



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Qualidade de modelos digitais de elevação utilizando dados do SIGEF: Estudo de caso para as sub-bacias do Ribeirão dos Mangues e Rio Soninho no estado do Tocantins

Hugo Lopes Pereira<sup>1</sup>, Márcio José Catalunha<sup>2</sup>, Carlos Roberto Borges Junior<sup>3</sup>, Pablo Teixeira Gonzaga Sousa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA, UFT, Campus Palmas, avenida NS 15, ALCNO 14, Bloco I, Sala 22, CEP 77020-020, Palmas-TO, Autor correspondente: hugolp.eng@gmail.com. <sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA, UFT, Campus Palmas, avenida NS 15, ALCNO 14, Bloco I, Sala 22, CEP 77020-020, Palmas-TO, Autor correspondente: profcatalunhaft@gmail.com. <sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGEA, UFU, Campus Santa Mônica, avenida João Naves de Ávila, 2121 - Bairro Santa Mônica, Bloco 1H - Sala 1H35, CEP 38400-902, Uberlândia-MG. <sup>4</sup> Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP/ULBRA, Avenida Teotônio Segurado 1501 Sul, CEP 77.019-900, Palmas-TO.

Artigo recebido em 02/18/2018 e aceito em 15/01/2019

### RESUMO

A utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE's) aliados a técnicas de geoprocessamento são ferramentas de grande importância na modelagem hidrológica, no entanto sua utilização depende de estudos prévios que permitam detectar erros e imprecisões que geralmente estão associados a estes produtos. Estes estudos prévios consistem na comparação das altitudes dos Modelos digitais de Elevação em relação a altitudes de pontos de controle obtidas de fontes primárias (receptores GPS/GNSS geodésicos), verificação da existência de tendências, o Erro Médio Quadrático e a tolerância vertical das altitudes dos MDE's. Nesse estudo foram utilizados dados de altimetria dos MDE's SRTM 1 arc-segundo (*Shuttle Radar Topography Mission*), SRTM 3 arc-segundo, TOPODATA (Banco de dados geométricos do Brasil), ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), AW3D30 (*Advanced Land Observation Satellite World 3D res. 30m*) e ALOS PALSAR res. 12 m (*Advanced Land Observation Satellite*) comparados com os dados altimétricos dos vértices dos polígonos dos imóveis certificados no SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária) nas sub-bacias hidrográficas do ribeirão dos Mangues e rio Soninho, com objetivo avaliar o melhor MDE a ser usado em simulações hidrológicas nas referidas áreas. Os resultados mostram que o uso de pontos de referência oriundos do SIGEF para validação de MDE's globais é uma alternativa viável em locais de vazio cartográfico, como é caso do estado do Tocantins..

Palavras-chave: Modelo de elevação, bacias hidrográficas, manejo

**Quality of digital elevation models using SIGEF (*Portuguese abbreviation of System of Land Management*) data: Case study for the sub-basins of dos Mangues Stream and Soninho River in the state of Tocantins**

### ABSTRACT

The use of Digital Elevation Models (DEMs) together with geoprocessing techniques are important tools in hydrological modeling, however their use depends on previous studies that allow detecting errors and inaccuracies that are usually associated with these products. These previous studies consist of comparing the elevations of the DEMs in relation to control point altitudes obtained from primary sources (GPS / GNSS geodetic receivers), verifying the existence of tendencies, the Mean Square Error and the vertical tolerance of the altitudes of the MDE's. In this study we used altimetry data from SRM 1 arc-second (*Shuttle Radar Topography Mission*), SRTM 3 arc-second, TOPODATA (Brazilian Geometric Database), ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), AW3D30 (*Advanced Land Observation Satellite World 3D res 30m*) and ALOS PALSAR res. 12 m (*Advanced Land Observation Satellite*) compared to the altimetric data of vertices of polygons of real estate certified in the SIGEF (Land Management System) in the River Basins dos Mangues Stream and Soninho River, with the objective of evaluating the best DEM to be used in hydrological simulations in these areas. The results show that the use of reference points from the SIGEF for validation of global DEMs is a viable alternative in locations of cartographic void, as is the case of the state of Tocantins. Keywords: elevation Models, watershed, management.

## Introdução

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE's) são o conjunto de dados mais úteis para representação digital da superfície da Terra. Podem ser obtidos por meio de técnicas de sensoriamento remoto (interferometria, estereoscopia, etc), processos fotogramétricos, cartas topográficas obtidas por levantamento de campo usando teodolito, estação total ou GPS/GNSS. Têm a finalidade de representar tridimensionalmente a superfície terrestre, que pode ser visualizada pela hipsometria, pelo relevo sombreado, por pontos cotados, por curvas de níveis e pela visão em perspectiva. Essas informações aliadas a técnicas de geoprocessamento, permitem sua utilização em diversas tarefas que envolvam a análise tridimensional do relevo, no cálculo de volumes de terraplanagem em obras de infraestrutura e uma ampla gama de aplicações em hidrologia, geomorfologia, arqueologia, ecologia e muitos outros. Porém, sua utilização depende de estudos prévios que permitam detectar erros e imprecisões que geralmente ocorrem (Miceli et al. 2011; Santiago, 2013, Santillan e Makinano, 2016, Acharya, Yang e Lee, 2018).

Os MDE's são amplamente usados para vários estudos no campo da hidrologia. Inicialmente a delimitação de bacias hidrográficas era feita aplicando métodos tradicionais obtidos manualmente a partir de mapas e trabalhos de campo, apresentando resultados subjetivos. Com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) e o surgimento de novas técnicas computacionais, estas informações hidrográficas passaram a ser obtidas por meio dos MDE's, utilizando métodos automáticos ou semiautomáticos. A vantagem do uso de métodos automáticos para extração de dados hidrológicos, como: delimitação de bacias hidrográficas, extração da rede de drenagem, definição do canal principal e caracterização morfométrica; é que proporcionam maior rapidez, menor subjetividade e maior facilidade de reprodução em relação às técnicas manuais (Oliveira, et al. 2007; Siqueira, Fleischmann, et al., 2016; Acharya, Yang e Lee, 2018).

Segundo Gribbin (2014), as características hidrológicas de bacias hidrográficas eram obtidas manualmente em uma planta topográfica impressa. Essa mesma metodologia também pode ser aplicada em plantas topográficas direto em softwares CAD (*Computer-aided design*), que por sua vez só foram popularizados nos anos 2000, mesmo assim ainda se torna uma tarefa praticamente manual (Costa et al. 2017).

Dessa forma o conjunto de características que poderiam ser extraídas tornavam-se limitadas.

Pereira, H. L.; Catalunha, M. J.; Borges Junior, C.R.; Sousa, P. T. G.

Distâncias em linha curva eram medidas por aproximação poligonal ou pelo método mais cômodo, que é pela utilização de um curvímeter. Não muito diferente, para medição das áreas das bacias utilizava-se diversos métodos analíticos e geométricos, podendo destacar por sua precisão o Método de Simpson (Pestana, 2006).

## Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes

Conforme Oliveira et al. (2007), para delimitação automática a partir de modelos digitais de elevação (MDE) é necessário a construção de um MDE hidrologicamente corrigido (MDEHC). Para a obtenção do MDEHC, é necessário a interpolação das depressões espúrias dos MDE's, células cercadas por outras de maiores valores, incluindo células com valores "no data". Ele deve representar adequadamente o relevo da região em estudo, a ponto de permitir a correta simulação de processos hidrológicos. Este procedimento é realizado através de métodos automáticos de interpolação.

Furze et al. (2017), demonstrou que é possível a obtenção de MDEHC's com maior precisão vertical a partir da fusão dos MDE's SRTM 30 m, SRTM 90 m, ASTER GDEM e CDED (MDE gerado a partir de curvas de nível e pontos de elevação, disponível para o território do Canadá). Nesse estudo foi gerado um MDE híbrido a partir da comparação com dados do MDE LiDAR (*Light Detection And Ranging*), utilizando estatística básica e análise de *boxplots* entre as diferenças de elevação. O erro médio quadrático dos MDE's em relação ao LiDAR antes da fusão era de 3,5 m para o SRTM90 e SRTM30; 6,9 m para o ASTER e 3,8 m para o CDED, reduzindo para 2,6 m após a fusão.

Ribeiro (2015), destaca ainda a importância do ajuste da rede de drenagem matricial do MDEHC, para que haja compatibilidade com a rede de drenagem natural. Nesse estudo foi utilizado a ferramenta *Dem recondiotining* da extensão ArcHydro da Software ArcGIS, para forçar o alinhamento da rede de drenagem matricial com a rede de drenagem de referência, a fim de permitir maior consistência hidrológica em simulações hidrodinâmicas.

Conforme o estudo de Martz e Garbrecht (1995) e Turcotte et al. (2001), além da criação do MDEHC, ainda é preciso serem considerados os seguintes aspectos: (a) eliminação das depressões artificiais, (b) introdução de informações sobre as localizações de redes de drenagem em lagos e regiões planas e (c) limitações inerentes dos

métodos de obtenção da direção de fluxo (apud Oliveira, et al 2007).

Algoritmos para preenchimento de depressões nos MDE's

As depressões artificiais são usualmente localizadas em regiões de inundações, ou onde os MDE's não conseguem representá-las. Atualmente são utilizados nos softwares SIG mais comuns, os métodos de remoção de depressão desenvolvidos por Jenson e Domingue (1987), Wang e Liu (2006) e Planchon e Darboux (2001).

O método desenvolvido por Jenson e Domingue (1987) é um dos métodos mais divulgados, ele eleva as células contidas dentro das depressões e está presente nos Softwares ArcGIS da ESRI e no Software livre GRASS. (Oliveira, et al. 2007)

O algoritmo de Planchon e Darboux (2001), consiste em aumentar a elevação de pixels em depressões existentes nos MDE's que podem interromper o processamento do acúmulo de fluxo. Essas depressões constituem buracos que são preenchidos pelo algoritmo até um ângulo de inclinação pré-definido (“*minslope*”).

Análogo ao algoritmo de Planchon e Darboux (2001), o algoritmo proposto por Wang e Liu (2006) além de identificar e preencher depressões superficiais nos MDE's, ele permite preencher inclinações descendentes ao longo do percurso de escoamento podendo-se optar pela preservação de um gradiente de inclinação mínimo entre as células. Assim como os algoritmos citados, Lindsay (2016) esclareceu que existem inúmeros métodos de preenchimento semelhantes e independentemente de como eles operam, todos produzem o mesmo resultado, e a melhoria de um em relação ao outro é unicamente baseada na eficiência algorítmica.

A principal diferença entre os algoritmos de Jenson e Domingue (1988) e Wang e Liu (2006) é que o primeiro consiste na atribuição do valor da altitude para as pequenas depressões como sendo a altitude da célula de menor altitude dentre as 8 células que a rodeiam (Buarque, et al. 2009). E o método de Wang e Liu (2006), não só preenche as depressões, mas também preserva uma inclinação descendente ao longo do caminho. Por esse motivo, o algoritmo de Wang e Liu (2006) não admite valores de altitudes iguais para uma célula vizinha, mas preserva o valor de inclinação mínimo pré-definido.

Partindo do mesmo entendimento que Souza (2015), deve-se ainda considerar que o método utilizado para a remoção das depressões neste trabalho (Wang e Liu 2006), altera o valor das altitudes dos MDE's devido ao processo de

interpolação e suavização do relevo. Esse procedimento, apesar de necessário para garantir a consistência hidrológica dos modelos, pode diminuir a quantidade de erros ou ainda criar novos erros.

Principais Modelos Digitais de Elevação disponibilizados gratuitamente

Os principais MDE's disponíveis gratuitamente no Brasil são: SRTM 1 arco de segundo, SRTM 3 arcos de segundo, TOPODATA, ASTER GEDEM, AW3D30 e ALOS PALSAR 12 m.

O SRTM, foi desenvolvido em conjunto pela NIMA (*Imagery and Mapping Agency*) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e tinha como objetivo a elaboração de um modelo topográfico digital de alta resolução para a Terra. A missão SRTM, como ficou conhecida, foi realizada em fevereiro de 2000, utilizou-se de um ônibus espacial para cobrir cerca de 80% da superfície terrestre entre as latitudes 60° N 56° S, com resolução de 1 arco de segundo (30 x 30 m) a 3 arcos de segundo (90 x 90 m) e 10 m de exatidão na medida vertical. A técnica de sensoriamento remoto para aquisição dos dados foi a interferometria que consiste na comparação de duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obter elevação ou informação de mudanças na superfície. Os dados SRTM, estão disponibilizados para download em <https://earthexplorer.usgs.gov>, na sua forma bruta. O sistema de referência espacial do SRTM é o WGS 84. (Lemos, et al. 2004; Silva, Santiago e Silva, 2018)

Os dados SRTM, apesar de terem resolução espacial de 30 metros, inicialmente foram disponibilizados para o continente Sul-americano apenas com resolução de 3 arcos de segundo ou 90 metros. De acordo com Brochado. (2015) e Tadono et al. (2016), apenas em setembro de 2014 a Casa Branca disponibilizou os dados SRTM com resolução espacial de 30 m. Antes disso, o INPE, com o projeto TOPODATA (Banco de dados geomorfométricos do Brasil), procedeu um refinamento computacional dos dados SRTM com resolução espacial de 90 metros, a fim de disponibilizar um produto com resolução de 30 m.

O modelo digital de elevação ASTER GDEM foi viabilizado através de uma parceria entre a NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) (Melati e Marcuzzo, 2015). Este modelo digital de elevação foi obtido a partir de pares estereoscópicos, sensor VNIR (dados na faixa de infravermelho próximo). Apresenta resolução espacial de 30 metros sem a necessidade de interpolação. Diferentes das

imagens SRTM 3, as imagens ASTER são oriundas de imagens orbitais e não de radar, estando susceptíveis a interferências atmosféricas ocasionadas por nuvens (Souza, 2015).

A partir de maio de 2016 foi disponibilizado gratuitamente pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), o MDE ALOS World 3d – 30m (AW3D30). O AW3D30 foi gerado a partir da reamostragem do MDE AW3D com resolução de aproximadamente 5 m que por sua vez não é disponibilizado de forma gratuita. Foram aplicados dois métodos de reamostragem para obtenção de um píxel de 7 x 7 píxeis do AW3D. Sendo obtidos os valores de elevação através da média dos 49 píxeis para um dos métodos, e o para o outro adotou-se a mediana, obtendo-se dois produtos distintos, o AW3D30(AVE) e o AW3D30(MED) respectivamente (Tadono et al. 2016; Acharya, Yang e Lee, 2018).

O MDE ALOS PALSAR (resolução 12 m) é oriundo de dados de radar de abertura sintética de banda L tipo *phased array* (PALSAR), acoplado ao satélite ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*) lançado em janeiro de 2006. O desenvolvimento do PALSAR é um projeto conjunto entre a JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) e o JAROS (*Japan Resources Observation System Organization*). O MDE ALOS PALSAR é disponibilizado gratuitamente com resolução de 12 m pela Alaska Sattelite Facility, tendo como perspectiva inicial apresentar erros verticais menores que 5 m (Rocha, Vaconcelos et al. 2017).

#### Limitações dos Modelos Digitais de Elevação

Os MDE's derivados de técnicas de sensoriamento remoto, apesar de se mostrarem uma evolução nas técnicas de representação do relevo; não estão isentos de erros e incertezas relacionadas com sua resolução espacial, que suprime certas características do relevo inclusas nesse intervalo. Outra dificuldade no uso desses modelos é sua incapacidade de representar a altitude do terreno em si, ofuscando-se por feições de vegetação e edificações e em alguns casos até nuvens.

Outro problema enfrentado é a forma de representação numérica dos MDE's, que é através de grades regulares. Esta forma de representação

possui grandes desvantagens, pois em geral não consegue representar fielmente mudanças abruptas de elevação, outra desvantagem dessa representação é que os traçados dos caminhos de fluxo sobre a superfície do terreno tende a produzir linhas em “zigzag” já que as relações entre elementos vizinhos se dá em direções múltiplas de 45°, o que certamente não é uma representação realística (Rennó e Soares, 2001). O formato de grade, característico dos MDEs, resulta de um intervalo de medição definido, o que simplifica as características do relevo. Assim as escalas geomórficas de interesse, devem ser levadas em consideração para a seleção do MDE a ser utilizado (Purinton e Bookhagen, 2017).

Valeriano e Albuquerque (2015), reforça ainda a insuficiência dos MDE's SRTM e TOPODATA para representações em escalas maiores que 1:100.000, embora alguns trabalhos utilizem seu uso em 1:50.0000 ainda que em condições desfavoráveis. Em geral, fica a critério do pesquisador testar a exatidão cartográfica do MDE para a região em estudo, em função do tipo de aplicação e de suas exigências.

#### Área de estudo

Para realização deste estudo, foram tomadas como exemplo duas bacias com característica de relevo mais ou menos dissecado. Sendo adotada a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues, cuja foz está situada no município de Porto Nacional-TO e a sub-bacia do Rio Soninho situada entre os municípios de Mateiros e São Felix do Tocantins.

A sub-bacia do Ribeirão dos Mangues está situada à margem esquerda do Rio Tocantins e tem como foz o lago da UHE Luís Eduardo Magalhães. Situa-se em região de relevo menos dissecado, o que a faz abranger uma área maior, pertencente a cinco municípios do estado do Tocantins: Porto Nacional, Paraíso do Tocantins, Pugmil, Nova Rosalândia e Oliveira de Fátima. Abrange uma área de cerca de 2807 km<sup>2</sup>.

A sub-bacia do Rio Soninho está situada no Parque Estadual do Jalapão no Tocantins, delimitada ao norte pelo Parque Estadual do Rio Parnaíba na divisa entre o Tocantins e o Maranhão. É formada pelo Rio das Pratas e pelo Ribeirão Brejão. Abrange uma área de cerca de 3019 km<sup>2</sup>.

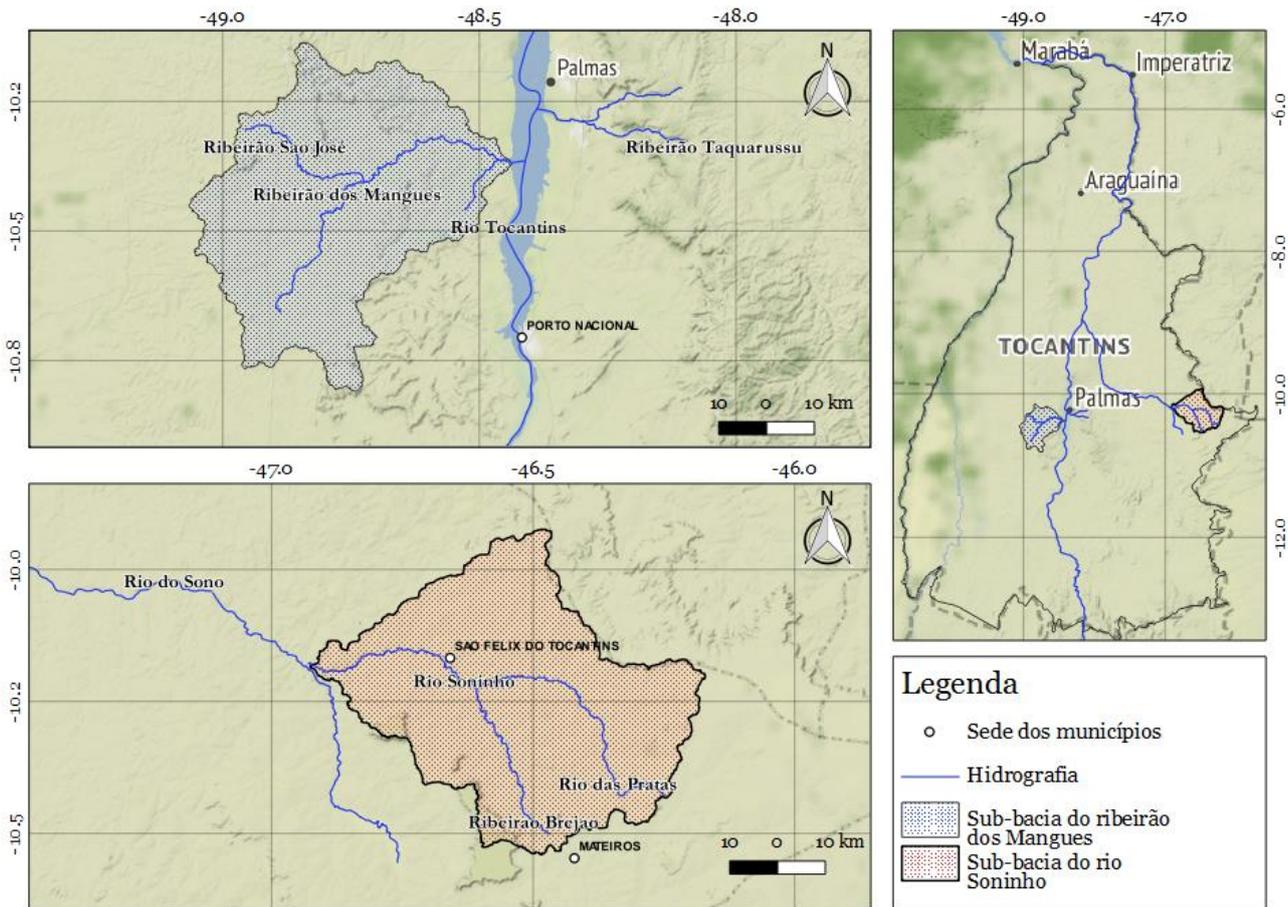


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo. Fonte: Autoria própria.

## Metodologia

### Modelos digitais de elevação utilizados

Para este trabalho foram utilizados seis modelos digitais de elevação derivados de técnicas de sensoriamento remoto, sendo: o SRTM 1 (*Shuttle Radar Topographic Mission*); o SRTM 3; os produtos do TOPODATA, derivados do SRTM 3; ASTER GEDEM (*Global Digital Elevation Model*), o ALOS PALSAR 12 m, AW3D30-AVE e AW3D30-MED.

### Eliminação dos dados espúrios dos MDE's

O pré-processamento dos MDE's utilizados, para eliminação dos dados espúrios a fim de evitar depressões rodeadas de cotas superiores, objetivando tornar o MDE hidrologicamente consistente, foi feito a partir do software SAGA GIS utilizando o algoritmo proposto por Wang e Liu (2006).

Para este trabalho, optou-se por utilizar o software SAGA GIS como ferramenta para retirada dos dados espúrios dos MDE's. Com ele é possível realizar interpolações através dos algoritmos de Wang Liu (2006) e Planchon e Darboux (2001) a fim de evitar depressões rodeadas de cotas

superiores. Nesse caso, decidiu-se por utilizar o algoritmo proposto por Wang e Liu (2006), pois os dois métodos têm resultados praticamente idênticos, sendo o método de Wang e Liu (2006) o método que apresentou menor tempo de processamento quando executado a partir do Software SAGA GIS.

SAGA é a abreviatura de *System for Automated Geoscientific Analyses* é um software de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A maioria dos desenvolvimentos do SAGA vem da equipe de J. Bohner e O. Conrad (Conrad, Bechtel, et al. 2015). O desenvolvimento do SAGA como SIG de código aberto, iniciou-se no final dos anos 90 a partir de vários projetos de pesquisa na Universidade de Gottingen (SAGA, 2017).

### Procedimentos para validação de MDEHC's utilizados

Para Poletto et al (2008), um MDEHC não pode ser definido apenas pelo tratamento computacional para eliminação das depressões espúrias, este deve passar por processos de validação a fim de certificar sua relação com o relevo da região. Para isso, Poletto et al. (2008) e Lousada e Fernandes (2017), orientam a coleta de pontos de altitude amostrais em campo por meio de receptor GPS/GNSS e posteriormente realizar o

teste de tendência por meio das discrepâncias amostrais. Para um nível de significância pré-estabelecido, admite-se a não existência de tendência caso as discrepâncias médias amostrais sejam estatisticamente iguais a zero.

A verificação da existência de tendências, é obtida pela fórmula:

$$t_h = \frac{\Delta h \sqrt{n}}{DP_h} \quad (1)$$

Em que:

“DP<sub>h</sub>” é o desvio padrão das discrepâncias entre as altitudes.

“n” é o número de pontos de controle para coleta das altitudes por GPS.

“Δh” é a média da soma das diferenças entre as altitudes:

$$\Delta h = \frac{\sum_i^n \Delta h_i}{n} \quad (2)$$

Onde, “Δh<sub>i</sub>” é a diferença obtida entre as altitudes das imagens e dos pontos de controle.

Nesse caso, aplica-se o teste de hipótese, sendo:

H<sub>0</sub> : se Δh = 0, então h não é tendencioso;

H<sub>1</sub> : se Δh ≠ 0, então h é tendencioso.

Ainda conforme Poletto et al. (2008), “para este teste de tendência, supondo a distribuição t de Student e observando um nível de confiança (1 - α) igual a 90% (α = 0,10), deve ser realizada uma comparação entre t<sub>h</sub> com um valor limite t tabelado”. Dessa forma, pela tabela “t” bicaudal, da referida distribuição, para t = t<sub>31, 0.05</sub>, tem-se um valor limite t = 2,040. Então, se |t<sub>h</sub>| < t, a imagem estará livre de erros sistemáticos relacionados à altitude, podendo ser utilizada satisfatoriamente para fins de estudos hidrológicos.

Miceli et al. (2011) e Lousada e Fernandes (2017), utilizaram mais dois métodos que podem ser utilizados para a validação hidrológica de Modelos Digitais de Elevação. Os métodos propostos por Miceli et al. têm por finalidade avaliar a precisão vertical dos MDE’s, baseando-se na aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) admitidos para o território brasileiro, que incluem o cálculo do erro médio quadrático e da tolerância vertical.

Quanto ao Erro Médio Quadrático (EMQ), deve-se comparar as altitudes informadas nos MDE’s com as altitudes obtidas nos pontos de controle. Sendo que para ser utilizado para fins hidrológicos, deve-se levar em consideração um EMQ máximo definido para cada escala. No caso da escala 1: 100.000 classe A, os pontos devem ter no máximo 16,7 m de EMQ. Para a escala 1: 50.000

classe C, os pontos devem ter no máximo 10m de EMQ (Miceli et al. 2011).

Já a avaliação quanto à tolerância vertical, define quando 90% das altitudes dos MDE’s estão condizentes com uma diferença limitada pelas classes do Padrão de Exatidão Cartográfica para uma determinada escala. Por exemplo, no caso da escala 1: 50.000 classe C, a tolerância é de 90% dos pontos obterem uma variação até de 15 m (três quartos da equidistância entre as curvas de nível) em relação aos pontos de controle. No caso da escala 1:100.000 classe A, a tolerância é de 90% dos pontos obterem uma variação de até 25m (metade da equidistância entre as curvas de nível) em relação aos pontos de controle (Miceli et al. 2011).

Quadro 1. Principais Regras do Padrão de Exatidão Cartográfica para as Escalas de 1:50.000 e 1:100.000.

Classe	Escala vertical			
	1:50.000		1:100.000	
	Tolerância	EMQ	Tolerância	EMQ
A	90% dos pontos < 10 m	6,6 m	90% dos pontos < 25 m	16,6m
B	90% dos pontos < 12 m	8 m	90% dos pontos < 30 m	20 m
C	90% dos pontos < 15 m	10 m	90% dos pontos < 36,6 m	25 m

Fonte: (Miceli et al. 2011)

Os pontos de controle preferencialmente devem ser obtidos através de fontes primárias, oriundos de receptor GPS geodésico. No entanto o deslocamento de equipamentos e profissionais a campo para coleta de dados altimétricos é relativamente caro. Dessa forma existe como alternativa a utilização de dados altimétricos dos vértices dos georreferenciamentos de imóveis rurais disponíveis no SIGEF – Sistema de Gestão Fundiária, através do site <https://sigef.incra.gov.br/>.

Grande parte dos dados altimétricos do SIGEF, têm precisão vertical muito próxima da realidade. Conforme Borges Junior (2017), a legislação brasileira pertinente ao assunto, define limites para erros nos cálculos de áreas para a certificação de imóveis rurais. Conforme SIGEF (2017), “os valores de altitude ou altura elipsoidal (h) dos vértices interferem no valor de área, dado o método utilizado no cálculo. Quanto mais próximos do valor real, mais próximo da realidade será o valor de área”.

Para a realização de georreferenciamentos são necessários equipamentos de elevada tecnologia, em busca da maior precisão dos dados coletados como é o caso do GNSS A legislação

regimentada por INCRA (2013) estabelece a precisão posicional para vértices situados em limites artificiais de apenas 0,5 m trazendo consigo a precisão vertical. No estudo de Prina e Trentin (2015) foi observado a precisão vertical de pontos coletados a partir do Sistema GNSS, resultando em precisões de 11,8 e 14,6 cm na vertical.

Através do site <http://acervofundiario.incra.gov.br>, mantido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, é possível baixar arquivos em *shapefile* dos polígonos dos imóveis certificados. A fim de demonstrar a dimensão atual da importante fonte de dados de elevação disponíveis gratuitamente no SIGEF foram elaboradas as tabelas 01 e 02.

Na tabela 1 estão representados os percentuais de cobertura das áreas de imóveis

certificados pelo SIGEF em relação à área territorial oficial das unidades da federação para a região Sudeste do Brasil. Na tabela 02 foi feita a relação entre o número de vértices dos polígonos dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das unidades da federação. As áreas oficiais das unidades da federação foram obtidas em IBGE (2017).

Com relação ao Estado do Tocantins, tem-se 95.714,60 km<sup>2</sup> de imóveis certificados pelo SIGEF, o que corresponde a uma cobertura de 34,5 % do território. Em relação ao número de vértices dos polígonos certificados pelo SIGEF, foram contabilizados com auxílio do software QGIS um total de 1.896.897 vértices, implicando em 6,83 vértices por km<sup>2</sup>.

Tabela 1. Relação entre a área dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das unidades da federação da região Sudeste do Brasil.

UF	Área total SIGEF (km <sup>2</sup> )		Área total UF (km <sup>2</sup> )	% Coberto
	Particular	Público		
São Paulo	40916,25	172,69	248219,63	17%
Minas Gerais	94164,89	353,94	586520,73	16%
Rio de Janeiro	2933,51	0,00	43781,59	7%
Espírito Santo	2905,24	52,33	46086,91	6%
Total	140919,90	578,96	924608,85	15%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2. Relação entre o número de vértices dos polígonos dos imóveis certificados pelo SIGEF e a área oficial das unidades da federação da região Sudeste do Brasil.

UF	Número de vértices SIGEF		Área total UF (km <sup>2</sup> )	Pontos/km <sup>2</sup>
	Particular	Público		
São Paulo	2070625	5378	248219,63	8,36
Minas Gerais	3182434	54501	586520,73	5,47
Rio de Janeiro	118757	0	43781,59	2,71
Espírito Santo	82424	4171	46086,91	1,88
Total	5454240	34050	924608,85	5,94

Fonte: Autoria própria.

Número de pontos de controle para o teste de exatidão e acurácia dos MDE's

A precisão vertical do MDE é estimada através de uma comparação entre pontos de altitudes do MDE contrastados com pontos de controle com altitudes reais. Estas comparações servirão para calcular o erro médio quadrático (EMQ) entre as altitudes. A estimativa dos erros em MDE's geralmente é feita seguindo as recomendações do *United States Geological Survey* – USGS de um número mínimo de 28 pontos de controle por carta do MDE SRTM 1 arco de segundo (Cuartero e Felicísimo, 2015). Merchante (1982) apud Souza e Loch (2008) sugere no mínimo 20 pontos para realização de testes estatísticos de qualidade geométrica de um produto cartográfico. Elkrachy (2017) avaliou a precisão vertical dos MDE's SRTM 1 e ASTER

utilizando 50 pontos de controle oriundos de receptor GNSS para uma área de 900 km<sup>2</sup>. Neste trabalho foram utilizados um número (n) de 105 pontos de controle para a bacia do rio Soninho e 200 pontos para a bacia do ribeirão dos Mangues, portanto superior ao aconselhado pelo USGS.

Coleta dos pontos de controle a partir do SIGEF

Para a coleta dos pontos de controle através do SIGEF, deve-se considerar atributos dos polígonos dos imóveis rurais cadastrados no SIGEF. Os polígonos estão disponíveis em <http://acervofundiario.incra.gov.br> e podem ser baixados em arquivo *shapefile* contendo a tabela de atributos com os dados necessários para realizar a pesquisa das parcelas no SIGEF. Mais informações de como consultar parcelas no SIGEF, podem ser encontradas no Manual do SIGEF, disponível em <https://sigef.incra.gov.br/documentos/manual/>.

Nesse trabalho, utilizou-se o software QGIS para visualizar as parcelas rurais pertencentes às sub-bacias em estudo e a tabela de atributos. (QGIS Development Team, 2018)

No SIGEF estão disponíveis as coordenadas dos vértices bem como sua altitude elipsoidal (h). No entanto, a altitude dos MDE's, são ortométricas (H); nesse caso, foi preciso converter as altitudes coletadas do SIGEF, para isso utilizou-se do Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal MAPGEO 2015 – Versão 1.0 do IBGE. Utilizando a seguinte expressão:

$$H = h - N \quad (3)$$

Em que, N é o valor da altura geoidal obtida através do modelo de ondulação geoidal MAPGEO 2015.

Para seleção dos pontos de controle, deve-se atentar para alguns critérios, são eles: (a) dar preferência por pontos em locais de maior altitude, (b) evitar pontos onde ocorre mudança abrupta de altitude e (c) distribuir os pontos da forma mais homogênea possível na área de estudo (Santos et al. 2003 apud Souza e Loch, 2008).

Optou-se por coletar pontos de controle de forma que abrangesse uniformemente as áreas das sub-bacias. Na figura 2, pode-se observar os imóveis certificados pelo SIGEF, pertencentes às sub-bacias do rio Soninho e do ribeirão dos Mangues com os respectivos pontos de controle.

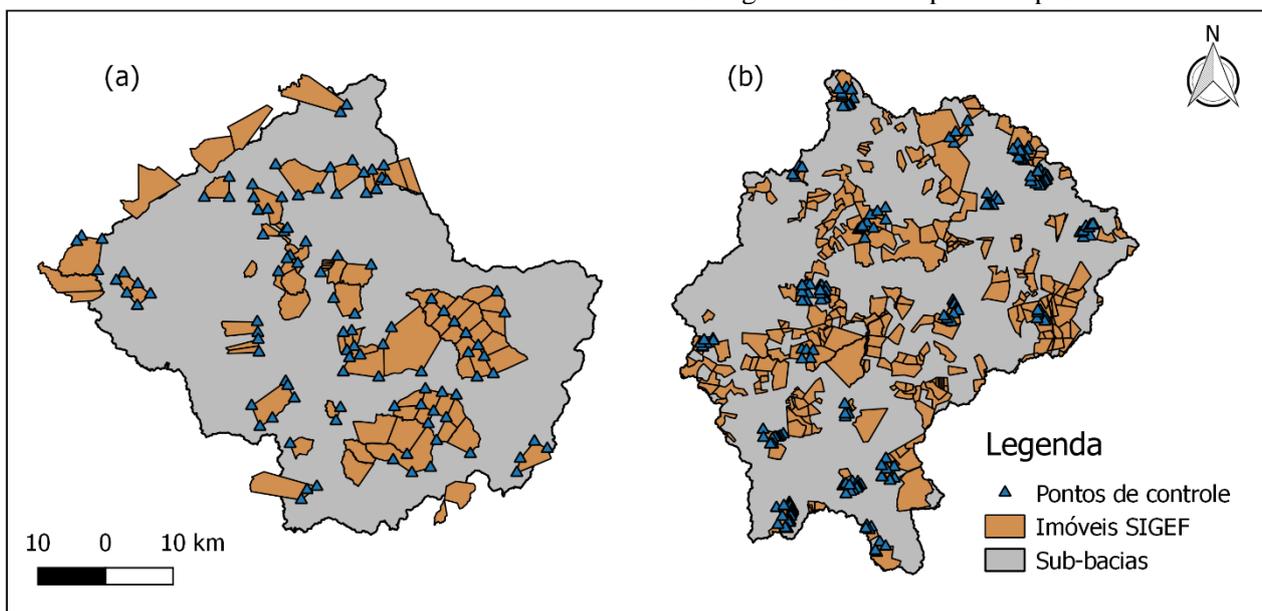


Figura 2. Mapa de distribuição dos pontos de controle para as sub-bacias do rio Soninho (a) e ribeirão dos Mangues (b). Fonte: Autoria própria.

Na figura 3 está presente um exemplo de uma planilha de georreferenciamento disponível no SIGEF. Nela é possível notar que é informada na coluna coluna “Sigma altitude (m)”, a precisão vertical de cada vértice do polígono (imóvel rural). Essa informação deve ser levada em consideração para coleta dos pontos de controle.

A planilha de georreferenciamento está disponível em formato csv no portal do SIGEF,

♀ Vértices da parcela

Código	Longitude	Sigma Long. (m)	Latitude	Sigma Lat. (m)	Altitude (m)	Sigma Altitude (m)
VIMA-M-0064	-49°22'18,110"	0,01	-10°01'39,156"	0,01	184,905	0,02
VIMA-M-0063	-49°22'15,691"	0,01	-10°02'08,626"	0,01	211,942	0,01
VIMA-M-0062	-49°22'12,944"	0,01	-10°02'44,027"	0,01	188,151	0,02
VIMA-M-0061	-49°22'12,714"	0,01	-10°02'44,023"	0,01	188,127	0,02
VIMA-M-0036	-49°21'07,952"	0,01	-10°02'38,752"	0,01	209,971	0,02
VIMA-M-0065	-49°21'12,156"	0,05	-10°01'34,412"	0,02	199,423	0,03

Figura 3. Exemplo da disposição dos dados dos vértices das parcelas no SIGEF. Fonte: SIGEF (2017).

nessa planilha é especificado para cada vértice o método de posicionamento utilizado, se é obtido por meio de posicionamento relativo estático (PG) ou por meio de algum método analítico (PA), como intersecção de retas ou off sets. Nesse caso é mais prudente a coleta de vértices oriundos de posicionamento relativo estático, onde não haverá margem para erros de cálculo (INCRA, 2013).

## Resultados

Nos gráficos das figuras 4 e 5 estão presentes *boxplots* das diferenças entre as altitudes coletadas no SIGEF e as altitudes dos MDE's em estudo. Observa-se que não há equivalência entre as altitudes. Constatando-se amplitudes entre as altitudes de até 50 m para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues e de até 60 m para a sub-bacia do Rio Soninho. No entanto, estes valores estão atribuídos a apenas um ponto de controle para cada bacia. Situações como essa, podem ser atribuídas a falhas na altitude do próprio ponto de controle, podendo ser causadas por erros de preenchimento da planilha de certificação, em casos assim, quando a variação é muito elevada e que ocasiona dúvidas, o ponto de controle deve ser avaliado mais de perto.

No caso específico do ponto mais discrepante para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues, o ponto apresentou diferença negativa entre os MDE's e o ponto de controle, o que não era esperado, visto que os MDE's tendem a ter uma altitude maior, pois representa feições de superfície, como o dossel de árvores, por exemplo. Sendo as diferenças variando de -46,16 m para o MDE SRTM 3 até - 48,16 m para o MDE SRTM 1. Fato análogo ocorre para o ponto mais discrepante da sub-bacia do rio Soninho, variando de -51,59 m para o MDE ALOS PALSAR até -58,55 m para o MDE ASTER GEDEM. Assim, a alta diferença de altitude entre estes pontos e o ponto de controle, considerando o fato das altitudes dos MDE's estarem mais baixas, conclui-se que estes dois pontos de controle apresentam falhas não sendo utilizados na validação da precisão altimétrica dos MDEs.

Conforme a tabela 03, para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues, o MDE SRTM 1 e AW3D30-MED apresentaram as menores amplitudes interquartílicas, semelhantes a 3,5 m, indicando que 50 % dos pontos testados apresentaram diferenças variando de 3,2 a 6,7 m e 75 % variando de 0 a 6,7 m. Para a sub-bacia do Rio Soninho destacou-se o MDE SRTM 1 com amplitude interquartílica de 6,5 m, variando de 1,7 m a 8,2 m.

Para as duas sub-bacias em estudo, o MDE ASTER e SRTM 3 foram os que apresentaram a maior amplitude interquartílica, cerca de 12 e 8,5 m para as sub-bacias do Rio Soninho e Ribeirão dos Mangues respectivamente.

Da análise do *boxplots*, foi possível diferenciar os modelos com melhor qualidade, à medida que se observa a menor variabilidade das diferenças. Dessa forma constatou-se que o MDE SRTM1 atingiu melhores resultados, considerando sua menor amplitude entre as diferenças. Constatou-se que a bacia do Ribeirão dos Mangues, onde foram testados 200 pontos, apresentou melhores resultados (menores diferença interquartílicas) comparada a sub-bacia do Rio Soninho com 105 pontos testados.

Deve-se ainda considerar que o método de Wang e Liu (2006), utilizado para a remoção das depressões (Wang e Liu, 2006) neste trabalho, altera o valor das altitudes dos MDE's devido ao processo de interpolação e suavização do relevo. Esse procedimento, apesar de necessário para garantir a consistência hidrológica dos modelos, pode diminuir a quantidade de erros ou ainda criar novos erros (Souza, 2015). Como o foco deste trabalho é utilização de MDEHC's, não foram testados os MDE's em seu estado bruto sem correção de imperfeições.

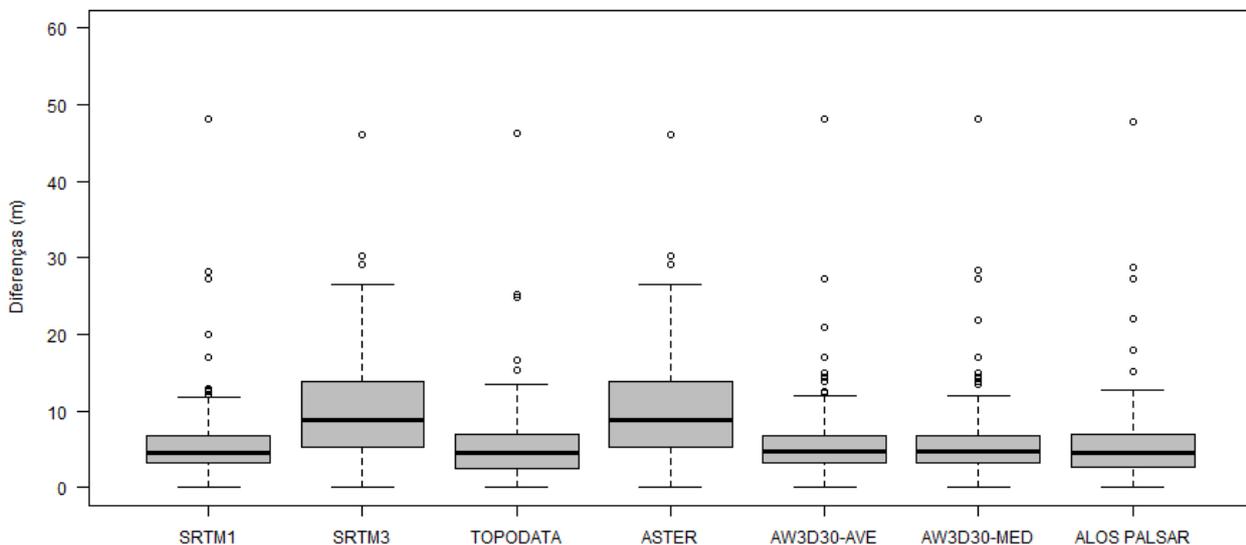


Figura 4. Box plot's das diferenças entre os MDE's e as altitudes coletadas no SIGEF, para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues. Fonte: Autoria própria.

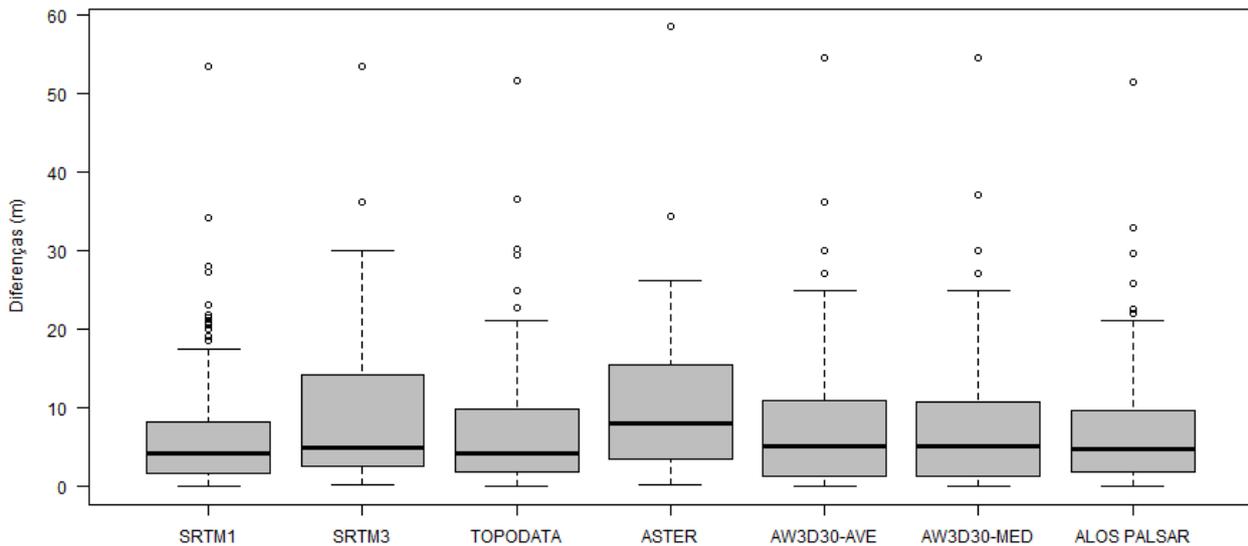


Figura 5. Box plot's das diferenças entre os MDE's e as altitudes coletadas no SIGEF, para a sub-bacia do rio Soninho. Fonte: Autoria própria.

Tabela 3. Box plot's das diferenças entre os MDE's e as altitudes coletadas no SIGEF, para as sub-bacias do Ribeirão Taquarussu (a), Ribeirão dos Mangues (b).

Bacia	Amplitudes interquartílicas (m)						
	SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER	AW3D30-AVE	AW3D30-MED	ALOS PALSAR
Soninho	6,5060	11,6740	7,9950	11,9060	9,6400	9,5330	7,8550
Mangues	3,5335	8,5530	4,4330	8,5530	3,6125	3,5250	4,2490

Fonte: Autoria própria

Verificação quanto a tolerância vertical

Os resultados da verificação quanto a tolerância vertical, foram obtidos conforme proposto por Miceli et al. (2011), e estão expostos nas tabelas 04 e 05 para a sub-bacia do ribeirão dos Mangues e rio Soninho respectivamente.

Os valores da tolerância vertical são as diferenças admitidas pelo Decreto n° 89.817/1984 que estabelece instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Este Decreto orienta no artigo 8° que noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao padrão de exatidão cartográfica - altimétrico -

estabelecido. Estes Padrões foram resumidos no quadro 1.

Na tabela 4 observa-se que os MDE's SRTM1, TOPODATA, AW3D30-AVE, AW3D30-MED e ALOS PALSAR para a bacia do Ribeirão dos Mangues apresentaram o padrão de exatidão cartográfica necessário para a escala 1:50.000 classe B. Para escalas de 1:100.000 os critérios do artigo 9° do Decreto n° 89.817/1984 (Quadro 1) são atendidos para todas as classes.

Na tabela 5 observa-se que para a escala de 1:100.000 os critérios também são atendidos para a sub-bacia do Rio Soninho. E nenhum dos MDE's testados cumpriu os Padrões de Exatidão Cartográfica – altimétrico para a escala de 1:50.000 classe C.

Tabela 4. Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues.

Escala	Classe	Tolerância	% quanto as condições de tolerância						
			SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER	AW3D30-AVE	AW3D30-MED	ALOS PALSAR
1:50.000	A	90 % dos pontos < 10 m	86%	57%	87%	57%	87%	87%	88%
	B	90 % dos pontos < 12 m	92%	68%	91%	68%	91%	92%	93%
	C	90 % dos pontos < 15 m	94%	81%	94%	81%	94%	94%	94%
1:100.000	A	90 % dos pontos < 25 m	96%	95%	96%	95%	96%	96%	96%
	B	90 % dos pontos < 30 m	97%	96%	97%	96%	97%	97%	97%
	C	90 % dos pontos < 36,6 m	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%

Fonte: autoria própria

Tabela 5. Verificação quanto a tolerância vertical para a sub-bacia do Rio Soninho.

Escala	Classe	Tolerância	% quanto as condições de tolerância						
			SRTM1	SRTM3	TOPODATA	ASTER	AW3D30-AVE	AW3D30-MED	ALOS PALSAR
1:50.000	A	90 % dos pontos < 10 m	78%	68%	75%	55%	72%	71%	77%
	B	90 % dos pontos < 12 m	79%	70%	77%	65%	79%	79%	79%
	C	90 % dos pontos < 15 m	82%	79%	81%	74%	82%	82%	82%
1:100.000	A	90 % dos pontos < 25 m	96%	95%	95%	96%	95%	95%	96%
	B	90 % dos pontos < 30 m	98%	97%	97%	98%	97%	97%	98%
	C	90 % dos pontos < 36,6 m	99%	99%	99%	99%	99%	98%	99%

Fonte: autoria própria

Verificação quanto o EMQ

A tabela 6 traz os resultados dos cálculos do Erro Médio Quadrático considerando todos os pontos testados. Em relação ao EMQ, para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues, apenas os MDE's SRTM1, AW3D30-AVE, AW3D30-MED e ALOS PALSAR atendem aos critérios (quadro 1) para serem usados para fins hidrológicos para a escala 1:100.000 classe A, já que o EMQ para estes MDE's foi menor que 16,6 m.

Já para a sub-bacia do Soninho, todos os MDE's, atendem as condições para serem usados para fins hidrológicos (quadro 01) para a escala 1:100.000 classe A, já que os EMQ's estão abaixo de 16,6 m.

Conforme Elkhachy (2017), para o cálculo da EMQ, os *outliers* só podem ser usados

quando houver a priori conhecimento sobre a precisão das observações. Tratando-se de pontos de controle obtidos do SIGEF, onde não se conhece adequadamente sua precisão vertical, deve-se eliminar os *outliers* com  $z > 2$ , demonstrados nos gráficos das figuras 4 e 5 obtidos através da equação (4).

$$z = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \tag{4}$$

Depois de remover os *outliers*, o cálculo estatístico para a precisão vertical absoluta das elevações foi demonstrado na tabela 7. Dessa forma os MDE's, SRTM1, TOPODATA, AW3D30-AVE, AW3D30-MED e ALOS PALSAR satisfazem as condições (EMQ < 10 m) para serem usados em escalas de 1:50.000 classe C para ambas as sub-bacias.

Tabela 6. Verificação quanto o Erro Médio Quadrático.

Sub-bacia	Erro Médio Quadrático (EMQ) antes de remover os <i>outliers</i>						
	SRTM 1	SRTM 3	TOPODAT A	ASTE R	AW3D30-AVE	AW3D30-MED	ALOS PALSAR
Mangues	16,57	18,71	16,62	18,71	16,25	16,27	16,52
Soninho	11,55	12,45	11,86	13,59	12,08	12,05	11,51

Fonte: Autoria própria

Tabela 7. Verificação quanto o Erro Médio Quadrático, eliminando os *outliers*.

Sub-bacia	Erro Médio Quadrático (EMQ) após removidos os <i>outliers</i>						
	SRTM 1	SRTM 3	TOPODAT A	ASTE R	AW3D30-AVE	AW3D30-MED	ALOS PALSAR
Mangues	8,28	12,21	8,60	12,21	8,36	8,36	8,22
Soninho	9,32	10,30	9,65	11,83	9,80	9,72	9,48

Fonte: Autoria própria

Verificação quanto a existência de tendências

A tabela 8 mostra os valores dos testes de tendência realizado para os MDE's estudados para as sub-bacias do Ribeirão dos Mangues e Rio Soninho. O teste de tendência irá demonstrar o quanto as altitudes de cada MDE são tendenciosas, a ponto de não permitir a correta representação do relevo da região em estudo e a utilização dos MDE's para fins hidrológicos.

Portanto, observando um nível de confiança (1 -  $\alpha$ ) igual a 90% ( $\alpha = 0,10$ ), deve ser realizada uma comparação entre os  $t_h$ 's com um valor limite t tabelado". Dessa forma, pela tabela, para  $t = t_{200, 0,05}$  e  $t = t_{105, 0,05}$ , tem-se um valor limite t de aproximadamente 1,97. O resultado representa que apenas os MDE's SRTM1, TOPODATA e ALOS PALSAR estão livres de erros sistemáticos em relação à altitude para a bacia do Ribeirão dos Mangues. Sendo o MDE ALOS PALSAR, para este caso, mais recomendado para fins hidrológicos.

Em relação aos MDE's da sub-bacia do rio Soninho, todos os MDE's mostraram resultados satisfatório para o teste de tendência. Sendo mais uma vez destacado o MDE ALOS PALSAR com  $t_h = 0,22$ . Isto é explicado pelo fato da resolução de 12 m do MDE ALOS, o que lhe permite representar de maneira mais adequada variações de declividade.

Os  $t_h$ 's calculados apresentam valores positivos, acima dos pontos de controle, subestimando a distribuição espacial de elevação do terreno. Isso já era esperado, visto que na presente pesquisa buscou-se selecionar pontos de referência dentre os vértices dos imóveis do SIGEF, em sua maioria em limites artificiais, diminuindo a interferência da vegetação.

Tabela 8. Resultados do teste de tendência dos MDE's em estudo.

Sub-bacia	Teste de tendência ( $t_h$ )						
	SRTM 1	SRTM 3	TOPODAT A	ASTE R	AW3D30-AVE	AW3D30-MED	ALOS PALSAR
Mangues	1,96	5,26	1,69	5,26	2,24	2,23	1,86
Soninho	1,05	0,27	0,63	1,24	0,49	0,54	0,22

Fonte: Autoria própria.

### Conclusão

O presente trabalho concentrou esforços em demonstrar uma metodologia para validação dos principais MDE's globais disponíveis gratuitamente, utilizando como fonte de referência os dados altimétricos dos imóveis certificados no SIGEF.

Essa etapa de validação é necessária para a escolha do MDE mais adequado para a região em estudo. Apesar das variadas pesquisas para determinar a precisão absoluta dos MDE's globais, haverá sempre um MDE que melhor se adequa às condições do terreno interessado, apresentando melhor precisão. No caso específico deste trabalho, o MDE ALOS PALSAR resolução 12 m apresentou melhor precisão para a sub-bacia do Ribeirão dos Mangues com EMQ de  $\pm 8,22$  m, enquanto para a sub-bacia do Rio Soninho o MDE que apresentou melhor precisão foi o SRTM1 resolução 30m com EMQ de  $\pm 9,32$  m.

Dessa forma, os dados do SIGEF, mostraram-se ser uma boa opção para a coleta de pontos de controle para fins de validação hidrológica de Modelos Digitais de Elevação, tendo em vista o vazio cartográfico em muitas regiões do país, como é o caso do estado do Tocantins.

No entanto, deve-se verificar a ausência de erros ou a veracidade dos dados coletados no SIGEF visto que o sistema não está completamente imune a erros de preenchimento da planilha de certificação pelo profissional responsável pelo georreferenciamento.

Cada vértice do polígono georreferenciado conta com a informação dos valores de desvios padrão ( $\sigma$ ) indicados com duas casas decimais, em metros, tanto para as coordenadas planimétricas quanto para a altitude. Essas informações devem ser levadas em consideração na

coleta dos pontos de controle; bem como o método de posicionamento utilizado no levantamento, adotando preferencialmente vertidos obtidos por posicionamento relativo estático.

O SIGEF apresenta uma fonte de dados altimétricos crescente, disponível ao público em geral. Para a região Sudeste existem atualmente cerca de 5,5 milhões de vértices (tabela 2) o que equivale a 6 vértices por km<sup>2</sup>, apesar disso estes dados não são suficientes para melhorar os MDE's oriundos de técnicas de sensoriamento remoto.

### Agradecimentos

À Universidade Federal do Tocantins (UFT) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (MPEA), pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

### Referências

- Acharya, T. D.; Yang, I. T.; Lee, D. H., 2018. Comparative analysis of digital elevation models between AW3D30, SRTM30 and airborne LiDAR: A case of chuncheon, South Korea. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 36, 17-24.
- Borges Junior, C. R., 2017. Incertezas perante o georreferenciamento de imóveis rurais e a retificação extrajudicial. *Dissertação (Mestrado)*. Uberlândia, Programa de pós-graduação em geografia da Universidade Federal de Uberlândia.
- Brasil, 1984. Decreto nº 89.817, de 20 de junho. Que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional.
- Brochado, G. T., 2015. Atenuação do efeito de desflorestamento em dados SRTM por meio de diferentes técnicas de interpolação. *Dissertação (Mestrado)*. São José dos Campos, Progrma de

- Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE.
- Buarque, D. C. et al., 2009. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 14, 91-103.
- Conrad, O. et al., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA). *Geosci. Model Dev* 2.1.4.
- Costa, T. F. Lima, D. F. Sousa Junior A. M., 2017. Avaliação da usabilidade de sistema no modo clássico e drafting e annotation do autocad 2014. *Holos* 2, 148-160.
- Elkhrachy, I., 2017. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal* [online]. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.007>. Acesso: 18 Abr. 2018.
- Furze, S.; Ogilvie, J.; Arp, P. A., 2017. Fusing Digital Elevation Models to Improve Hydrological Interpretations. *Journal of Geographic Information System* 9, 558-575.
- Gribbin, J. E., 2014. Introdução a hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais, 4ª ed. Cengage Learning, São Paulo.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm>. Acesso: 6 dez. 2017.
- INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 2013. Manual Técnico de Limites e Confrontações: Georreferenciamento de Imóveis Rurais 1ª ed. Brasília.
- Lemos, M. C. et al., 2004. Avaliação da qualidade dos dados altimétricos derivado do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM): resultados preliminares. *Anais I Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*.
- Lindsay, J. B., 2016. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. *Hydrological processes* 30, 846–857.
- Lousada, G. Fernandes, M.C., 2017. Avaliação da precisão vertical de modelos digitais de elevação e análise de tendência em diferentes domínios geomorfológicos. *Revista Brasileira de Cartografia* 69/7, 1263-1276.
- MAPGEO, Modelo de ondulação geoidal, 2015. Disponível: [https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo\\_geoidal.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm). Acesso: 23 jan. 2018.
- Melati, M. D.; Marcuzzo, F. F. N., 2015. Modelos digitais de elevação na delimitação automática das sub-bacias do rio Taquari-Antas no Rio Grande do Sul. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*.
- Miceli, B. S. et al., 2011. Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em Diferentes Configurações Topográficas para Médias e Pequenas Escalas. *Revista Brasileira de Cartografia* [Online] 63, 1-10. Disponível: <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/371/363>. Acesso: 21 dez. 2018.
- Oliveira, A. N. et al., 2007. Delimitação automática de bacias de drenagens e análise multivariada de atributos morfométricos usando modelo digital de elevação hidrológicamente corrigido. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 1, 3-21. Disponível: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/82/75>. Acesso: 21 dez. 2018.
- Pestana, A., 2006. Elementos de Topografia. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Poleto, L. J. et al., 2008. Validação de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC). II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.
- Prina, B. Z.; Trentin, R., 2015. GPS x GNSS: Constelação GLONASS maximizando a precisão e acurácia dos dados. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental* 19, 344–352.
- Purinton, B. Bookhagen, B., 2017. Validation of digital elevation models (DEMs) and comparison of geomorphic metrics on the southern Central Andean Plateau. *Earth Surf. Dynam* 5, 211-237.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2018. Disponível: <http://www.qgis.org/>. Acesso: 18 abr. 2018.
- Rennó, C. D.; Soares, J. V., 2001. Discretização espacial de bacias hidrográficas. *Anais X SBSR*, 485-492.
- Ribeiro, H. J., 2015. Análise da consistência de dados hidrológicos a partir de diferentes modelos digitais de terreno. Dissertação (Mestrado). Goiânia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Meio Ambiente.
- Rocha, C. H. B.; Vasconcelos, D.; et al., 2017. Comparação de modelos digitais de elevação obtidos de diferentes bases de dados - curvas de nível e pontos cotados IBGE, LIDAR, SRTM e ALOS. *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva*, 1302-1306.
- SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses. Disponível: <http://www.saga-gis.org/>. Acesso: 16 mar. 2017.
- Santiago, M. M., 2013. Análise do erro altimétrico do MDE ASTER-2 na declividade. Dissertação

- (Mestrado). Recife, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação.
- Santillan, J. R.; Makinano, M., 2016. Vertical accuracy assessment of 30-m resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMs over northeastern mindnao, philippines. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial. Information Sciences XLI-B4.
- SIGEF. Sistema de Gestão Fundiária. Disponível: <https://sigef.incr.gov.br/>. Acesso: 7 dez. 2017.
- Silva, A. S. Santiago, O. R. P. L. Silva, C. R., 2018. Análise de exatidão entre MDEs: AW3D, SRTM-30m e projeto SPMGGO50. Geografia 27, 87-98.
- Siqueira, V. A.; Flaischmann, A. J.; et al., 2016. IPH-Hydro tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 21, 274- 287.
- Souza, J. O. P., 2015. Análise da precisão altimétrica dos modelos digitais de elevação para a área semi-árida do nordeste brasileiro. Revista do Departamento de Geografia – USP 30, 56-64.
- Souza, J. M.; LOCH, R. E. N., 2008. Análise e melhoria d aqualidade altimétrica dos dados da Shuttle Radar Topography Mission, SRTM-3. Revista Brasileira de Cartografia 60, 155-166.
- Tadono, T. et al., 2016. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by alos prism. The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B4.
- Valeriano, M.; Albuquerque, P. C. G., 2015. Derivação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em coordenadasaficas. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR [online]. Disponível: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0369.pdf>. Acesso: 6 maio 2018.