a aquisição de mapas de declividade e fluxo acumulado mais similares aos dados topográficos convencionais (cartas topográficas). Essas variáveis são fundamentais para diversos estudos geológicos e ambientais, e o uso desta ferramenta pode contribuir com o desenvolvimento de análises e previsões mais coerentes. Por fim, deve-se destacar que o uso de dados digitais disponíveis em escala global otimiza o tempo de processamento das análises, e principalmente favorece o desenvolvimento de estudos em diversas regiões em escala regional.

Por fim, sugere-se a validação da estatística focal com outros métodos de obtenção do MDE, como levantamento com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), visto que muitos autores utilizam esse método como forma de validação dos MDE globais. Por último, avanços ainda podem ser feitos no sentido de testar os valores do raio de busca da estatística focal em regiões com características de relevo diferentes, visto que o tamanho da operação depende de cada paisagem.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Processos 428428/2018-5 e 306074/2018-4), e destacam que o presente trabalho foi realizado com apoio

da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

8 Referências

- Arabameri, A., Pradhan, B. & Rezaei, K. 2018, 'Spatial prediction of gully erosion using ALOS PALSAR data and ensemble bivariate and data mining models', *Geosciences Journal*, vol. 7, no. 114, pp. 669-86.
- Araújo, P.V., Amaro, V.E., Alcoforado, A.V.C. & Santos, A.L.S. 2018, 'Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 41, no. 1, pp. 351-64.
- ArcGIS 2020, programa de computador, version 10.5, ESRI.
- ArcGIS 2020, *ArcGIS for Desktop*, Brasil, acesso 12 Agosto 2020, <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-focal-statistics-works.htm>>.
- Alaska Satellite Facility 2015, *ASF Radiometrically terrain corrected ALOS PALSAR products*, Product guide, acessado em 24 Agosto 2020, <https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rte_product_guide_v1.2.pdf>.
- Augusto Filho, O. 2013, 'Sistema de informações geográficas aplicados à engenharia ambiental', in M.C. Calijuri & D.G.F. Cunha (eds), *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*, 1º edn, Elsevier Rio de Janeiro, pp. 643-67.
- Barros, R.S. & Cruz, C.B.M. 2007, 'Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM', *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 2007*, INPE, Florianópolis, pp. 1243-50.
- Buitrago, J.Y. & Martínez, L.J. 2016, 'Digital elevation models (DEM) used to assess soil erosion risks: a case study in Boyaca, Colombia', *Agronomia Colombiana*, vol. 34, no. 2, pp. 239-49.
- Carmo, A.M., Souto, M.V.S. & Duarte, C. R. 2015, 'Análise qualitativa e comparativa das variáveis morfométricas da região serrana da porção sul do maciço central do Ceará geradas através dos MDE: SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA', *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 67, no. 3, pp. 603-20.
- Chagas, C.S., Fernandes Filho, E.I., Rocha, M.F., Carvalho Junior, W. & Souza Neto, N.C. 2009, 'Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos', *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 14, no. 2, pp. 218-16.
- Cohen, S.G., Brakenridge, R., Kettner, A., Bates, B., Nelson, J., McDonald, R., Huang, Y.F., Munasinghe, D. & Zhang, J. 2018, 'Estimating floodwater depths from flood inundation maps and topography', *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 54, no. 4, pp. 847-858.
- Dobos, E., Daroussin, J. & Montanarella, L. 2005, 'An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1:1 and 1:5 million scales'. Official Publications of the European Communities, acessado em 24 Agosto 2020, <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC32420>>.
- Field, A. 2009, *Descobrimo a estatística usando o SPSS*, 2º edn, Artmed, Porto Alegre.

- Gomes, D. M. 2002, 'Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na Bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/SP, na escala 1:20.000', Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Instituto Geológico 1993, *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Campinas (SP)*, Relatório de Integração, vol. 1, São Paulo.
- Instituto Geográfico e Cartográfico 1979, *Cartas Topográficas*, Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, escala 1:10.000, São Paulo.
- Ironside, K.E., Mattson, D.J., Arundel, T., Theimer, T., Holton, B., Peters, M., Edwards, T.C. J. & Hansen, J. 2018, 'Geomorphometry in Landscape Ecology: Issues of Scale, Physiography, and Application', *Environment and Ecology Research*, vol. 6, no. 5, pp. 397-412.
- Japan Aerospace Exploration Agency 2020, *ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30 m (AW3D30)*, acessado em 3 Julho 2020, <<https://www.orc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>>.
- Khal, M., Algouti, A., Algouti, A., Akdim, N., Stankevich, S.A. & Menenti, M. 2020, 'Evaluation of open Digital Elevation Models: estimation of topographic indices relevant to erosion risk in the Wadi M'Goun watershed Morocco', *Geosciences*, vol. 6, no. 2, pp. 231-57.
- Kovalchuk, L.P., Lukianchuk, K.A. & Bogdanets, V.A. 2019, 'Assessment of open-source digital elevation models (SRTM-30, ASTER, ALOS) for erosion processes modeling', *Journal of geology, geography and geoecology*, vol. 28, no. 1, pp. 95-105.
- Luz, R.T. 2002, 'Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro', *Congresso Internacional de Ciencias de La Tierra*, 2002, IGM, pp. 1-10.
- Machado, V.S., Marcato Junior, J., Souza, M.K.G., Osco, L.P. & Ramos, A.P.M. 2019, 'Validação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Superfície Utilizando o Banco de Dados do Sistema de Gestão Fundiária: Um Estudo de Caso no Oeste do Estado de São Paulo', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 4, pp. 139-147.
- Miceli, B.S., Dias, F.M., Seabra, F.M., Santos, P.R.A. & Fernandes, M.C. 2011, 'Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas', *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 63, no. 1, pp. 191-201.
- Montgomery, D. 2003, 'Predicting landscape-scale erosion rates using digital elevation models', *Geoscience*, vol. 335, pp. 1121-1130.
- National Aeronautics and Space Administration 2020, *ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, acessado em 3 Julho 2020, <<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>>.
- Nelson, A., Reuter, H.I. & Gessler, P. 2009, 'DEM production methods and sources', in T. Hengl & H.I. Reuter (eds), *Geomorphometry: concepts, software, applications*, Elsevier, pp. 65-85.
- Nitheshnirmal, S., Thilagaraj, P., Abdul Rahaman, S. & Jegankumar, R. 2019, 'Erosion risk assessment through morphometric indices for prioritisation of Arjuna watershed using ALOS-PALSAR DEM', *Modelling Earth Systems and Environmental*, vol. 5, pp. 907-24.
- Orlandi, A.G., Carvalho Junior, O.A., Guimarães, R. F., Bias, E.S., Corrêa, D.C. & Gomes, R.A.T. 2019, 'Vertical accuracy assessment of the processed SRTM data for the Brazilian territory', *Bulletin of Geodetic Sciences*, vol. 25, no. 4, pp. 2-14.
- Paradella, W.R., Cecarelli, C.F., Luiz, S., Oliveira, C.G. & Okida, R. 2005, 'Geração de carta topográfica com estereopares fine do Radarsat-1 e dados ETM+ Landsat 7 em ambiente de relevo montanhoso na Região Amazônica (Serra dos Carajás, Pará)', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 35, no. 3, pp. 323-32.
- Pejon, O.J. 1992, 'Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba – SP (Escala 1:100.000: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos', Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Rademann, L.K., Dutra, D.S., Robainda, L.E. & Trentin, R. 2019, 'Análise da rugosidade do relevo utilizando a ferramenta Focal Statistics no município de Canguçu, RS', *Caderno de Geografia*, vol. 29, no. 58, pp. 805-818.
- Smith, M.P., Xing-Zhu, A., Burt, J.E. & Stiles, C. 2006, 'The effect of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey', *Geoderma*, vol. 137, pp. 58-69.
- Souza, M., Ramos, A.P.M. & Marcato Júnior, J. 2019, 'Análise da acurácia altimétrica do modelo digital de superfície ALOS AW3D30 para o Mato Grosso do Sul', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 3, pp. 333-8.
- SPSS Statistics 2019, programa de computador, version 26, IBM.
- Tarboton, D.G. 1997, 'A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models', *Water Resources Research*, vol. 33, no. 2, pp. 309-19.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L. & Rodriguez-Iturbe, I. 1991, 'On the extraction of channel networks from digital elevation data', *Hydrological Processes*, vol. 5, pp. 81-100.
- United States Geological Survey 2020, *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, acessado em 6 Julho 2020, <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-srtm-mission-summary?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>.

Recebido em: 01/10/2020

Aprovado em: 12/02/2021

Como citar:

Neves, M.P., Padilha, A.F.R., Bourscheidt, V. & Lollo, J.A.D. 2021, 'Otimização de Modelos Digitais de Elevação para a Obtenção de Variáveis Geomorfológicas e Hidrológicas: Avaliação da Convolução Bidimensional sobre os Produtos ALOS, ASTER-GDEM e SRTM', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 38692. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_38692