



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise dos Modelos Digitais de Elevação (PE3D, SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS AW3D30) e a necessidade da produção de dados altimétricos em excelência no Brasil

Jadson Freire da Silva¹, Rodrigo de Queiroga Miranda², Ana Lúcia Bezerra Candeias³

¹Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco. Recife. Brasil.

²Pesquisador da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco. Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco. Recife. Brasil.

³Professora da Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Computação Aplicada. Departamento de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco. Recife. Brasil.

Artigo recebido em 29/07/2021 e aceito em 18/04/2022

RESUMO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são de grande importância e através destes é possível retratar a superfície terrestre, apontando soluções que derivam a uma eficiente gestão de recursos. A introdução de novos projetos de MDEs no mundo fazem emergir a reflexão da necessidade do Brasil em obter informações altimétricas em excelência, objeto de estudo nessa pesquisa. Os procedimentos metodológicos compreendem a um levantamento bibliográfico e a extração das métricas de performance como o RMSE, Pbias e Escala Gráfica frente a comparação do MDE referência PE3D junto aos MDEs SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS AW3D30. Observa-se que além do PE3D, que mantém uma resolução de 50 centímetros e serviu como referência do trabalho, verifica-se a excelência dos dados oriundos do SRTM-30. Modelos como o TOPODATA e ALOS PALSAR & AW3D30 também se apresentam como importantes para análise em detalhe. Debruçando-se nas pesquisas sobre o tema no Brasil, percebeu-se que predominantemente o modelo SRTM-90 foi utilizado, mesmo havendo outros de qualidade superior. Frente ao projeto pioneiro de varredura altimétrica em detalhe do governo de Pernambuco (PE3D) e o anseio de compreender as superfícies nacionais para evitar transtornos oriundos de fatores naturais ou antrópicos, observa-se que varreduras semelhantes ao PE3D, bem como outros dados nacionais são essenciais para o Brasil.

Palavras-chaves: PE3D, Altimetria, Informações Geográficas.

Analysis of Digital Elevation Models (PE3D, SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR, and ALOS AW3D30) and the need for excellent altimetric data production in Brazil

ABSTRACT

The Digital Elevation Models (DEM) is essential, and through them, it is possible to portray the Earth's surface, pointing solutions that efficiently manage resources. The introduction of new DEM projects in the world reflects Brazil's need to obtain excellent altimetric information, the aim of the study. The methodological procedures comprise a bibliographic survey and the extraction of performance metrics such as RMSE, Pbias, and Graphical Scale comparing the PE3D (DEM reference) with the SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR, and ALOS AW3D30 MDEs. In addition to PE3D (Brazilian DEM project with 50 cm of spatial resolution), observes the data's excellence from SRTM-30, TOPODATA, and ALOS PALSAR & AW3D30 for general analysis. The research on the theme in Brazil uses predominantly in the country studies with the SRTM-90 model, even though there are others of superior quality. Because of the pioneer project of detailed altimetric scanning of the Pernambuco government (PE3D) and the desire to understand the national surfaces to avoid disturbances caused by natural or anthropic factors, it is crucial that scans similar to PE3D, as well as other national data, are essential for Brazil.

Keywords: PE3D, Altimetry, Geographic Information.

Introdução

Diante a necessidade de analisar os territórios, bem como estudar novas regiões para aplicação e implementação de políticas públicas importantes, a tecnologia vem provendo diversos benefícios à sociedade. O Sensoriamento Remoto (SR) é um exemplo disso, no qual, a possibilidade de inferir remotamente sobre determinado local ou região e tomar decisões são uma das variadas qualidades que esta técnica mantém. No geral, as informações distribuídas via Sensoriamento Remoto tem como base os sensores acoplados em satélites, auxiliando através de imagens periódicas o planejamento e análises de ambientes. Contudo, observa-se que além do monitoramento periódico, missões pontuais para detecção de altimetria (Modelo Digital de Elevação – MDE/DEM) também fazem parte do escopo do SR, apresentando importância para pesquisas e análises territoriais.

Os MDEs são representações matemáticas da topografia, servindo de suporte para o desenvolvimento de pesquisas e políticas, sobretudo os modelos que são gratuitos, como o SRTM, ASTER GDEM, TOPODATA (Farr et al., 2007; Tachikawa et al., 2011; Valeriano & Rosseti, 2012) ALOS AW3D30 e o TanDEM-X (Grohmann, 2018; Hawker et al., 2019; Nikolakopoulos, 2020). Considerando a utilização de Modelos Digitais de Elevação, é possível reduzir custos, entregar informações relevantes e aplicar decisões de melhoria para uma região, por exemplo.

Utiliza-se os Modelos Digitais de Elevação para diferentes finalidades, sejam para zoneamento agroecológico, mudanças climáticas e planejamento urbano (Fu et al., 2018; Vannier et al., 2018; Moura-Bueno et al., 2016), processos geológicos/geomorfológicos e hidrologia (Khattab et al., 2017) ou Sensoriamento Remoto aplicado (Chowdhury et al., 2017; Li; Li; Yao, 2018; Sanyal et al., 2014, Yan et al., 2015; Saksena et al., 2015; Costabile et al., 2015). Novos sistemas de mapeamento (Mallick et al., 2021; Štular et al., 2021; Wang et al., 2021) e estudos remotos dos solos (Yang et al., 2021; Chidi et al., 2021; Gibson et al., 2021) também fazem parte do escopo dos MDEs, apresentando desta forma sua amplitude na contribuição científica.

Observando as mudanças e novas implementações de Modelos Digitais de Elevação ao longo dos anos e dada a importância do mesmo para os estudos ecossistêmicos verifica-se

relevância em analisar quais MDEs correspondem melhor a realidade – ou a superfície. Ademais, por ser um produto matemático, estudos obtiveram informações sobre a qualidade através de comparações com dados obtidos *in situ*, e relataram inconsistências nos Modelos Digitais de Elevação gratuitos (Luedeling et al., 2007; Nikolakopoulos et al., 2006; Jarihani et al., 2015; Walczak et al., 2016; Satge et al., 2015; Silva et al., 2017; Jain et al., 2018; Nikolakopoulos, 2020). Assim, a observação dos Modelos Digitais de Elevação comerciais e gratuitos enquanto comparação e sua qualidade frente a informações reais ainda são objeto de pesquisa até os dias atuais, uma vez que levantamentos altimétricos de alta precisão em campo necessitam de um alto investimento.

Através da implementação do projeto LiDAR Pernambuco Tridimensional – PE3D no estado de Pernambuco (Cirilo et al., 2014) e a disponibilidade de novos Modelos Digitais de Elevação no globo, emerge a necessidade de comparar a qualidade dos produtos frente aos já existentes. Junto a análise comparativa de Modelos Digitais de Elevação, concomita a revisão de importantes pesquisas publicadas e a possibilidade de refazer-las com o refino altimétrico, como também a tangibilidade de proporcionar melhorias em futuras pesquisas e projetos acadêmicos.

Diante disso, o objetivo dessa pesquisa é analisar os Modelos Digitais de Elevação SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS AW3D30 frente ao levantamento pernambucano LiDAR PE3D, discutindo acerca da necessidade brasileira em produzir informações altimétricas em excelência nacionais.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo compreende um recorte da área do município de Surubim/Cumaru (Figura 1). Estando circundante ao reservatório de Jucazinho, zona rural de Surubim e área limítrofe de Cumaru (PE), o recorte da região para a pesquisa compreende a 79,5 km² e localiza-se no Agreste, nome dado às áreas de transição entre a zona úmida e o semiárido. As condições edafoclimáticas compreendem relevos maciços e serras baixas, com territórios dissecados que permitem a instalação de barramentos aquáticos. A região mantém o clima semiárido com as Caatingas Hiper e Hipoxerófila sendo as mais presentes (CPRM, 2005).

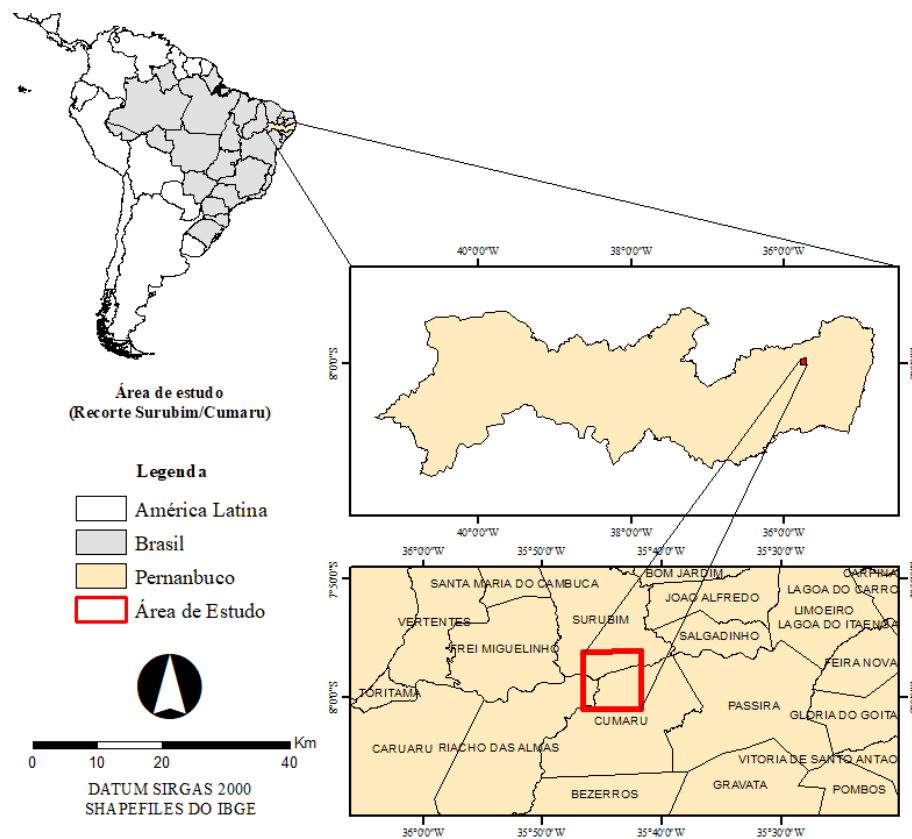


Figura 1 – Área de estudo escolhidas para análise

Obtenção e avaliação dos dados de referência

Os dados dos MDEs na pesquisa são constituídos pelo projeto LiDAR PE3D (Pernambuco Tridimensional) de resolução de 50 centímetros; do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* em informações recebidas pelo site da USGS - *United States Geological Survey* (SRTM-30, de 30 metros de resolução), do portal da Embrapa “Brasil em Relevo” (SRTM-90, de 90 metros de resolução) e do projeto INPE (TOPODATA, de 30 metros); da junção dos institutos de pesquisa japoneses e americanos METI - *Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan* e NASA - *National Aeronautics and Space Administration* (ASTER GDEM, de 30 metros de resolução); do projeto japonês da JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency* (ALOS PALSAR, de 12,5 metros de resolução e ALOS AW3D30, de 30 metros de resolução) e o projeto alemão TANDEM-X (de 90 metros de resolução).

Sobre a informação da MDEs de referência, Grohmann (2018) comenta que na ausência de dados reais para validação e comparação com os MDEs, utiliza-se o modelo mais próximo a realidade ou o levantamento LiDAR como a informação de cunho verdadeiro; essa premissa também é utilizada em outros trabalhos (Westoby et al., 2012; Casagli et al.,

2017; Dewitt et al., 2015). Baade e Schmullius (2016) comenta que os trabalhos de comparação dos modelos de elevação, comumente se calcula a qualidade da precisão pela razão dos pontos coletados e fonte de maior precisão (Grohmann, 2018; Reuter et al., 2009). Desta forma, o Modelo Digital de Elevação utilizado como referência é o Pernambuco Tridimensional (PE3D) devido a sua alta escala de detalhe (50 cm). A etapa das análises dos modelos será amparada através das estatísticas descritivas frente ao PE3D.

Procedimentos metodológicos

O procedimento metodológico escolhido para extração das informações altimétricas deu-se através da geração de pontos automáticos de forma aleatória nas áreas de estudo (*Random Points*). Segundo o ArcGis (2016) o *Random Points* parte do princípio da especificação de informações x e y junto a triangulações executadas através da criação de variados triângulos de diferentes tamanhos que geram paralelogramos. Desta forma, a avaliação dos Modelos Digitais de Elevação dar-se-á em 50 mil pontos aleatórios (*Random Points*) com espaçamentos de 5 metros para a área escolhida (79,5 km²).

Observa-se a utilização dessa metodologia nos trabalhos de Dorais e Cardille (2011), Miranda

et al. (2018), Achard et al. (2014), Redo, Aide e Clark (2013) e Portillo-Quintero e Sánchez-Azofeifa (2010). Achard et al. (2014) aponta que esse processo metodológico emerge a partir de uma alternativa para redução de custos com mapeamentos de grandes áreas ou pela impossibilidade de mapeamentos devido às extensas regiões pesquisadas.

Comparação e análise estatística dos Modelos Digitais de Elevação

As estatísticas utilizadas para análise serão apresentadas na forma do coeficiente de Pearson (r), Percent Bias (P Bias), Erro médio quadrático da raiz (*Root Mean Square Error* – RMSE) e P-value. O cálculo de erro gráfico e outras estatísticas descritivas como os valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e gráficos de dispersão também serão apresentados.

Segundo Mukaka (2012), o coeficiente de correlação de Pearson é comumente utilizado quando as variáveis em estudos são normalmente distribuídas. O intuito desse coeficiente é apontar o grau de relação entre duas variáveis, podendo ser uma correlação negativa (quando os valores estão próximos a -1), sem correlação (próximo a 0) e correlação positiva (quando os valores estão próximos a 1). Representado por “ r ”, a formulação do coeficiente é definida pela Equação 1:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Onde: x e y correspondem as informações estudadas; $\bar{x}$ e $\bar{y}$ correspondem às médias das amostras.

Percent Bias, ou Pbias é o percentual que mede a tendência sobre os valores simulados serem maiores ou menores em relação aos valores observados. O limiar do Pbias é 0, sendo os valores acima de 0 indicando a superestimação e abaixo a subestimação (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1996; SOROOSHIAN; DUAN; GUPTA, 1993). A formulação é definida pela Equação 2:

$$\text{Pbias} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (2)$$

Onde: S_i corresponde aos valores simulados e O_i , observados.

Segundo Barnston (1992) o Erro médio quadrático da raiz - *Root Mean Square Error* (RMSE) informa se os dados pesquisados estão em consonância com as informações de referência, sendo muito usado em diversos trabalhos que envolvem as ciências exatas e da terra. A formulação do RMSE é definida pela Equação 3:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Onde: P_i corresponde aos valores pesquisados, O_i aos valores observados e n o tamanho da amostra.

Utilizou-se o valor p é para rejeitar ou não a hipótese nula. As considerações sobre as formulações do valor p são descritas nos manuscritos de Pearson (1900) e Biau, Jolles e Porcher (2010). No trabalho consideramos qualquer valor abaixo de 0,05 com a legenda de ($p < 0,05$).

Além do valor p verificou-se o Fator de Escala, nos quais relacionam-se com a proporção entre a representação gráfica e a superfície terrestre (Equação 4) (Bias; Brites; Rosa, 2012):

$$\begin{aligned} \text{Eg} &= 0,0002 \times \text{Fe} \\ \therefore \\ \text{Fe} &= \frac{\text{Eg}}{0,0002} \end{aligned} \quad (4)$$

Onde: Eg erro tolerável em metros e Fe é o fator de escala do documento cartográfico.

Utiliza-se o erro tolerável (Eg) junto ao menor comprimento gráfico que se pode obter em representações cartográficas (0,2 mm) para o desenvolvimento do Fator de Escala (Fe) base para cada modelo digital indicado em estudo. Sendo auxiliado pela Tabela 1, que mostra a padronização da escala de acordo com a precisão, esta pesquisa apresentará recomendações de escalas padrões para os modelos digitais em relação a sua precisão.

Tabela 1 – Precisão em função da escala adotada

Escala	Precisão (M)
1:10.000	2,00
1:25.000	5,00
1:50.000	10,00
1:75.000	15,00
1:100.000	20,00

1:150.000

30,00

Adaptada de Bias, Brites e Rosa (2012)

Procedimentos para obtenção dos dados bibliográficos

Escolheu-se o Google Acadêmico (GA) como fonte de dados (<https://scholar.google.com.br/?hl=pt>). Os motivos para a escolha dessa fonte de dados estão ligados a facilidade do portal na pesquisa de artigos em português, na baixa disponibilidade de periódicos nacionais indexados em bases de dados

direcionadas (*Elsevier e PubMed*, por exemplo), na quantidade de artigos expostos na base GA e sua simplicidade na repetição de metodologias observadas em literatura (Giustini et al., 2005; Falagas et al., 2008; Puccini et al., 2015). Em concomitância ao levantamento no GA, verificou-se o impacto da revista, bem como seu período de atuação através do WebQualis, o sítio virtual referente a classificação de periódicos a nível nacional, promovido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. A Figura 2 revela os procedimentos para a obtenção de dados para o desenvolvimento do levantamento bibliográfico na pesquisa.

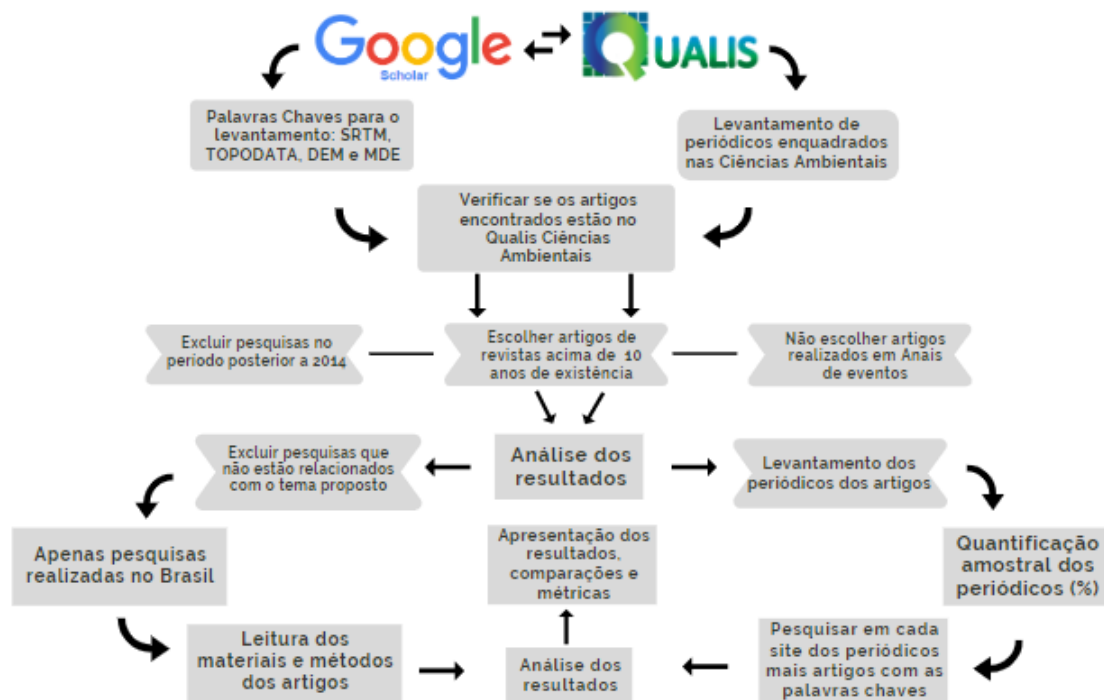


Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos para análise bibliográfica

Segundo a Figura 2, a primeira etapa diz respeito a pesquisa das palavras-chaves na base de dados Google Acadêmico. Dessa forma pesquisou-se as palavras: “SRTM”, “TOPODATA”, “ASTER GDEM”, “DEM”, “MDE” e “Altimetria”. Ainda na primeira etapa, executou-se o levantamento dos periódicos enquadrados nas Ciências Ambientais pelo WebQualis (Quadriênio 2013 – 2016), encontrando 48 periódicos relacionados ao tema.

A segunda etapa são as aplicações de filtros para refino da pesquisa. Os filtros abarcam: (i) exclusão de artigos publicados em Anais de eventos; (ii) exclusão de artigos não relacionados ao tema central; (iii) seleção de pesquisas executadas e aplicadas em solo brasileiro; (iv) exclusão de artigos publicados em periódicos abaixo de 10 anos de existência e (v) exclusão de

artigos publicados no período posterior a 2014, devido a publicização do Modelo Digital de Elevação SRTM base enquanto gratuidade acontecer no ano de 2014.

Desta forma, somou-se as pesquisas coletadas via GA junto aos artigos oriundos da pesquisa em cada periódico relacionado ao tema com as mesmas palavras-chaves da primeira etapa. No final da análise obteve-se o quantitativo de 234 artigos diretamente relacionados sobre o tema onde analisou-se o título, objetivo e a metodologia. A lista dos artigos pode ser observada no resumo na Tabela 3 e de forma completa no Apêndice 1 – Documento Suplementar.

Resultados e discussão

As informações referentes às comparações altimétricas frente aos dados do Pernambuco

Tridimensional estão apresentadas na Figura 3 e Tabela 2.

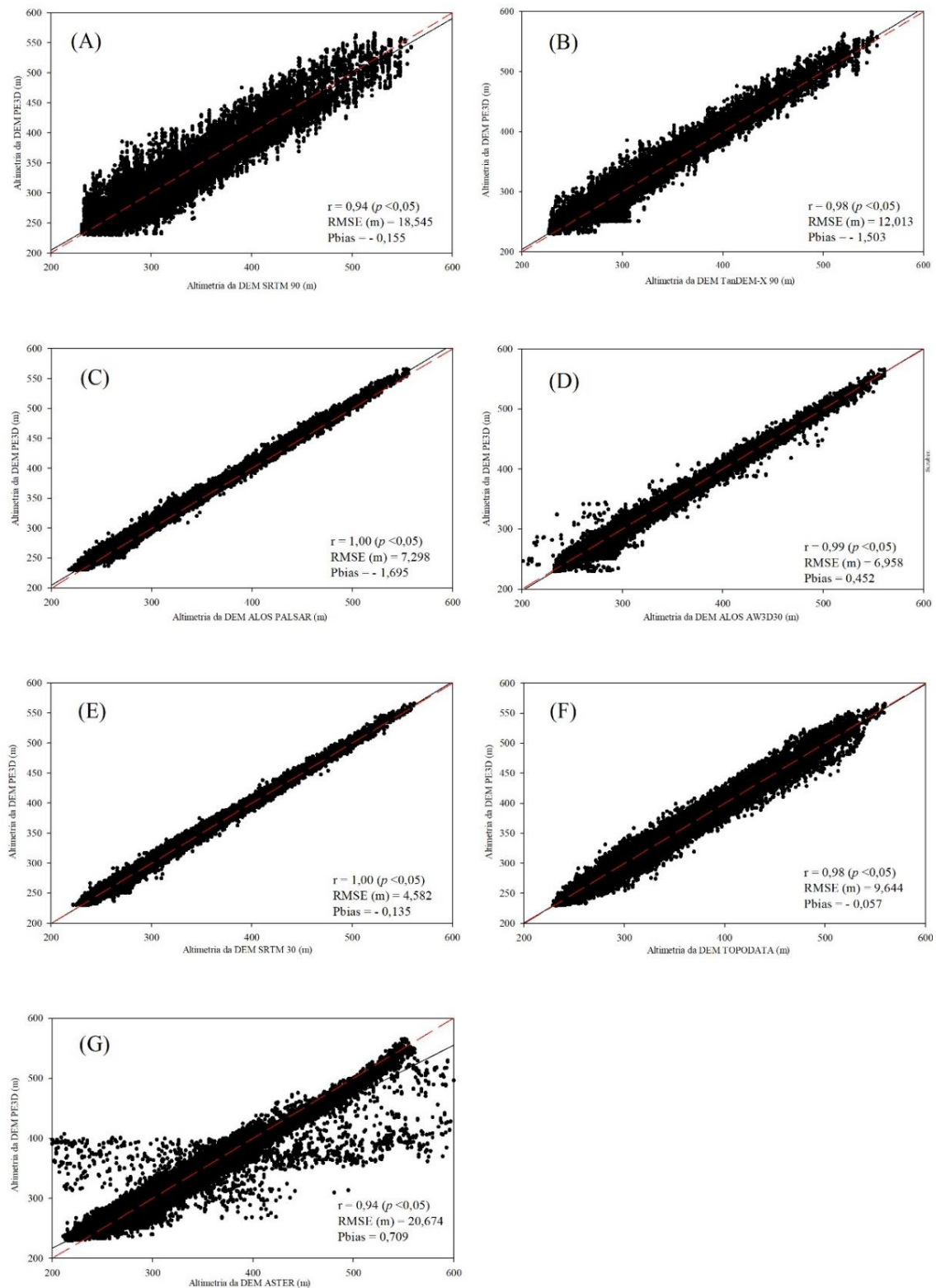


Figura 3 - Análise comparativa da região experimental de Surubim
Legenda: linha sólida preta (regressão); linha tracejada vermelha (um para um).

Tabela 2 – Informações comparativas das MDEs na região amostral de Surubim
Região: Surubim (79,5 KM²)

MDE	Min	Max	Média	DesP	r (Pearson)	p- value	Pbias	RMSE (m)	FEI
PE3D	229,6	565,7	325,8	53,8	-	-	-	-	1:5000
SRTM 90	231	559	325	52,3	0,94	1,7E-117	0,155	18,545	1:100000
TANDEM 90	227	553	321	52,2	0,98	3,8E-22	1,503	12,013	1:75000
ALOS PALSAR	218	556	320	53,2	1	1,6E-134	1,695	7,298	1:50000
ALOS AW3D30	183	561	327	52,9	0,99	1,7E-97	0,452	6,958	1:50000
SRTM 30	222	562	325	53,2	1	1,1E-40	0,135	4,582	1:25000
TOPODATA	229	560	326	53,8	0,98	9,7E-12	0,057	9,644	1:50000
ASTER GDEM	147	691	328	59,9	0,94	0	0,709	20,674	1:150000

Legenda: Min – Valor mínimo; Max – Valor máximo; Média – Média dos valores amostrais; DesP – Desvio Padrão da amostra; FEI – Fator de Escala Indicado na pesquisa.

Observando a Figura 3 e Tabela 2 é possível verificar o comparativo analítico frente ao PE3D dos MDEs, no qual a SRTM-30 mostrou resultados superiores para a região em questão (Pbias de -0,135 e o RMSE 4,582 metros) sendo indicado para fatores de escala de 1:25000. Os resultados dos Modelos Digitais TOPODATA (Pbias -0,057; RMSE 9,644 metros), ALOS PALSAR (Pbias -1,695; RMSE 7,298 metros) e ALOS AW3D30 (Pbias 0,452; RMSE 6,958 metros) revelaram fator de escala indicado de 1:50000 também sendo relevantes.

Ressalta-se que o SRTM-90 e ASTER GDEM apresentaram valores mais elevados em relação aos demais, sendo indicado para fatores médio de escala: 1:100000 e 1:150000, respectivamente. Em contrapartida, o projeto Pernambuco Tridimensional trouxe para as pesquisas um fator de escala 1:5000 e um elevado grau de detalhamento altimétrico.

Dong et al. (2015) compararam a acurácia dos modelos ASTER GDEM, SRTM, and DLR-SRTM na região nordeste da China e constataram a superioridade do SRTM entre os demais (para o SRTM a diferença média de 0,37 e RMSE de $\pm 2,82$ frente a diferença média de -1,52 e RMSE de $\pm 6,59$ para o DLR-SRTM e -3,14 de diferença média e $\pm 9,97$ para o ASTER GDEM, em metros).

Varga e Bašić (2015) quando compararam uma variedade de modelos na Croácia, estes de altas e baixas resoluções observaram que mesmo com alguns vazios o SRTM-30 promove uma excelente cobertura da superfície terrestre, sendo bem utilizada nas geociências. Em uma análise

comparativa na Rússia, Florinsky, Skrypitsyna e Luschikova (2018) estudaram as diferenças pertencentes nos modelos ALOS AW3D30, ASTER GDEM e SRTM em ambiente russo, onde obtiveram os melhores resultados provenientes do modelo ALOS AW3D30 (Para o AW3D30 DSM o Erro médio absoluto de 7,69 e RMSE de 7,83 metros, frente o SRTM1 DEM de Erro Médio Absoluto 17,72 e RMSE 17,91 e ASTER GDEM de Erro Médio Absoluto de 7,39 e RMSE de 9,10 metros).

Comparando os modelos digitais SRTM, MERIT (*Multi-Error-Removed-Improved-Terrain* é uma versão do SRTM com correções globais) e TanDEM-X 90 para diversas áreas inundáveis no mundo, Hawker et al. (2019) observou o do potencial do TanDEM-X 90 para se tornar o DEM global de referência em planícies de inundação com a remoção cuidadosa de erros da vegetação. Salienta-se o MERIT também demonstrou bons resultados para sua utilização em regiões com vegetação.

Em uma comparação em território sulamericano, González-Moradas e Viveen (2020) compararam os modelos ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 e TanDEM-X 12 junto aos pontos de GPS de alta precisão no Peru, onde o ASTER GDEM apresentou o RMSE de 6,907 m, SRTM de 5,113 m e AW3D30 de 6,246 m, corroborando com os resultados presente nessa pesquisa. Os autores ressaltaram que o SRTM oferece o desempenho mais estável em quase todos os testes é o Modelo Digital de Elevação mais

recomendável para a escolha analítica da paisagem no Peru, seguido do TanDEM-X 12.

Inicialmente o Brasil por não possuir os direitos dos Modelos Digitais de Elevação passou a adquiri-los via acesso-compra governamental. O projeto intitulado “Brasil em Relevo”, por exemplo, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (MIRANDA, 2005) foi um marco na pesquisa brasileira, uma vez que este disponibilizou em 2005 (e disponibiliza até hoje) informações altimétricas do SRTM com resolução de 90 metros (SRTM-90), fruto da reamostragem do SRTM arco 1 (30 metros).

Posteriormente, o Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE utilizando as informações do SRTM de 90 metros, novos dados de altimetria do Brasil e técnicas avançadas de interpolação lançam, em 2008, o projeto denominado “TOPODATA”, reduzindo a resolução do SRTM

para o território nacional (30 metros) (TOPODATA, 2019). Vale ressaltar que a única informação altimétrica digital disponível com essa resolução de forma gratuita naquele momento era o ASTER GDEM, se por ventura o pesquisador não optasse pelos dados do Brasil em Relevo.

Só na segunda década dos anos 2000 foi possível obter mais informações terrestres digitais para grandes áreas no Brasil. A promulgação da lei de dados abertos em 2014 nos EUA e a consequente exposição dos dados SRTM de 30 metros de resolução é apenas um exemplo a citar; novos projetos em outros países para obtenção de Modelos Digitais de Elevação gratuitos (e comerciais), processos inovadores de detecção de ambientes e novas aquisições dão para pesquisa do Brasil um novo corpo que reflete diretamente na qualidade dos trabalhos (Figura 4).



Figura 4: Desenvolvimento da pesquisa em MDE no Mundo (Enfase no Brasil)

Observando a Figura 4, percebe-se a presença de um hiato em relação a outros países detentores dos direitos dos MDEs, uma vez que dos anos de 2000 a 2004 não havia para o Brasil um ambiente que proporcionasse a pesquisa utilizar os

Modelos Digitais de Elevação gratuitos. A Tabela 3 revela quais MDEs foram utilizados do ano de 2000 até 2014 no Brasil, uma vez que em 2014 foi o período que iniciou a publicação gratuita do SRTM em seu sítio original.

Tabela 3 – Análise das métricas referentes aos artigos encontrados na pesquisa

Informações básicas da pesquisa	Objetivo principal (Artigos) (%)	MDE utilizada (%) nos artigos analisados
Qtd de revistas cadastradas no CAPES – Ciências Ambientais	4716	Artigos que executaram aplicação dos Modelos Digitais de Elevação
Ano amostral pesquisado	2000 - 2014	90,17
N de periódicos centrais sobre o tema no Brasil	48	Artigos que executaram comparação nos Modelos Digitais de Elevação
N de artigos encontrados com as palavras chaves	234**	9,3
		SRTM (90 m)
		69,7
		TOPODATA
		19,2
		ASTER
		7,3
		Outros*
		11,5

*Outros podem ser compreendidas como interpolações, cartas altimétricas e outros Modelos Digitais de Elevação, podendo estes serem comerciais – ou não. **Ver Documento Suplementar a lista completa de artigos em análise.

Através da Tabela 3 verifica-se que durante os anos de 2000 – 2014, nos 48 periódicos analisados (e 234 artigos observados) 90,17% dos artigos que utilizaram os Modelos Digitais de Elevação o direcionaram para uma específica aplicação, sejam elas na Cartografia, Geografia, Geologia, Hidrologia, Geomorfologia, Engenharias, Ciências Sociais e humanidades, sendo assim observado uma ampla atuação da capacidade de capilarização dos MDEs em pesquisas. Ainda analisando as métricas, nota-se que por mais que houvesse uma MDE de resolução superior (TOPODATA) (Figura 3 Tabela 2) no período, predominam nos manuscritos a escolha da SRTM de 90 m (69,7%). Esse reflexo revela a boa difusão midiática que o projeto Brasil em Relevo deteve (e ainda detém) frente aos pesquisadores nacionais.

Indo de contraponto aos dados altimétricos existentes no Brasil e preocupados com as ocorrências de extremos climáticos de precipitação em alguns municípios de Pernambuco em meados de 2010/2011, idealiza-se um projeto pioneiro em território nacional, no qual buscava aprimorar em excelência as informações altimétricas de todo o território pernambucano, o intitulado “Pernambuco Tridimensional – PE3D” (PE3D, 2019). Segundo Cirilo et al. (2014) o projeto com o propósito de realizar uma varredura Laser (LiDAR) e ao mesmo tempo obter ortoimagens em alta resolução culminou em 2014~2015 visando entregar sensíveis ganhos de qualidade para os estudos, sejam eles de Planejamento Urbano, Planos Ambientais, monitoramento de áreas de interesse além de subsidiar outros levantamentos. Considerando o estado de Pernambuco equivalente e até maior em dimensão territorial (98 149,119 km²) a alguns países no mundo, tal qual Portugal (92 090 km²), Hungria (93.030 km²), Suíça (41 285 km²) e Dinamarca (43 094 km²), a inclusão de um levantamento LiDAR nestas proporções o introduz na vanguarda mundial nesse âmbito, uma vez que apenas a Holanda/Países Baixos (41 528 km²) (Henn et al., 2013) e Filipinas (300.000 km²) (LiPAD, 2019) possuem levantamentos integrais, decretando independência dos dados oriundos de outros países.

Desta forma, analisando os dados presente no comparativo de Modelos Digitais de Elevação (Figura 3 Tabela 2), o hiato existente pela ausência de MDEs gratuitas para o período de 2000~2005 em relação as pesquisas brasileiras (Figura 4) e o experimento altimétrico pernambucano de varredura a laser para todo o estado, levanta-se o questionamento e afirma-se como recomendação que é existente a necessidade de se obter dados

altimétricos precisos para o Brasil. Frente aos desastres ocorridos de prospecção internacional como a tragédia da barragem em Mariana, ou em especificidade como os alagamentos em ambientes urbanos que danificam a estrutura viária, o planejamento emerge como característica de decisão consciente, no qual deriva de um domínio pleno do território na sua forma terrestre. Assim, não somente é relevante o país manter sob seus domínios dados altimétricos mais precisos como há a necessidade de criar dados nacionais originais de controle e monitoramento.

A precisão destes dados de elevação traz para o gestor/pesquisador respaldo suficiente para agir de forma mais adequada e reduzir riscos sociais e econômicos. Esse aspecto foi notado pelo governo de Pernambuco quando lançou o pioneiro projeto PE3D, no qual, abriu-se a possibilidade de se utilizar os produtos em sua forma mais acurada, ou se preciso, reamostrar os dados para reduzir o peso de arquivo dos respectivos, utilizando-os para estudos mais generalistas. Contudo, através de incentivos na temática, o território brasileiro pode entregar informações semelhantes.

Conclusão

Diante das informações expostas, observa-se que os dados oriundos dos Modelos Digitais de Elevação SRTM-30 e posteriormente o TOPODATA e ALOS PALSAR-AW3D30 foram satisfatório entre os demais. Os resultados do RMSE dos modelos supracitados quando comparados às informações LiDAR alcançaram fatores de escalas de 1:25000 (SRTM-30) e 1:50000 (TOPODATA e ALOS PALSAR-AW3D30). Outros modelos, tais como SRTM-90, ASTER GDEM, são importantes, sobretudo na ausência dos modelos de melhores performances.

Percebe-se que durante os primeiros quinze anos dos anos 2000 pesquisas com o modelo SRTM-90 sobressaíram-se entre as demais do tema, mesmo existindo um modelo brasileiro com dados em excelência superior (TOPODATA) no período. Nos dias atuais, situações brasileiras tais como os desastres antropogênicos e naturais ocorridos no Estado emitem a necessidade de estudos que se amparem em informações sobre a cobertura da superfície mais precisas, visando o planejamento mais adequado, redução de riscos sociais e econômicos. O governo de Pernambuco (Brasil), inicia essa movimentação quando lança o pioneiro projeto Pernambuco Tridimensional - PE3D, no qual, abre-se a possibilidade de se utilizar os produtos altimétricos em sua forma mais

acurada, contudo, o território brasileiro não é abarcado por esse projeto e seus benefícios intrínsecos, sendo importante levantar a necessidade de levantamentos altimétricos nacionais em detalhe.

Agradecimentos

Agradecemos primeiramente a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE pela aprovação do projeto e concessão de bolsa ao primeiro autor. Ao Governo de Pernambuco (Brasil) pela disponibilidade de dados em alto nível de detalhamento. A USGS e a *United States National Aeronautics and Space Administration* – NASA pela disponibilidade das informações em seus sites oficiais. Ao Instituto brasileiro de Pesquisas Espaciais – INPE e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA por manter e corrigir grandes projetos voltados a pesquisas nacionais. A JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency* e a DLR – *The German Aerospace Center* pelo suporte e desenvolvimento de novas tecnologias para auxílio global da ciência atual.

Referências

- Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H.-J., Bodart, C., Brink, A.; Simonetti, D. 2014. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology*, 20, 2540–2554.
- Arcgis. How create Random Points works. 2016. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/how-create-random-points-works.htm>>. Acesso em: 15/04/2019.
- Baade, J., Schumilius, C. 2016. TanDEM-X IDEM precision and accuracy assessment based on a large assembly of differential GNSS measurements in Kruger National Park, South Africa. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 119, 496–508.
- Barnston, A. 1992. Correspondence among the Correlation [root mean square error] and Heidke Verification Measures; Refinement of the Heidke Score. Notes and Correspondence, Climate Analysis Center. Available from: <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Barnston,%20Anthony%20G.,%201992.pdf>. Acesso em: 15/04/2019.
- Bias, E. S., Brites, R. S., Rosa, A. N. C. 2012. Imagens de alta resolução espacial. In: Meneses, P.R.; Almeida, T (orgs). *Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto*. Universidade de Brasília.
- Biau, D., Jolles, B., Porcher R. P. 2010. value and the theory of hypothesis testing: an explanation for new researchers. *Clin Orthop Relat Res*, 468, 885–892.
- Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L. and Lu, P. 2017. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning, *Geoenvironmental Disasters*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0073-1>.
- Chidi, C. L., Zhao, W., Chaudhary, S., Xiong, D., & Wu, Y. 2021. Sensitivity Assessment of Spatial Resolution Difference in DEM for Soil Erosion Estimation Based on UAV Observations: An Experiment on Agriculture Terraces in the Middle Hill of Nepal. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(1), 28. doi:10.3390/ijgi10010028
- Chowdhury, E.H., Hassan, Q.K., Achari, G., Gupta, A. 2017. Use of Bathymetric and LiDAR Data in Generating Digital Elevation Model over the Lower Athabasca River Watershed in Alberta, Canada. *Water*, 9, 19.
- Cirilo, J.A., Alves, F.H.B., Silva, L.A., Campos, J.H.A. 2014. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7, 755-763.
- Costabile, P., Macchione, F., Natale, L., Petaccia, G. 2015. Flood Mapping Using Lidar Dem. Limitations of the 1-D Modeling Highlighted by the 2-D Approach. *Natural Hazards*, 77, 181.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Diagnóstico do Município de Cumaru – PE. Ministério de Minas e Energia: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Recife – PE, 22 p, 2005. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15922/Rel_Cumaru.pdf?sequence=6. Acesso em: 04/02/2019.
- Dewitt, J., Warner, T., Conley, J. 2015. Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR: implications for change detection. *GISci. Remote Sens*, 2, 179–197.

- Dong, Y., Chang, H., Chen, W., Zhang, K., Feng, R. 2015. Accuracy assessment of GDEM, SRTM, and DLR-SRTM in Northeastern China, Geocarto International, 30, 779-792.
- Dorais, A., Cardille, J. 2011. Strategies for Incorporating High-Resolution Google Earth Databases to Guide and Validate Classifications: Understanding Deforestation in Borneo. Remote Sensing, 3, 1157-1176.
- Falagas, M., Pitsouni, E., Malietzis, G., Pappas, G. 2008. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. Scientific Databases, Pros and cons. The FASEB Journal, 22.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L. 2007. The shuttle radar topography mission. Rev. Geophys., v. 45.
- Florinsky, I.V., Skrypitsyna, T.N., Luschikova, O.S. 2018. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia. Remote Sensing Letters, 9, 706-714.
- Fu, J., Zhang, G., Wang, L., Xia, N. 2018. Geomorphology Classification of Shandong Province Based on Digital Elevation Model in the 1 Arc-second Format of Shuttle Radar Topography Mission Data. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 108, 032025.
- Gibson, A. J., Hancock, G. R., Bretreger, D., Cox, T., Hughes, J., & Kunkel, V. 2021. Assessing digital elevation model resolution for soil organic carbon prediction. Geoderma, 398, 115106. doi:10.1016/j.geoderma.2021.11510
- Giustini, D.; Barsky, E. 2005. A look at Google Scholar, PubMed, and Scirus: comparisons and recommendations. Journal of the Canadian Health Libraries Association, 26, 5-9.
- González-Moradas, Maria del Rosario; Viveen, Willem. 2020. Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. Remote Sensing of Environment, 237(), 111509-. doi:10.1016/j.rse.2019.111509
- Grohmann, C.H. 2018. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. Remote Sens. Environ, 212, 121-133.
- Hawker, L., Neal, J., Bates. 2019. Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. Remote Sensing of Environment 232 (2019) 111319
- Jain, A.O., Thaker, T., Chaurasia, A., Patel, P., Singh, A.K. 2018. Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India. Geocarto Int, 33, 1237-1256.
- Jarihani, A.A., Callow, J.N., Mcvicar, Tim., Niel, T.G.V., Larsen, J.R. 2015. Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. Journal of Hydrology, 524, 489-506.
- Khattab, M.F.O., Abo, R.K., Muqdad, S.Q.A., Merkel, B.J. 2017. Generate Reservoir Depths Mapping by Using Digital Elevation Model: A Case Study of Mosul Dam Lake, Northern Iraq. Advances in Remote Sensing, v.6, p.161-174.
- Li, K., Li, K., Yao, K. 2018. Inundation analysis of reservoir flood based on computer aided design (CAD) and digital elevation model (DEM). Water, v.10, n.530.
- LiPAD - LiDAR Portal for Archiving and Distribution. LiDAR data for Philippines. 2019. Disponível em: <<https://lipad.dream.upd.edu.ph/>>. Acesso em: 14/04/2019.
- Luedeling, E., Siebert, S., Buerkert, A. 2007. Filling the voids in the SRTM elevation model – A TIN-based delta surface approach. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 62, 283-294.
- Mallick, J.; Talukdar, S.; Kahla, N.B.; Ahmed, M.; Alsubih, M.; Almesfer, M.K.; Islam, A.R.M.T. 2021. A Novel Hybrid Model for Developing Groundwater Potentiality Model Using High Resolution Digital Elevation Model (DEM) Derived Factors. Water 2021, 13, 2632.
- Miranda, E. E. De(Coord.). Brasil em Relevô. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 15 Abr. 2019.
- Miranda, R. D. Q., Galvêncio, J. D., Morais, Y. C. B., Moura, M. S. B. D., Jones, C. A., Srinivasan, R. 2018. Dry Forest Deforestation Dynamics In Brazil's Pontal Basin. Revista Caatinga, 31, 385-395.
- Moura-Bueno, J.M., Dalmolin, R.S., Caten, A.T., Ruiz, L.F.C., Ramos, P.V., Dotto, A.C. 2016. Assessment of Digital Elevation Model for Digital Soil Mapping in a Watershed with Gently Undulating Topography. Rev Bras Cienc Solo, v.40.

- Mukaka M. M. 2012. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi medical journal : the journal of Medical Association of Malawi*, 24, 69–71.
- Nikolakopoulos, K.G., Kamaratakis, E.K., Chrysoulakis, N. 2006. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, p. 4819–4838.
- Nikolakopoulos, Konstantinos G. 2020. Accuracy assessment of ALOS AW3D30 DSM and comparison to ALOS PRISM DSM created with classical photogrammetric techniques. *European Journal of Remote Sensing*, (), 1–14.
- PE3D – Pernambuco tridimensional. O que é o programa? 2019. Disponível em: < <http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 21/02/2019.
- Pearson, K. 1900. 'X. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling', *Philosophical Magazine Series*, 5, 302,157 — 175.
- Portillo-Quintero, C. A., Sánchez-Azofeifa, G. A. 2010. Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation*, 143, 144–155.
- Puccini, L.R.S., Giffoni, M.G., Silva, L.F., Utagawa, C.Y. 2015. Comparativo entre as bases de dados PubMed, SciELO e Google Acadêmico com o foco na temática Educação Médica. *Cadernos UniFOA*, 28, 75-82.
- Redo, D., Aide, T. M., Clark, M. L. 2013. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. *Journal of Land Use Science*, 8, 123–153.
- Reuter, H.I., Hengl, T., Gessler, P., Soille, P. 2009. Chapter 4 Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 33. 87–120.
- Saksena, S., Venkatesh, M. 2015. Incorporating the Effect of DEM Resolution and Accuracy for Improved Flood Inundation Mapping. *Jour. Hydrol.*, v.530, p.180-94.
- Sanyal, J., Carbonneau, P., Densmore, A. 2014. Low- Cost Inundation Modelling at the Reach Scale with Sparse Data in the Lower Damodar River Basin, India. *Hydrol. Sci. Jour.* 59, 2086-2102.
- Satge, F., Bonnet, M.P., Calmant, S., Cretaux, J.F. 2015. Accuracy assessment of SRTM V4 and ASTER GDEM V2 over the 2 altiplano's watershed using ICESat/GLAS data. *Int. J. Remote Sens*, 36, 465–488.
- Silva, J.F., Ferreira, P.S., Silva, E.R.C., Costa, V.S.O., Candeias, A.N.B. 2017. Analysis of errors in the digital elevation model - SRTM for the Sobradinho reservoir/BA. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 7.
- Sorooshian, S., Duan, Q., Gupta, V. 1993. Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. *Water Resources Research*, 29, 1185-1194.
- Štular, B., Lozić, E., & Eichert, S. (2021). Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. *Remote Sensing*, 13(9), 1855.
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D.B., Oimoen, M.J., Zhang, Z., Danielson, J.J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J. 2017. ASTER global digital elevation model version 2-summary of validation results. Tech. rep. NASA. 2011.
- TOPODATA. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - TOPODATA. 2019. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php> >. Acesso em: 15/04/2019.
- Vannier, E., Taconet, O., Dusséaux, R., Darboux, F. 2018. Using digital elevation models and image processing to follow clod evolution under rainfall. *Journal of Ecology and Toxicology*, 2.
- Valeriano, M; Rosseti, D. 2012. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. , 32(2), 0–309.
- Varga, M., Bašić, T. 2015. Accuracy validation and comparison of global digital elevation models over Croatia, *International Journal of Remote Sensing*, 36, 170-189.
- Walczak, Z., Sojka, M., Wróżyński, R., Laks, I. 2016. Estimation of Polder Retention Capacity Based on ASTER, SRTM and LIDAR DEMs: The Case of Majdany Polder (West Poland). *Water*, 8, 230.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. Structure-from-Motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
- Yan, K., Baldassarre, G., Solomatine, D., Schumann, G. 2015. A Review of Low Cost Space Borne Data for Flood Modelling: Topography, Flood Extent and Water Level. *Hydrological Processes*, 29, 3368-3387.

- Yang, D., Qiu, H., Hu, S., Pei, Y., Wang, X., Du, C., ... Cao, M. 2021. Influence of successive landslides on topographic changes revealed by multitemporal high-resolution UAS-based DEM. CATENA, 202, 105229.
- Yapo P. O., Gupta H. V., Sorooshian S. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. Journal of Hydrology, 181, 23-48.
- Wang, K.-L.; Lin, J.-T.; Chu, H.-K.; Chen, C.-W.; Lu, C.-H.; Wang, J.-Y.; Lin, H.-H.; Chi, C.-C. 2021. High-Resolution LiDAR Digital Elevation Model Referenced Landslide Slide Observation with Differential Interferometric Radar, GNSS, and Underground Measurements. Appl. Sci. 2021, 11, 11389.