

DESEMPENHO COMPARATIVO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA REGIÃO DO VALE DO PARAÍBA E LITORAL NORTE DE SÃO PAULO, BRASIL

Rodrigo Cesar da Silva

Universidade de Taubaté, Programa de Pós-Graduação em Ecodesenvolvimento e Gestão Ambiental, Taubaté, SP, Brasil
rodrigo.cesar-silva@unesp.br

Willian José Ferreira

Universidade de Taubaté, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Taubaté, SP, Brasil
wiliam.ferreira@unitau.br

Celso de Souza Catelani

Universidade de Taubaté, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Taubaté, SP, Brasil
celso@agro.unitau.br

Angelo Ricardo Balduíno

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Porto Nacional, TO, Brasil
angelo.balduino@itpacporto.edu.br

Thiago Moura Figueiredo

Universidade de Taubaté, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Taubaté, SP, Brasil
thiago.mfigueredo@unitau.br

Marcelo dos Santos Targa

Universidade de Taubaté, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Taubaté, SP, Brasil
mtarga@unitau.br

RESUMO

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são estratégicos ao planejamento urbano. Sobretudo em regiões onde a urbanização avança sobre terrenos complexos, como a Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), no estado de São Paulo, sua aplicação contribui para reduzir a vulnerabilidade a eventos extremos, como deslizamentos, inundações e processos erosivos, fornecendo base técnica para diagnósticos precisos e intervenções territorialmente adequadas. Este estudo compara a precisão altimétrica de cinco modelos gratuitos (Copernicus, ALOS PALSAR, ASTER, SRTM-NASA e SRTM-INPE) em relação aos dados oficiais do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As análises estatísticas empregaram os coeficientes de correlação de Pearson (r), de determinação (R^2) e o teste de Durbin-Watson (d). Os resultados indicaram superioridade dos modelos Copernicus e ALOS PALSAR ($r = 0,999$; $R^2 = 0,999$; $d = 1,7$), com destaque para o Copernicus em áreas montanhosas e para o ALOS PALSAR em zonas litorâneas. ASTER e SRTM revelaram limitações em terrenos íngremes e altitudes elevadas. As descobertas oferecem subsídios técnicos consistentes para a gestão territorial e ambiental da RMVPLN, contribuindo para políticas de prevenção e adaptação em áreas de risco e para a proteção das populações vulneráveis.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Análise geoespacial. Altimetria. Desastres.

COMPARATIVE PERFORMANCE OF DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE PARAÍBA VALLEY AND THE NORTH COAST OF SAO PAULO, BRAZIL

ABSTRACT

Digital elevation models (DEMs) are essential for urban planning. In regions undergoing urbanization on complex terrain, such as the Metropolitan Region of Vale do Paraíba and Litoral Norte (RMVPLN) in São Paulo, DEMs help reduce vulnerability to extreme events, such as landslides, floods, and erosion, by providing a technical basis for accurate diagnoses and interventions tailored to the territory. This study compares the altimetric accuracy of five free models (Copernicus, ALOS PALSAR, ASTER, SRTM-NASA, and SRTM-INPE) in relation to official Brazilian Geodetic System (SGB) data made available by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Statistical analyses were performed using Pearson's

correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), and the Durbin-Watson test (d). The results indicated the superiority of the Copernicus and ALOS PALSAR models ($r = 0.999$, $R^2 = 0.999$, and $d = 1.7$), with Copernicus performing better in mountainous areas and ALOS PALSAR performing better in coastal areas. ASTER and SRTM revealed limitations on steep terrain and at high altitudes. These outcomes provide technical support for the consistent management of territory and the environment in the RMVPLN. This support contributes to the prevention and adaptation of policies in risk areas and the protection of vulnerable populations.

Keywords: Remote sensing. Geospatial analysis. Altimetry. Disasters.

INTRODUÇÃO

A modelagem digital do relevo por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) consolidou-se como uma das principais bases analíticas da geociência contemporânea, com vasta aplicação em estudos voltados à compreensão de dinâmicas ambientais e à identificação de áreas suscetíveis a inundações e movimentos de massa, particularmente em regiões com elevada variabilidade topográfica (Polidori; El Hage, 2020). Contudo, conforme observado por Silva, Queiroga Miranda e Candeias (2022), embora estejam amplamente disseminados, apresentam variações significativas quanto à origem e à resolução dos dados, o que pode comprometer a precisão dos resultados e afetar a coerência das interpretações. Diante desse quadro, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias capazes de estabelecer critérios padronizados de avaliação, assegurando a confiabilidade e a adequação dos MDEs às distintas necessidades analíticas e operacionais (Chang *et al.*, 2019).

Esses modelos, segundo Guth *et al.* (2021), são estruturados em formato *raster*, representando a superfície terrestre em três dimensões dentro de um sistema cartesiano, no qual as coordenadas x e y correspondem à posição horizontal e z à altitude. Tal estrutura viabiliza simulações topográficas detalhadas e sustenta aplicações como delimitação de bacias, cálculo de declividades, modelagem hidrológica e análise de escoamento superficial, permitindo identificar áreas suscetíveis a processos erosivos e instabilidades do terreno (Pelletier, 2012).

Para além de sua função técnica, os MDEs têm sido integrados ao planejamento e à gestão territorial, oferecendo suporte à análise de riscos, à delimitação de zonas críticas e à formulação de políticas voltadas ao uso do solo, à conservação ambiental e à mitigação de desastres em áreas submetidas a intensas pressões antrópicas. A expansão dessas aplicações foi favorecida por avanços em sensoriamento remoto, com destaque para tecnologias baseadas em radar de abertura sintética e interferometria (Xiong *et al.*, 2022). Um marco relevante nesse processo foi a disponibilização pública dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que, desde 2000, fornece cobertura altimétrica global a partir de sensores operando nas bandas C e X (Yang *et al.*, 2011).

Desde então, passaram a integrar o acervo de dados altimétricos de acesso aberto produtos como o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM), o *Advanced Land Observing Satellite – Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar Digital Elevation Model* (ALOS PALSAR DEM) e o *Copernicus Digital Elevation Model* (Copernicus DEM), cada qual com características técnicas que os tornam mais adequados a determinadas escalas e finalidades específicas (Rabus *et al.*, 2003; Mukul; Srivasta; Mukul, 2015).

Tais acervos são essenciais para identificar zonas de instabilidade e à tomada de decisões estratégicas de gestão de riscos, direcionando intervenções mais precisas. Estudos como os de Santos *et al.* (2019) e Reani *et al.* (2020) evidenciam a importância dessas representações na caracterização de áreas vulneráveis, fornecendo subsídios técnicos à formulação de planos diretores e estratégias de adaptação às mudanças climáticas. Conforme argumentam Marengo *et al.* (2024), quando articuladas a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a modelos analíticos com representação espacial, tais bases aumentam a capacidade preditiva das análises e qualificam as decisões voltadas ao ordenamento territorial e à mitigação de impactos.

Nesse contexto, a Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), no Estado de São Paulo, apresenta um conjunto de características que intensifica sua vulnerabilidade a eventos ambientais extremos. O relevo acidentado, aliado rápido crescimento urbano e ao uso inadequado do solo, compõe um cenário em que os riscos de inundações e deslizamentos se tornam recorrentes e

afetam diretamente a vida de comunidades já expostas a condições precárias de infraestrutura (Silva; Catelani; Targa, 2020). A sobreposição entre declividades acentuadas e ocupações informais aprofunda esses riscos, demandando estratégias mais integradas de planejamento territorial e ações preventivas capazes de mitigar os impactos socioambientais (Santos *et al.*, 2012; Silva; Marengo; Ruv Lemes, 2024).

Diante desse cenário, questiona-se: em que medida os MDEs gratuitos atualmente disponíveis se equiparam, em termos de precisão altimétrica, aos dados oficiais do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), produzidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)? Responder a essa pergunta é um aspecto-chave para validar o emprego desses modelos em análises críticas, como o monitoramento de áreas de risco, o ordenamento territorial e a gestão dos recursos naturais.

Com base nessa problemática, este estudo tem por objetivo avaliar o desempenho dos MDEs SRTM-NASA, SRTM-INPE, Copernicus, ALOS PALSAR e ASTER, de alta resolução em comparação aos dados geodésicos do SGB, com ênfase na RMVPLN. Para tanto, foram realizadas análises estatísticas lineares, utilizando as técnicas do Coeficiente de Correlação de Pearson, regressão ajustadas por Mínimos Quadrados Ordinários, Coeficiente de Determinação e Teste de Durbin-Watson, a partir de dados altimétricos provenientes de distintas fontes, com o intuito de aferir a acurácia dos modelos gratuitos e verificar sua aplicabilidade em contextos marcados por vulnerabilidades socioambientais. As análises estatísticas foram realizadas com algoritmos desenvolvidos em Python. A investigação pretende, assim, oferecer fundamentos técnicos que subsidiem o uso criterioso dessas ferramentas no apoio à gestão ambiental e à prevenção de desastres, estimulando práticas territoriais mais responsáveis e informadas.

METODOLOGIA

Vinculada ao Programa de Pós-graduação em Ecodesenvolvimento e Gestão Ambiental da Universidade de Taubaté, esta investigação concentra-se na análise de soluções tecnológicas e estratégias de gestão voltadas à sustentabilidade. A relevância do estudo reside na necessidade de aprofundar o entendimento sobre a acurácia e a aplicabilidade de dados altimétricos gratuitos, com ênfase em regiões vulneráveis a inundações e deslizamentos. A comparação entre esses modelos e os dados oficiais do SGB contribui para o aperfeiçoamento das ferramentas de diagnóstico espacial, fornecendo subsídios à formulação de políticas públicas orientadas ao ordenamento territorial, à gestão urbana e à mitigação de riscos ambientais, com reflexos diretos na proteção de comunidades expostas a tais ameaças.

Área de estudo

A pesquisa foi conduzida na RMVPLN, localizada no Estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. Com aproximadamente 16.000 km², essa unidade regional compreende 39 municípios e uma população de 2.506.053 habitantes, conforme dados do Censo de 2022 (Vieira *et al.*, 2023; IBGE, 2022). Sua paisagem caracteriza-se pela diversidade geomorfológica, com a presença de planícies costeiras, serras e vales fluviais. Conforme Ross e Moroz (1996), essa diversidade geomorfológica permite o zoneamento em quatro compartimentos: Litoral Norte, Serra do Mar e Bocaina, Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira. Tal complexidade altimétrica favorece estudos voltados à análise do relevo, possibilitando uma compreensão mais precisa das dinâmicas ambientais e contribuindo para estratégias de gestão territorial sustentáveis.

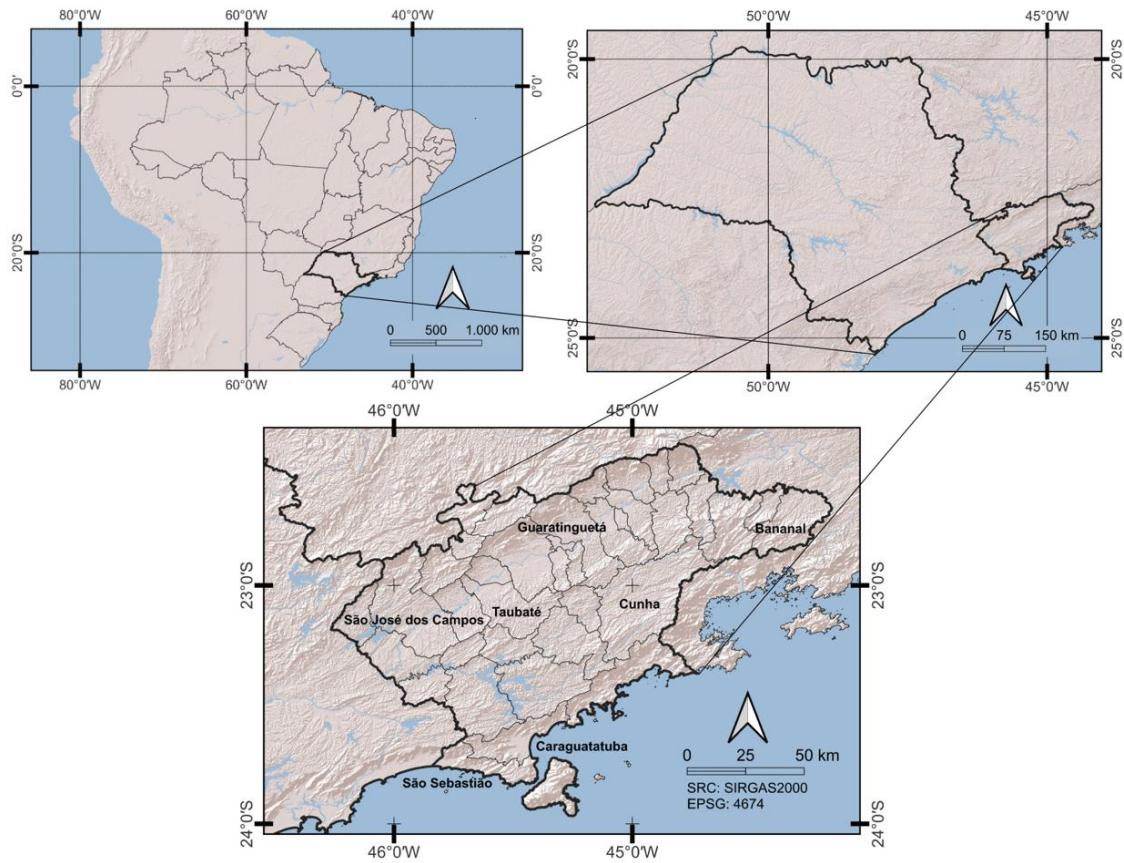
A RMVPLN destaca-se pelo dinamismo econômico e pela posição estratégica entre as duas principais metrópoles do país — São Paulo e Rio de Janeiro —, fator determinante para o desenvolvimento de polos industriais e tecnológicos. Cidades como São José dos Campos, Taubaté, Jacareí e Pindamonhangaba tornaram-se referências em inovação e crescimento, impulsionadas por investimentos nos setores automotivo, aeroespacial, petroquímico e tecnológico (Ferreira *et al.*, 2025). Além disso, o território integra importantes eixos logísticos nacionais, sendo atravessado por rodovias como a Presidente Dutra, Tamoios e Oswaldo Cruz, que conectam o interior paulista ao litoral e às capitais do Sudeste.

Historicamente, a região passou por intensos processos de transformação ambiental. Entre o final do século XIX e o início do século XX, a expansão da cafeicultura e a exploração madeireira provocaram

a devastação generalizada da Mata Atlântica (Dean, 1995), que impulsionou a ocupação humana e deixou duradouras marcas socioambientais. A partir da década de 1950, a urbanização acelerou-se, estimulada pela industrialização e pela posição geográfica estratégica, o que agravou as pressões sobre os ecossistemas locais (Perz, 2000; Santos, 2008). Como apontam Ferreira *et al.* (2013), a ausência de planejamento urbano adequado resultou em problemas como poluição hídrica, erosão do solo, desmatamento e ocupação irregular de áreas de risco, agravando a exposição da população a inundações e deslizamentos.

Atualmente, a região abriga importantes áreas de preservação ambiental, incluindo parques estaduais e reservas ecológicas, que contribuem para a conservação da biodiversidade remanescente da Mata Atlântica (Daunt; Guimarães; Silva, 2023). No entanto, a proximidade entre essas áreas protegidas e zonas urbanizadas, impõe desafios significativos à gestão dos recursos naturais e ao controle de desastres. A coexistência entre infraestrutura industrial e unidades de conservação configura um cenário de alta complexidade para o planejamento territorial e a promoção da sustentabilidade regional, tornando-se fundamental o uso de ferramentas analíticas capazes de embasar decisões mais precisas e integradas, conciliando desenvolvimento socioeconômico com preservação ambiental. A Figura 1 ilustra a localização geográfica da RMVPLN.

Figura 1 - Localização da Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte, São Paulo, Brasil



Fonte: Os autores, 2025.

Dados do Sistema Geodésico Brasileiro

Neste estudo, foram utilizados dados do SGB disponibilizados pelo Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE. Os marcos altimétricos do SGB fornecem referências fundamentais para o posicionamento de alta precisão em território nacional. Conforme os protocolos do instituto, a materialização desses marcos e a determinação de suas coordenadas envolvem quatro sessões de observação com seis horas de duração, empregando receptores conectados ao *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Os resultados finais

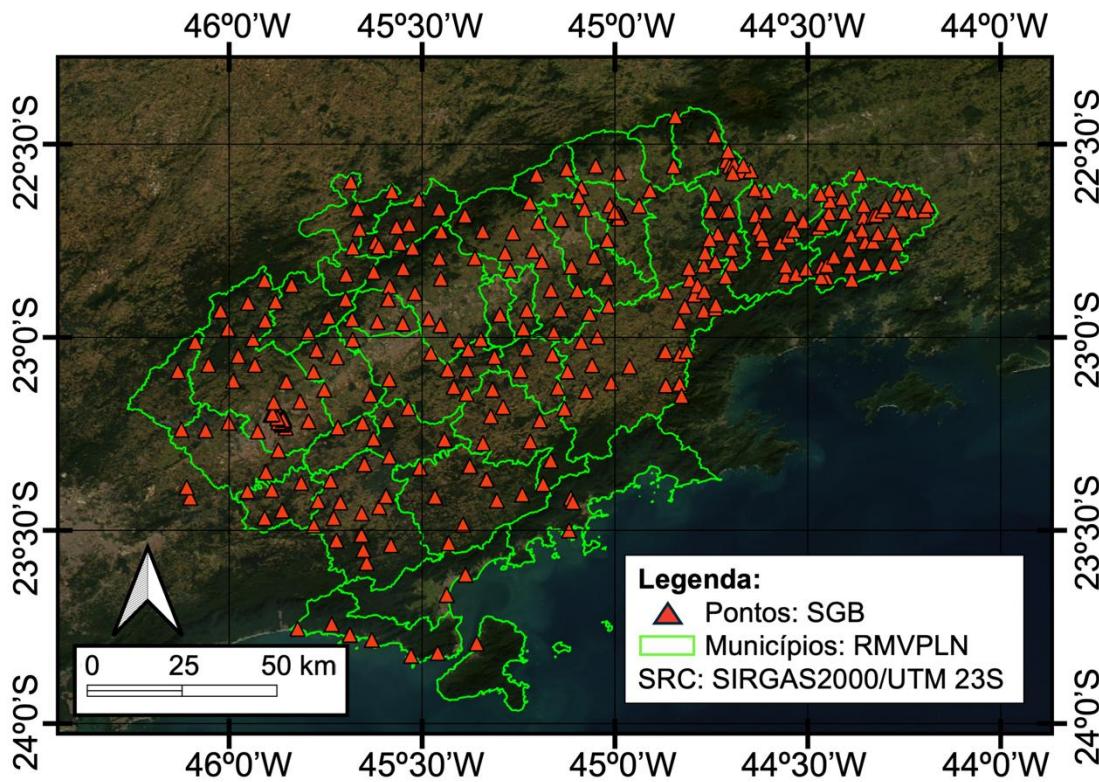
devem atender a padrões de precisão planimétrica inferiores a 2 cm e altimétrica inferiores a 3 cm (IBGE, 2017).

As altitudes geométricas utilizadas nesta pesquisa estão referenciadas ao *Datum* SIRGAS2000. Os modelos digitais, por sua vez, adotam o *Datum* WGS84 ou foram convertidos para esse sistema, como no caso do Copernicus. Para viabilizar a comparação entre as bases, foi elaborada uma malha de pontos com coordenadas cartesianas do SGB, posteriormente convertida para o WGS84 no software QGIS 3.16 (Felus; Burtch, 2009). Todos os registros foram inseridos em um sistema comum de referência vertical e horizontal, garantindo a compatibilidade necessária à etapa comparativa.

A amostra consistiu em 338 pontos altimétricos do SGB, distribuídos por todos os municípios da RMVPLN. Esses elementos serviram como base para aferição dos valores de altitude associados aos pixels dos produtos analisados, permitindo mensurar a acurácia altimétrica e explorar variações conforme o relevo. A adoção dessa estratégia possibilitou identificar padrões de divergência e validar a consistência dos dados em múltiplos contextos morfológicos.

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial dos pontos utilizados: os marcos do SGB, indicados por triângulos vermelhos, estão dispersos ao longo dos limites municipais da RMVPLN, destacados em contorno verde. Essa representação cartográfica evidencia a abrangência territorial da amostra, que contempla desde zonas litorâneas até setores de maior altitude, assegurando variedade diversificada para verificar o desempenho altimétrico dos modelos em cenários topográficos contrastantes.

Figura 2 - Distribuição espacial dos marcos do SGB utilizados na análise altimétrica



Fonte: Os autores, 2024.

MDE avaliados

Foram analisados cinco MDEs de acesso gratuito, com resoluções variando entre 10 e 30 metros:

i) **Copernicus DEM:** Derivado da missão TanDEM-X, conduzida entre 2011 e 2015, o modelo foi disponibilizado ao público em 2019. Nesta pesquisa, foram utilizados os produtos com resolução espacial de 30 m (GLO-30 DTED). A missão operou com radar interferométrico de abertura sintética

na Banda X, com frequência de 9,65 GHz e comprimento de onda de 3 cm (Rizzoli *et al.*, 2017). Os dados estão disponíveis sítio virtual da Copernicus (Copernicus, 2024).

ii) ALOS PALSAR DEM: Produzido a partir do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), operado pela Agência Espacial Japonesa (JAXA) entre 2006 e 2011. Os dados foram gerados com sensor em Banda L, frequência de 1,25 GHz e comprimento de onda de 23 cm (Suzuki *et al.*, 2012). A resolução espacial é de 10 m (Watarai *et al.*, 2017).

iii) SRTM – NASA: Os dados do SRTM foram adquiridos durante 11 dias em fevereiro de 2000, por meio de radar interferométrico com duas antenas. Utilizou-se Banda C (frequência de 5,3 GHz; comprimento de onda de 5,6 cm) e Banda X (9,6 GHz; 3 cm) (Werner, 2001). Os produtos, inicialmente com resolução de 90 m, foram posteriormente reprocessados para 30 m e estão disponíveis pela NASA no sítio virtual da *United States Geological Survey*, por meio da plataforma *EarthExplorer* (USGS, 2024).

iv) SRTM – INPE (Topodata): Versão refinada dos dados SRTM desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com foco na realidade morfométrica brasileira. Os dados foram aprimorados por meio de técnicas de krigagem e ajustes topográficos, estando disponíveis desde 2008 (Valeriano; Rossetti, 2012). A distribuição é feita por meio do projeto Topodata do INPE.

v) ASTER GDEM: Gerado pelo sensor ASTER, a bordo do satélite Terra, operando entre 1999 e 2008. Os modelos foram criados a partir da correlação de pares estereoscópicos captados pelo subsistema Visível e Infravermelho Próximo (VNIR), especificamente pelas bandas 3N (Nadir) e 3B (Backward), com comprimento de onda entre 0,78 e 0,86 μm. A resolução das imagens é de 15 m, com produto final reamostrado para 30 m (Toutin, 2008; Grohmann, 2018; Zhang *et al.*, 2019).

Diferença média de altitude entre o SGB e MDE e análises estatísticas

A diferença média de altitude entre os valores obtidos do SGB e os registrados pelos MDE foi calculada com base na média aritmética das discrepâncias individuais (Dif) entre os pares de dados, conforme expressa a Equação 1. Para fins analíticos, a comparação foi segmentada em três intervalos altimétricos: i) altitudes inferiores a 400 m; ii) entre 400 e 800 m; e iii) superiores a 800 m.

$$Dif = \frac{\sum h_{IBGE} - h_{MDE}}{n} \quad (1)$$

Onde h_{IBGE} : altitude geométrica do SGB; h_{MDE} : altitude geométrica do MDE analisado; n : número de amostras.

Para avaliar a relação linear entre as altitudes extraídas dos MDE e aquelas provenientes do SGB, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson (r), empregado em estudos científicos e técnicos para mensurar a intensidade e a direção da associação entre variáveis contínuas (Asuero; Sayago; González, 2006). A análise foi complementada com gráficos de regressão ajustados por mínimos quadrados ordinários (MQO), os quais possibilitaram a visualização da correspondência entre os conjuntos de dados, bem como a distribuição dos resíduos (Murtagh; Heck, 2012; Azevedo, 2016).

Adicionalmente, aplicou-se o Coeficiente de Determinação (R^2), que expressa a proporção da variabilidade dos valores altimétricos dos MDE explicada pelas observações do SGB (Asuero *et al.*, 2006). Com variação entre 0 e 1, esse coeficiente indica o grau de ajuste entre os dados e o modelo estatístico adotado. Valores próximos de 1 sugerem forte capacidade explicativa, sinalizando alta correspondência entre os modelos analisados e os dados geodésicos de referência (Gujarati; Porter, 2009). Um R^2 elevado, nesse contexto, reforça a confiabilidade dos MDE para aplicações topográficas e geoespaciais.

A fim de verificar a independência dos erros nas observações, foi aplicado o Teste de Durbin-Watson (DW), ferramenta estatística que avalia a presença de autocorrelação entre os resíduos de modelos lineares, cuja etapa é essencial para validar a consistência dos resultados obtidos (Bartels; Goodhew, 1981). Segundo Rutledge e Barros (2002), valores do teste próximos de 2 indicam ausência de autocorrelação, enquanto aproximações de 0 ou 4 sinalizam autocorrelação positiva ou negativa, respectivamente. A aplicação desse teste ao conjunto de dados assegura que os modelos utilizados não apresentam padrões sistemáticos de erro, preservando a validade inferencial das análises (Maxwell; David, 1995).

Todos os testes estatísticos foram conduzidos por meio de um algoritmo desenvolvido em Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, que permitiram a manipulação dos dados, a geração das visualizações gráficas e a execução dos modelos estatísticos com precisão e reprodutibilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta uma análise detalhada da performance dos MDE avaliados na RMVPLN, com foco em sua aplicabilidade em diferentes contextos territoriais. A discussão contempla aspectos relacionados à precisão altimétrica e à adequação dos modelos para fins de planejamento urbano, gestão de recursos hídricos e monitoramento de desastres (Huang *et al.*, 2015). Foram comparados cinco produtos de acesso aberto: ALOS PALSAR, ASTER, Copernicus, SRTM-NASA e SRTM-INPE. A seguir, são apresentados os resultados obtidos, acompanhados de uma discussão crítica sobre o desempenho de cada modelo frente às especificidades topográficas da região estudada.

Coeficientes de correlação, determinação e Teste DW

A Tabela 1 sintetiza os resultados estatísticos obtidos na avaliação dos MDEs, com destaque para os coeficientes de correlação (r), determinação (R^2) e os valores do Teste de Durbin-Watson (DW).

Tabela 1 - Avaliação estatística dos MDE em relação aos dados do SGB

Estatística	Copernicus	ALOS PALSAR	SRTM-NASA	SRTM-INPE	ASTER
r	0,99983	0,99983	0,99982	0,99969	0,99969
R^2	0,99966	0,99966	0,99965	0,99937	0,99937
DW (d)	1,7733	1,6685	1,6447	1,4836	1,3826

Fonte: Os autores, 2024.

Os modelos ALOS PALSAR e Copernicus destacaram-se por apresentarem os maiores coeficientes de correlação ($r = 0,99983$) e determinação ($R^2 = 0,99966$), evidenciando um ajuste altimétrico altamente consistente em relação aos dados do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). O SRTM-NASA também obteve desempenho expressivo, com $r = 0,99982$ e $R^2 = 0,99965$, valores muito próximos aos dois primeiros. Já os produtos ASTER e SRTM-INPE, embora apresentem coeficientes ligeiramente inferiores ($r = 0,99969$; $R^2 = 0,99937$), mantêm padrão de concordância elevado, compatível com aplicações que não demandem altíssima precisão. Uma exatidão maior se comparado os MDEs SRTM-NASA ao ASTER havia sido constatado nos resultados obtidos por Li *et al.* (2017). Todos os resultados foram estatisticamente significativos ($p < 0,0001$), assegurando confiabilidade com nível de 95%.

A avaliação dos resíduos, por meio do teste de Durbin-Watson (DW), permite qualificar essa aderência. O Copernicus obteve o valor mais próximo de 2 ($d = 1,7733$), indicando baixa autocorrelação residual e maior estabilidade nas estimativas. Em seguida, aparecem o ALOS PALSAR ($d = 1,6685$) e o SRTM-NASA ($d = 1,6447$), ambos com níveis de autocorrelação aceitáveis. Em contraste, os valores mais baixos observados nos modelos SRTM-INPE ($d = 1,4836$) e ASTER ($d = 1,3826$) sugerem maior dependência entre os erros, o que pode comprometer a robustez das estimativas altimétricas, especialmente em aplicações que necessitam de maior precisão local.

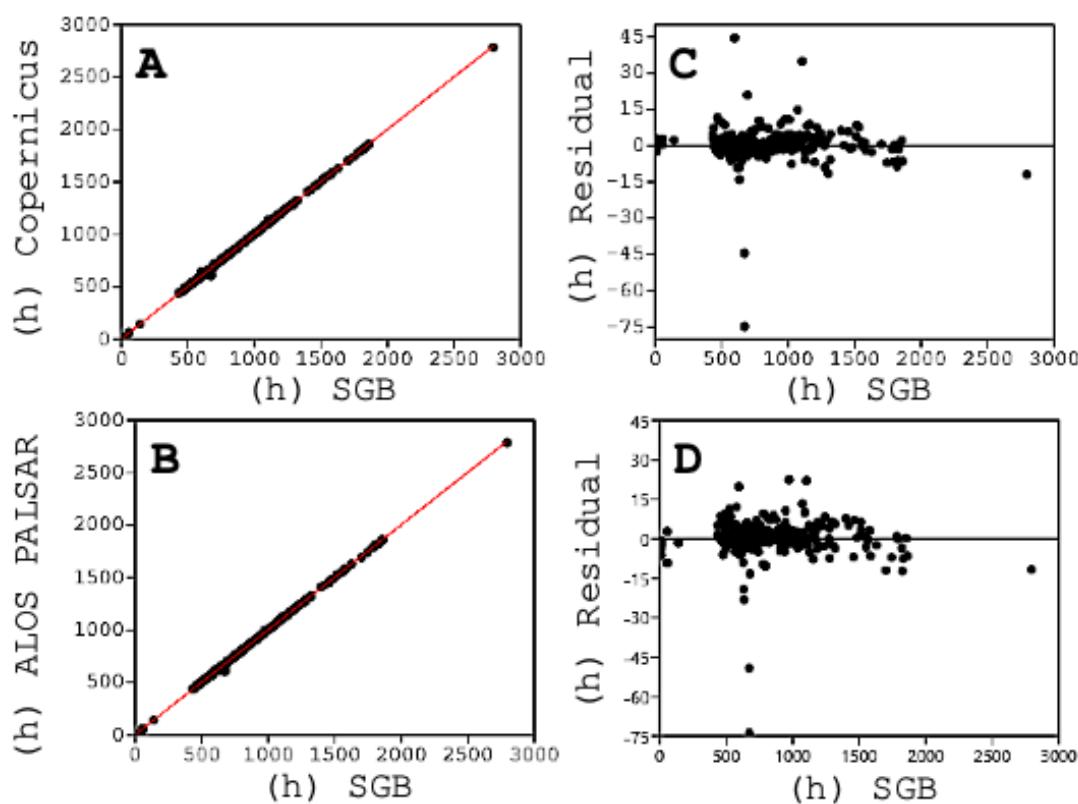
Essas diferenças também se refletem na Figura 3, que apresenta as regressões lineares entre os valores altimétricos dos MDE e os dados de referência, bem como a distribuição dos resíduos. As Figuras 3a e 3b demonstram forte alinhamento das estimativas com a linha de tendência ideal, reforçando a precisão geral dos modelos. No entanto, a análise dos resíduos (Figuras 3c e 3d) revela comportamentos distintos: no Copernicus, os erros distribuem-se de forma homogênea em torno da linha zero, sem padrão direcional claro, sugerindo ausência de viés sistemático. No ALOS PALSAR, por outro lado, observa-se maior dispersão, notadamente em altitudes superiores a 600 metros, o que

indica variações locais mais acentuadas e possível presença de erro sistemático em regiões de relevo mais acidentado.

Esses resultados reforçam a consistência geral dos cinco MDE avaliados, mas também destacam nuances importantes entre eles. O Copernicus, além de apresentar coeficientes elevados, demonstra maior estabilidade estatística e distribuição residual mais uniforme, o que o torna apropriado para aplicações como modelagens hidrológicas, estudos de risco e planejamento urbano em áreas de relevo complexo. O ALOS PALSAR, por sua vez, configura-se como uma opção técnica viável, sobretudo em setores costeiros e planícies elevadas, embora com maior sensibilidade a variações topográficas abruptas.

Entre os demais produtos, o SRTM-NASA aproxima-se do desempenho dos modelos líderes, mas com leve aumento na autocorrelação dos resíduos. Já os modelos ASTER e SRTM-INPE, apesar da forte correlação com os dados geodésicos, apresentam limitações estatísticas mais evidentes, o que restringe sua aplicabilidade em contextos que premem maior acurácia nas estimativas de altitude. Essas distinções ressaltam a importância de avaliações detalhadas por faixa altimétrica e por condição morfológica, de modo a orientar escolhas mais criteriosas conforme a finalidade analítica.

Figura 3 - Regressão de MQO em relação ao SGB: Copernicus (A); ALOS PALSAR (B). Análise dos valores residuais: Copernicus (C); ALOS PALSAR (D)



Fonte: Os autores, 2024.

Diferença de altitude entre SGB e MDE

As diferenças de altitude entre os modelos avaliados e os dados geodésicos de referência são apresentadas na Tabela 2, expressas em metros (m). Os resultados indicam uma tendência geral de subestimação das altitudes pelos MDE, quando comparados às informações obtidas em campo pelo SGB, corroborando padrão identificado em estudos anteriores (Rodriguez; Morris; Belz, 2006; Grohmann, 2018).

Tabela 2 - Diferença média de altitude entre os dados do SGB e os MDE, por faixa altimétrica

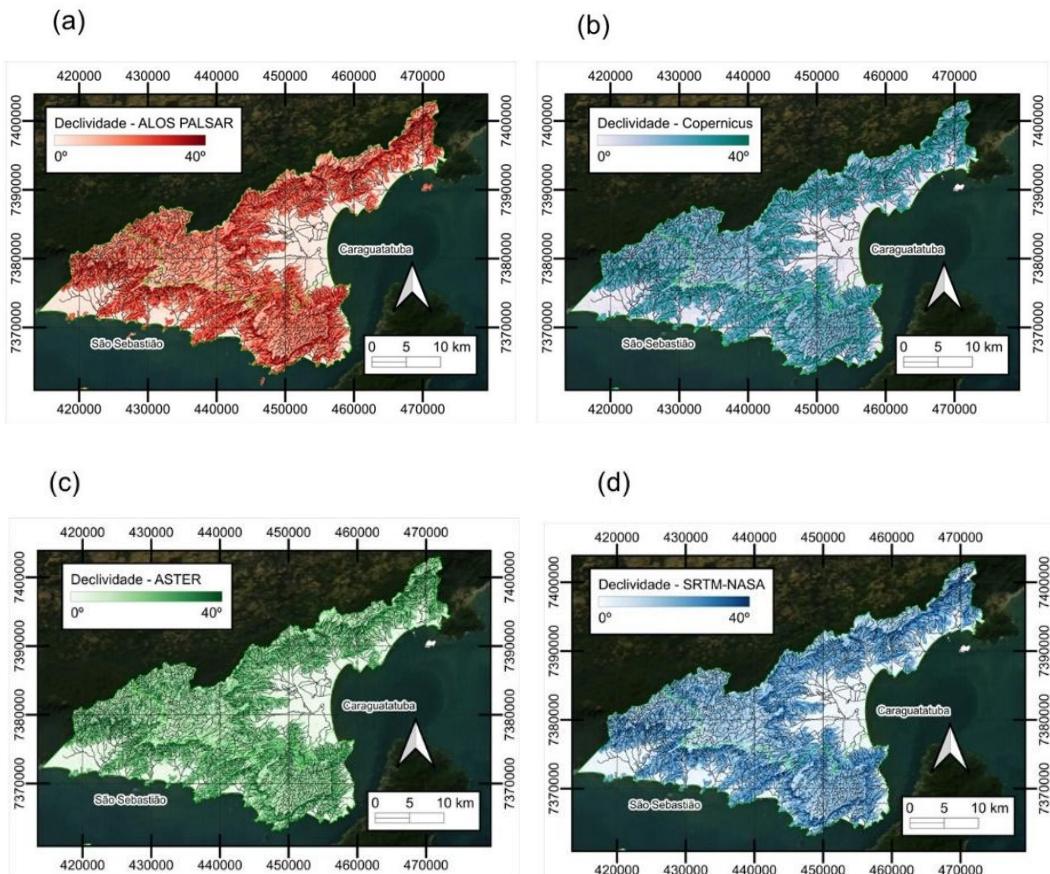
Altitude (m)	Copernicus	ALOS PALSAR	SRTM-NASA	SRTM-INPE	ASTER
> 400	-5.86	0.05	-3.48	-4.32	-5.95
Entre 400 e 800	-3.76	-3.06	-6.01	-6.60	3.02
< 800	-4.39	-4.51	-7.20	-9.61	-1.29

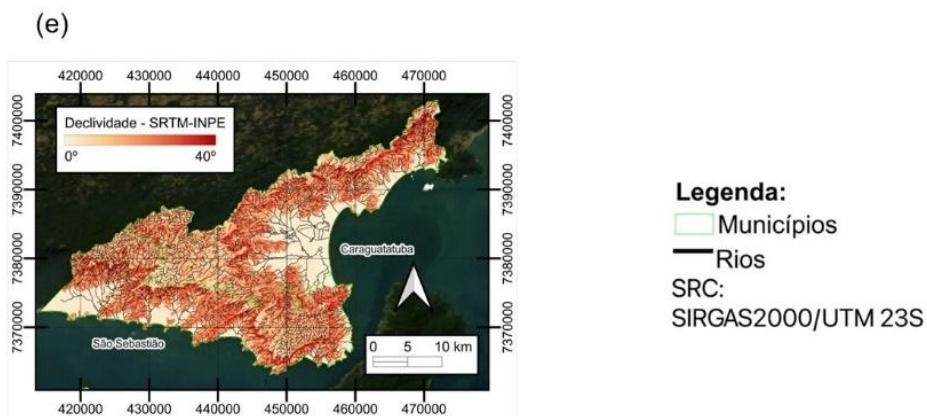
Fontes: Os autores, 2024.

Na faixa inferior, com altitudes abaixo de 400 m, o ALOS PALSAR apresentou a menor discrepância (0,05 m), revelando notável proximidade com os dados do SGB. Em contrapartida, o ASTER exibiu o maior desvio, com subestimação de -5,95 m, resultado condizente com a literatura, que aponta limitações desse modelo em regiões com vegetação densa ou relevo suave (Reuter; Nelson; Jarvis, 2007; Gesch *et al.*, 2012). Ainda cabe destacar que os valores residuais obtidos com os MDEs ASTER (não apresentados) obtiveram grande variação para o perfil topográfico da RMVPLN.

A Figura 4 apresenta os mapas de declividade do Litoral Norte de São Paulo, elaborados a partir de diferentes MDEs, com destaque para os municípios de São Sebastião e Caraguatatuba.

Figura 4 - Mapas de declividade do Litoral Norte de São Paulo gerados a partir de diferentes MDEs: (a) ALOS PALSAR; (b) Copernicus; (c) ASTER; (d) SRTM-NASA; (e) SRTM-INPE. Em destaque, os municípios de São Sebastião e Caraguatatuba





Fonte: Os autores, 2025.

Embora os mapas apresentados na Figura 4 revelem padrões semelhantes de distribuição espacial da declividade no Litoral Norte, as diferenças entre os MDE tornam-se mais evidentes na análise comparativa dos valores altimétricos, conforme sintetizado na Tabela 2. Observa-se que o ALOS-PALSAR apresenta maior proximidade com os dados do SGB nas faixas mais elevadas, enquanto o SRTM-INPE exibe as maiores discrepâncias, de modo particular, em áreas abaixo de 800 metros de altitude, com diferença média de -9,61 m. O ASTER, por sua vez, apresenta variações menos acentuadas, mas com valores positivos em altitudes intermediárias, o que pode influenciar na estimativa de declividades. Essas variações indicam que a escolha do MDE impacta diretamente a acurácia das análises geomorfológicas e, por consequência, as interpretações voltadas ao planejamento territorial e à gestão de riscos.

Entre 400 e 800 m, Copernicus e ALOS PALSAR mantiveram desempenho consistente, com subestimações de -3,76 m e -3,06 m, respectivamente. O ASTER, nesta faixa, apresentou comportamento inverso, com superestimação de 3,02 m, o que evidencia um desvio sistemático positivo. Estudos anteriores já relataram esse tipo de distorção altimétrica do ASTER em áreas de média altitude, quando há interferência atmosférica e baixa qualidade estereoscópica (Toutin, 2008; Hirt; Filmer.; Featherstone, 2010). Já os modelos SRTM, tanto na versão original (NASA) quanto na adaptada pelo INPE, apresentaram maiores diferenças negativas (-6,01 m e -6,60 m), resultado comum em áreas com declividade moderada e presença de obstáculos superficiais (Valeriano; Rossetti, 2012).

Acima de 800 m, o ASTER apresentou o menor erro médio (-1,29 m), desempenho que reforça observações já relatadas sobre sua relativa eficiência em terrenos elevados, devido à menor obstrução do sensor óptico em altitudes maiores (Grohmann, 2018), porém com grande variação residual em altitudes inferiores. Os modelos Copernicus e ALOS PALSAR mantiveram resultados equilibrados, enquanto os derivados do SRTM voltaram a apresentar os maiores desvios, condizentes com suas conhecidas limitações em terrenos com grande variação vertical (Rodriguez; Morris; Belz, 2006).

Ainda que todos os MDE analisados tenham apresentado alta correlação com o SGB, as descobertas reforçam a superioridade relativa do Copernicus e do ALOS PALSAR, particularmente pela baixa autocorrelação residual e pela consistência nas três faixas altimétricas, corroborando resultados obtidos por Rizzoli *et al.* (2017) e Watarai *et al.* (2017). Conforme apontado por Suzuki *et al.* (2012), o primeiro combina interpolação interferométrica em Banda X com algoritmo de processamento de alta precisão; o segundo, por operar em Banda L, apresenta maior penetração em vegetação e estabilidade altimétrica em áreas tropicais.

Já os modelos do SRTM, embora frequentemente utilizados, exibem limitações conhecidas quanto à resolução vertical e à influência de cobertura vegetal e edificações, notadamente em altitudes intermediárias (Rodriguez; Morris; Belz, 2006; Valeriano; Rossetti, 2012). O ASTER, por sua vez, assume comportamento híbrido: impreciso em cotas mais baixas, mas com desempenho razoável em altitudes elevadas, embora dependente da qualidade das imagens estereoscópicas utilizadas (Toutin, 2008).

Desempenho e aplicabilidade dos MDE na RMVPLN

Aplicar MDE em regiões de alta complexidade territorial, como a RMVPLN, implica ir além da simples verificação da qualidade estatística dos dados, sendo necessário considerar a capacidade desses modelos de representar com fidelidade realidades geográficas dinâmicas, marcadas por desafios estruturais: terrenos acidentados, expansão urbana desordenada e recorrência de riscos ambientais que afetam diretamente a vida de milhares de pessoas. Combinando serras, vales, áreas costeiras e zonas densamente urbanizadas, a RMVPLN configura um território em que o relevo, longe de ser uma variável meramente técnica, atua como alicerce dos processos sociais, ecológicos e políticos em curso.

Os dados analisados demonstram que, entre os MDE gratuitos disponíveis, Copernicus e ALOS PALSAR são os que melhor dialogam com a realidade geodésica da região. Ambos os modelos apresentaram alta correlação com os dados do SGB, além de padrões residuais consistentes. O Copernicus mostrou estabilidade altimétrica mesmo em terrenos com grande variação de cota, enquanto o ALOS PALSAR teve melhor desempenho em áreas de baixa altitude e vegetação densa, um padrão coerente com outros estudos realizados em regiões tropicais (Julzarika *et al.*, 2021; Okolie *et al.*, 2024).

Ainda assim, nenhum modelo está isento de limitações. Tanto o Copernicus quanto o ALOS PALSAR apresentaram tendência à subestimação de altitudes em cotas intermediárias. Em análises hidrológicas, de infraestrutura urbana ou prevenção de riscos, diferenças de poucos metros podem comprometer a precisão dos modelos e, por consequência, a efetividade das políticas públicas. Entretanto, para projetos que envolvem grandes extensões territoriais, de acordo com Ferreira, Richetto e Alvalá (2023), o uso de produtos orbitais são a melhor alternativa pois abrangem importantes aspectos para políticas públicas, principalmente aquelas relacionadas a prevenção de desastres: baixo custo, fácil acesso e disponibilidade de dados.

Outros modelos, como o ASTER e os derivados do SRTM (NASA e INPE), revelaram desempenho inferior. O ASTER teve comportamento instável em altitudes médias e baixas, possivelmente devido à interferência atmosférica em suas imagens ópticas, um problema conhecido em regiões com alta umidade e cobertura de nuvens (Hirano; Welch; Lang, 2003; Cuartero *et al.*, 2013), como é o caso da RMVPLN. Já os dados do SRTM tendem a suavizar o relevo, o que reduz sua eficácia em estudos de declividade e mapeamentos de escarpa (Rodriguez *et al.*, 2006; Grohmann, 2018).

Outro aspecto que merece atenção é a atualidade dos dados. Modelos baseados em imagens obtidas há mais de uma década, como o ASTER (1999–2008) e o SRTM (2000), retratam uma paisagem que, em muitos pontos da RMVPLN, já deixou de existir. A proliferação de assentamentos precários, a impermeabilização de áreas verdes e as alterações no uso do solo causaram profundas mudanças na geografia local. Em eventos extremos recentes, como os deslizamentos em São Sebastião (2023), a defasagem temporal dos modelos comprometeu a capacidade de antecipação e resposta (Assis Dias *et al.*, 2020; Villanova; Toniolo; Puga, 2024). Nesses casos, a desatualização dos dados deixa de ser uma limitação técnica e passa a representar um risco social real.

Esse cenário reforça a importância de integrar os MDEs às plataformas já utilizadas pelos órgãos públicos, como o Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), os sistemas de alerta da Defesa Civil e as bases cartográficas municipais. Para isso, é primordial que os técnicos e gestores responsáveis por planejamento urbano, meio ambiente e infraestrutura recebam formação continuada, garantindo o uso qualificado dessas ferramentas em suas rotinas. Compreende-se, assim, que o problema, muitas vezes, não está apenas nos dados, mas na forma como são interpretados e incorporados às decisões.

Mesmo os modelos tecnicamente mais robustos, como o Copernicus, requerem validação local com marcos de altitude confiáveis, especialmente em áreas de instabilidade geológica. Métodos como krigagem, fusão multissensorial e calibração com dados de alta resolução, como os obtidos via *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e *Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System* (RTK-GNSS), tornam-se estratégias promissoras para refinar a acurácia dos modelos em escala local.

Dessa forma, é possível afirmar que os MDE gratuitos, como Copernicus e ALOS PALSAR, mostram elevada convergência com os dados oficiais do SGB, oferecendo uma base segura para diversas aplicações geoespaciais. No entanto, essa equivalência é dependente do tipo de terreno, da faixa altimétrica e do objetivo da análise. Em aplicações sensíveis, como gestão de encostas, planejamento

hidrológico ou mapeamento de áreas de risco, recomenda-se sempre a combinação de múltiplas fontes, calibração in loco e atenção aos limites de cada produto.

A densidade da malha amostral constitui a principal limitação desta pesquisa, pois, mesmo com 338 pontos distribuídos regionalmente, pode não ter capturado a totalidade da diversidade topográfica da RMVPLN, principalmente em setores de difícil acesso. A análise centrou-se na altitude geométrica, ou seja, elipsoidal dos *data* SIRGAS2000 e WGS84. Para aplicações em estudos hidrológicos e projetos de drenagem, a utilização de altitudes geométricas resulta em interferências nos projetos desenvolvidos, entretanto podendo ser superadas pela conversão das altitudes geométricas para normais, utilizando o modelo geoidal oficial do IBGE hgeoHNOR2020 (IBGE, 2021).

Futuros estudos devem expandir a amostragem espacial, concentrando-se em zonas de maior complexidade morfodinâmica, como encostas e áreas de urbanização acelerada. A integração de dados de alta resolução obtidos por sensores ativos (como LiDAR), levantamentos com drones e validação por GNSS de precisão pode tornar as análises mais refinadas e adaptadas às condições locais. Além disso, a comparação sistemática entre diferentes *data* e modelos geoidais pode contribuir para consolidar padrões técnicos de referência em aplicações que envolvem obras civis, hidrologia e sistemas de alerta.

Num cenário em que eventos extremos se tornam mais frequentes e o território urbano cresce de forma desigual, a escolha do modelo altimétrico a ser utilizado deixa de ser uma decisão técnica e passa a ser um ato político, com implicações diretas sobre o planejamento, a segurança e a justiça espacial. Mais do que influenciar meras representações e dados técnicos, a acurácia dos modelos geoespaciais impacta diretamente a proteção de vidas, a segurança de moradias e a eficácia das políticas públicas. Nesse contexto, reforça-se a urgência de promover uma convergência entre ciência, gestão e tecnologia, orientada por critérios técnicos rigorosos e por um compromisso ético com os territórios e populações que dependem dessas informações para viver com mais segurança e dignidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente investigação avaliou o desempenho de diferentes MDEs de alta resolução em comparação aos dados altimétricos oficiais do SGB, disponibilizados pelo IBGE, com foco na aplicabilidade desses produtos à realidade da RMVPLN. Com base nos testes realizados, o estudo oferece subsídios técnicos que auxiliam na escolha fundamentada de modelos altimétricos em diferentes aplicações geoespaciais no âmbito da gestão territorial e da formulação de políticas públicas.

Entre os produtos avaliados, Copernicus e ALOS PALSAR mostraram desempenho superior, com alta convergência em relação às altitudes de referência, particularmente em setores marcados por forte variação topográfica. O primeiro demonstrou estabilidade em diferentes faixas altimétricas; o segundo revelou precisão mais acentuada em áreas litorâneas e de relevo suavizado. Em territórios expostos a pressões antrópicas intensas e transformações aceleradas no uso do solo, essas observações ganham estreita relação com as demandas recorrentes enfrentadas por profissionais de meio ambiente, infraestrutura e defesa civil. A qualidade dos resultados obtidos justifica sua adoção em análises aplicadas, como diagnósticos urbanos, delimitação de zonas vulneráveis e formulação de estratégias voltadas à mitigação de riscos geotécnicos e climáticos.

Contudo, para alcançar estimativas ainda mais precisas, recomenda-se que estudos futuros adotem malhas altimétricas com maior densidade e distribuição equilibrada, de modo a representar adequadamente a diversidade morfológica da região. A utilização de modelos com resolução vertical aprimorada, combinada a métodos de interpolação avançados, tende a refinar os resultados em áreas suscetíveis a processos de instabilidade ou que passaram por mudanças recentes na paisagem. Para fortalecer a confiabilidade dos modelos gratuitos, tecnologias como LiDAR e RTK-GNSS devem ser integradas a investigações comparativas e processos de calibração local.

Adicionalmente, a adoção criteriosa de sistemas de referência vertical também se mostra relevante. A correspondência entre *data* como SIRGAS2000 e WGS84, além da aplicação de modelos geoidais compatíveis com o território brasileiro, pode aperfeiçoar análises voltadas à hidrologia, engenharia e prevenção de desastres, contribuindo para interpretações mais ajustadas à realidade física e institucional da RMVPLN.

Num cenário em que eventos extremos se tornam mais frequentes e os territórios urbanos continuam em expansão acelerada, representações altimétricas confiáveis passam a desempenhar papel estratégico. Mais do que fornecer dados técnicos precisos, esses modelos sustentam decisões que impactam diretamente o ordenamento do solo, a segurança das populações e a resiliência das cidades. A seleção fundamentada dos MDEs, associada à formação e habilitação técnica das instituições locais e à validação em campo, favorece práticas mais sensíveis às dinâmicas socioambientais, contribuindo para uma gestão territorial mais justa, integrada e responsável.

USO ÉTICO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA NA PRODUÇÃO ACADÊMICA

A presente publicação contou com o suporte de ferramentas de Inteligência Artificial Generativa, em conformidade com as diretrizes éticas e normativas estabelecidas pelo Programa de Pós-Graduação em Ecodesenvolvimento e Gestão Ambiental da Universidade de Taubaté. Foi empregado o modelo ChatGPT (GPT-4, OpenAI, janeiro de 2025), com a finalidade de aprimorar a coesão, a clareza e a fluidez do texto acadêmico. Ressalta-se que todas as contribuições oriundas da ferramenta foram cuidadosamente revisadas, editadas e validadas pelos autores, assegurando o alinhamento com os princípios do rigor científico e da responsabilidade ética. Os autores assumem integral responsabilidade pela veracidade, precisão e integridade das informações apresentadas neste manuscrito.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão aos Programas de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e em Ecodesenvolvimento e Gestão Ambiental da Universidade de Taubaté (UNITAU) e ao Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas, cujo apoio técnico, institucional e financeiro foi fundamental para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASSIS DIAS, M. C.; SAITO, S. M.; DOS SANTOS ALVALÁ, R. C.; SELUCHI, M. E.; BERNARDES, T.; CAMARINHA, P. I. M.; NOBRE, C. A. Vulnerability index related to populations at-risk for landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). **International journal of disaster risk reduction**, v. 49, p. 101742, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101742>
- ASUERO, A. G.; SAYAGO, A.; GONZÁLEZ, A. G. The correlation coefficient: An overview. **Critical reviews in analytical chemistry**, v. 36, n. 1, p. 41-59, 2006. <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- AZEVÉDO, P. R. M. **Introdução à Estatística**. 3. ed. Natal: EDUFRN, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21298> . Acesso em: 04 de set. 2024.
- BARTELS, R.; GOODHEW, J. The robustness of the Durbin-Watson test. **The Review of Economics and Statistics**, p. 136-139, 1981. <https://doi.org/10.2307/1924228>
- CHANG, K. T.; MERGHADI, A.; YUNUS, A. P.; PHAM, B. T.; DOU, J. Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 12296, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48773-2>
- COPERNICUS. Global and European Digital Elevation Model COP-DEM. **Spacedata Copernicus**. 2024. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/pt/collections/copernicus-digital-elevation-model>. Acesso em: 4 set. 2024.
- CUARTERO, A.; POLO, M. E.; RODRIGUEZ, P. G.; FELICISIMO, A. M.; RUIZ-CUETOS, J. C. The use of spherical statistics to analyze digital elevation models: An example from LiDAR and ASTER GDEM. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 7, p. 1200-1204, 2013. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2288924>
- DAUNT, A. B. P.; GUIMARÃES, S. T. L.; SILVA, T. S. F. Identificação de vetores modificadores da paisagem no litoral norte de São Paulo durante os séculos XX e XXI. **Geografia**, v. 48, n. 1, p. 1-32, 2023. <https://doi.org/10.5016/geografia.v48i1.17376>

DEAN, W. **With broadax and firebrand:** the destruction of the Brazilian Atlantic forest. Berkeley: University of California Press, 1995.

FELUS, Y. A.; BURTCH, R. C. On symmetrical three-dimensional datum conversion. **GPS solutions**, v. 13, p. 65-74, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0100-5>

FERREIRA, W. J.; BATISTA, G. T.; DE CASTRO, C. M.; DEVIDE, A. C. P. Biodiesel de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) em países emergentes: alternativa para o desenvolvimento regional. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 9, n. 1, 2013. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/868>. Acesso em: 12 dez. 2024.

FERREIRA, W. J.; RICHETTO, K. C. S.; ALVALÁ, P. Cloud brightness evaluation from ground-based total sky images using the HSV color space parameter. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, v. 1, n. 7, p. 1-13, 2023. Disponível em <https://ipabhi.org/repositorio/index.php/rca/article/view/99>. Acesso em: 12 de jan. 2025.

FERREIRA, W. J.; GONÇALVES, M. C.; DA SILVA RICHETTO, K. C.; ABDALA, R. D.; DE OLIVEIRA DOMINGUES, S. P.; DOS SANTOS TARGA, M. Modernização museológica, preservação cultural e desenvolvimento sustentável no Vale do Paraíba Paulista. **Aracê**, v. 7, n. 2, p. 6741-6763, 2025. <http://doi.org/10.10.56238/arev7n2-131>

GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; MEYER, D.; DANIELSON, J. Validation of the ASTER global digital elevation model version 2 over the conterminous United States. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, p. 281-286, 2012. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-281-2012>

GROHMAN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 121-133, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.043>

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Basic econometrics**. 5.ed. New York: McGraw-Hill Irwin, 2009.

GUTH, P. L.; VAN NIEKERK, A.; GROHMAN, C. H.; MULLER, J. P.; HAWKER, L.; FLORINSKY, I. V.; STROBL, P. Digital elevation models: Terminology and definitions. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3581, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183581>

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing**, v. 57, n. 5-6, p. 356-370, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00164-8)

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2010. <https://doi.org/10.1080/08120091003677553>

HUANG, Y.; YU, M.; XU, Q.; SAWADA, K.; MORIGUCHI, S.; YASHIMA, A.; XUE, L. InSAR-derived digital elevation models for terrain change analysis of earthquake-triggered flow-like landslides based on ALOS/PALSAR imagery. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 7661-7668, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3939-5>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/normas/16463-especificacao-e-normas-gerais-para-levantamentos-geodesicos-em-territorio-brasileiro.html>. Acesso em: 15 de ago. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Modelo hgeoHNOR2020 para Conversão de Altitudes Geométricas em Altitudes Normais**. 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101841.pdf>. Acesso em: 18 de jul. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. **Censo demográfico 2022**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/apps/pgl/#/mapa/>. Acesso em: 10 de dez. 2024.

JULZARIKA, A.; ADITYA, T.; SUBARYONO, S.; HARINTAKA, H. Vertical accuracy evaluation of digital terrain model (DTM) ALOS PALSAR-2 in Rote Dead Sea area – Indonesia. **Geod List**, v. 75, n.

1, p. 9–28, 2021. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/395403153.pdf> . Acesso em: 28 de fev. 2025.

LI, X.; ZHANG, Y.; JIN, X.; HE, Q.; ZHANG, X. Comparison of digital elevation models and relevant derived attributes. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 046027-046027, 2017. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.046027>

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M. E.; CAMARINHA, P. I.; DOLIF, G.; SPERLING, V. B.; GONCALVES, D. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. **Natural Hazards**, v. 120, n. 8, p. 7997-8024, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06558-5>

MAXWELL, L. K.; DAVID, C. H. The application of the Durbin-Watson test to the dynamic regression model under normal and non-normal errors. **Econometric reviews**, v. 14, n. 4, p. 487-510, 1995. <https://doi.org/10.1080/07474939508800333>

MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; MUKUL, M. Analysis of the accuracy of shuttle radar topography mission (SRTM) height models using international global navigation satellite system service (IGS) network. **Journal of Earth System Science**, v. 124, n. 6, p. 1343-1357, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0597-2>

MURTAGH, F.; HECK, A. **Multivariate data analysis**. Springer Science Business Media, 2012.

OKOLIE, C. J.; MILLS, J. P.; ADELEKE, A. K.; SMIT, J. L.; PEPPA, M. V.; ALTUNEL, A. O.; ARUNGWA, I. D. Assessment of the global Copernicus, NASADEM, ASTER and AW3D digital elevation models in Central and Southern Africa. **Geo-spatial Information Science**, v. 27, n. 4, p. 1362-1390, 2024. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2296010>

PELLETIER, J. D. A spatially distributed model for the long-term suspended sediment discharge and delivery ratio of drainage basins. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 117, n. F2, 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JF002129>

PERZ, S. G. The rural exodus in the context of economic crisis, globalization and reform in Brazil. International **Migration Review**, v. 34, n. 3, p. 842-881, 2000. <https://doi.org/10.1177/019791830003400308>

POLIDORI, L.; EL HAGE, M. Digital elevation model quality assessment methods: A critical review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 3522, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12213522>

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7)

REANI, R. T.; SORIANO, E.; LONDE, L.; TOMÁS, L.; GUILLEN VIANNA, M. L.; SANTOS, L. B. L. Interfaces legais entre planejamento urbano e redução de riscos e desastres. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 76, p. 116–133, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217651879>

REUTER, H. I.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 9, p. 983-1008, 2007. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>

RIZZOLI, P.; MARTONE, M.; GONZALEZ, C.; WECKLICH, C.; TRIDON, D. B.; BRÄUTIGAM, B.; MOREIRA, A.; RIZZOLI, P. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 132, p. 119-139, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>

ROSS, J.; MOROZ, I. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 41-58, 1996. <https://doi.org/10.7154/RDG.1996.0010.0004>

RUTLEDGE, D. N.; BARROS, A. S. Durbin-Watson statistic as a morphological estimator of information content. *Analytica Chimica Acta*, v. 454, n. 2, p. 277-295, 2002.
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)01555-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)01555-0)

SANTOS ALVALÁ, R. C.; DE ASSIS DIAS, M. C.; SAITO, S. M.; STENNER, C.; FRANCO, C.; AMADEU, P.; NOBRE, C. A. Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. International *Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 41, p. 101326, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101326>

SANTOS, A. M. D.; TARGA, M. D. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. *Revista Ambiente Água*, v. 7, p. 195-211, 2012. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.945>

SANTOS, M. *Manual de geografia urbana*. São Paulo: Edusp, 2008.

SILVA, L. G.; CATELANI, C. S.; TARGA, M. S. Analytic hierarchy process (AHP) applied to flood susceptibility in São José dos Campos, São Paulo, Brazil. *Revista Ambiente e Água*, v. 15, n. 7, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2574>

SILVA, J. F. D.; QUEIROGA MIRANDA, R. D.; CANDEIAS, A. L. B. 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. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 3, p. 1543-1555, 2022.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1543-1555>

SILVA, R. C.; MARENKO, J. A.; RUV LEMES, M. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, p. 1-23, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04857-2>

SUZUKI, S.; KANKAKU, Y.; IMAI, H.; OSAWA, Y. Overview of ALOS-2 and ALOS-3. In: Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II. *SPIE*, v.8528, p. 175-182, 2012. <https://doi.org/10.1117/12.979184>

TOUTIN, T. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 7, p. 1855-1875, 2008.
<https://doi.org/10.1080/01431160701408477>

USGS - United States Geological Survey. *Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global*. United States Geological Survey. 2024. <http://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography*, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>

VIEIRA, E. T.; LEMES, M. D. C. R.; DA SILVA, R. C.; FISCH, G.; DOS SANTOS, M. J. Desenvolvimento regional e a intensificação das catástrofes socionaturais: o caso do município de São Sebastião/SP. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 19, n. 3, 2023.
<https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i3.7326>

VILLANOVA, L. B.; TONILO, M. A.; PUGA, B. P. Planejamento urbano e regional para o enfrentamento das mudanças climáticas: estudo de caso na Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 20, n. 1, 2024.
<https://doi.org/10.54399/rbgdr.v20i1.7130>

WATARAI, H.; KATAYAMA, H.; TADONO, T.; KATO, E.; NIWA, T.; SAGISAKA, M. Overview of the Japanese Advanced Optical Satellite: mission objectives, a satellite system, and an onboard imager. In: Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXI. *SPIE*, v. 10423, p. 144-150, 2017.
<https://doi.org/10.1117/12.2277306>

WERNER, M. Shuttle radar topography mission (SRTM) mission overview. *Frequenz*, v. 55, n. 3-4, p. 75-79, 2001. <https://doi.org/10.1515/FREQ.2001.55.3-4.75>

XIONG, L.; LI, S.; TANG, G.; STROBL, J. Geomorphometry and terrain analysis: Data, methods, platforms and applications. *Earth-Science Reviews*, v. 233, p. 104191, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104191>

YANG, L.; MENG, X.; ZHANG, X. SRTM DEM and its application advances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 14, p. 3875-3896, 2011. <https://doi.org/10.1080/01431161003786016>

ZHANG, K.; GANN, D.; ROSS, M.; ROBERTSON, Q.; SARMIENTO, J.; SANTANA, S.; FRITZ, C. Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding. **Remote sensing of Environment**, v. 225, p. 290-306, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.028>

Recebido em: 16/05/2025
Aceito para publicação em: 29/08/2025