

Avaliação Altimétrica do Topodata em Terrenos Complexos com Validação GNSS - RTK (Sistema Global de Navegação por Satélite – Cinemática em Tempo Real)

Altimetric assessment of topodata in complex terrains with GNSS-RTK validation (global navigation satellite system – real-time kinematic)

Tássia Parada Sampaio¹ 
Luciano Martins Tavares² 
Tainara Goulart Corrêa³ 
Larissa Aldrighi da Silva⁴ 
Carolina Moraes de Souza⁵ 
Lucas Simões dos Santos⁶ 
Diuliana Leandro⁷ 
Andréa Souza Castro⁸ 
Adriano Luis Heck Simon⁹ 

Palavras-chave

Análise Estatística
SIG
Precisão Altimétrica
Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

Resumo

Este estudo avalia a precisão altimétrica do Modelo Digital de Elevação (MDE) TOPODATA, derivado do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), por meio de comparação com dados GNSS - RTK em área de elevada variabilidade topográfica. A análise foi conduzida na Cachoeira do Lepa, Município de Canguçu/RN, região caracterizada por acentuadas rupturas altimétricas em curtas distâncias. Foram utilizados 306 pontos georreferenciados e aplicadas análises estatísticas espaciais. Os resultados evidenciaram discrepâncias sistemáticas: com tendência à subestimação das altitudes pelo TOPODATA: altitudes médias 3,15 m (MBE), com erro absoluto médio (MAE) de 3,57 m e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 4,33 m. A autocorrelação espacial foi significativa (Moran's I = 0,771; p < 0,001), reduzindo os graus de liberdade efetivos (Dutilleul: 120,4) e exigindo testes robustos (Brunner-Munzel: p < 0,0001; Cliff's Delta = 0,60). A acurácia variou com a altitude: áreas baixas tiveram MBE de 0,75 m, enquanto áreas altas alcançaram 6,02 m (Kruskal-Wallis: p < 0,0001). A validação cruzada espacial indicou RMSE de 5,18 m (IC95%: 3,68–6,30 m), e a correlação de Spearman foi fraca ($\rho = -0,077$; $p = 0,125$). Conclui-se que o TOPODATA tende a subestimar as elevações, apresentando maiores erros em terrenos mais elevados, o que compromete sua confiabilidade em aplicações microescala. O estudo destaca os riscos metodológicos do uso de MDEs generalizados em áreas morfológicamente complexas e sugere metodologias híbridas com apoio de dados de campo como alternativa. Os achados relacionam-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente no contexto da agricultura de precisão, planejamento urbano sustentável e ação climática.

¹ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. tssiap.sampaio@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. rstchemartins@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. tainaragoulart15@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. larissa.aldrighi@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. carol.moraes.de.souza.a@gmail.com

⁶ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. luca98simoes@gmail.com

⁷ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. diuliana.leandro@gmail.com

⁸ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. andreascastro@gmail.com

⁹ Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS, Brasil. adriano.simon@ufpel.edu.br

Keywords

Statistical Analysis
GIS
Altimetric accuracy
Digital Elevation Models (DEMs)

Abstract

This study evaluates the altimetric accuracy of the TOPODATA Digital Elevation Model (DEM), derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), through comparison with GNSS-RTK data in an area of high topographic variability. The analysis was conducted in Cachoeira do Lepa, located in the municipality of Canguçu, Rio Grande do Sul (Brazil), a region characterized by pronounced altimetric breaks over short distances. A total of 306 georeferenced points were used, and spatial statistical analyses were applied. The results revealed systematic discrepancies, with a tendency of the TOPODATA to underestimate elevations, showing a mean bias error (MBE) of 3.15 m, mean absolute error (MAE) of 3.57 m, and root mean square error (RMSE) of 4.33 m. Spatial autocorrelation was significant (Moran's I = 0.771; $p < 0.001$), reducing the effective degrees of freedom (Dutilleul: 120.4) and requiring robust tests (Brunner–Munzel: $p < 0.0001$; Cliff's Delta = 0.60). Accuracy varied with elevation: low-lying areas presented an MBE of 0.75 m, while higher terrains reached 6.02 m (Kruskal–Wallis: $p < 0.0001$). Spatial cross-validation indicated an RMSE of 5.18 m (95% CI: 3.68–6.30 m), and Spearman's correlation was weak ($\rho = -0.077$; $p = 0.125$). It is concluded that TOPODATA tends to underestimate elevations, with larger errors in higher terrains, limiting its reliability for micro-scale applications. The study highlights the methodological risks of using generalized DEMs in morphologically complex regions and suggests hybrid approaches supported by field data as an alternative. The findings align with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in the context of precision agriculture, sustainable urban planning, and climate action.

INTRODUÇÃO

A representação precisa da superfície terrestre por meio de Modelos Digitais de Elevação (DEM) é essencial para geotecnologias, planejamento ambiental e modelagens hidrológicas e geomorfológicas. Essas ferramentas revolucionaram as geociências ao possibilitar representações tridimensionais que ampliam a compreensão de processos físicos e subsidiam a gestão territorial. Sua aplicação abrange ainda planejamento de voos 3D, navegação, direção autônoma, agricultura de precisão, manejo florestal e modelagem hídrica, todas demandando dados tridimensionais de alta acurácia (Cao *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

A geração de Modelos Digitais de Elevação (DEM) a partir de imagens únicas apresenta limitações técnicas e metodológicas, agravadas em áreas urbanas e montanhosas, onde a acurácia altimétrica depende da resolução espacial e é comprometida por relevo íngreme ou vegetação densa (Panagiotou *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2024; Kramm; Hoffmeister, 2022; Li *et al.*, 2023; Zhu; Chen, 2024). Além disso, restrições de auto-semelhança e custos (Yin *et al.*, 2021) impulsionam pesquisas em alternativas metodológicas, como interpolação (Polidori; El Hage, 2020), uso de UAVs em levantamentos multiespectrais (Csajbók *et al.*, 2022) e pontos de controle em solo (Akturk; Altunel, 2019).

Entre os avanços recentes destacam-se o NASA Ames Stereo Pipeline (Shean *et al.*, 2016), técnicas de aprendizado de máquina (Yang *et al.*, 2024), redes neurais adversariais para super-resolução (Zhang; Yu, 2022) e a Rede GADEM, capaz de gerar DEMs de alta qualidade a partir de imagens de satélite (Yang *et al.*, 2024). Ferramentas acessíveis, como o Google Earth Pro, também têm sido exploradas, embora ainda demandem validação em diferentes contextos ambientais (George; Mohan, 2024).

Diversas bases de dados gratuitas de Modelos Digitais de Elevação (DEM) são amplamente utilizadas na comunidade científica, como destacam Pakoksung e Takagi (2021), entre elas GSI-DEM, ASTER Global DEM, SRTM, GMTED2010, HydroSHEDS e GTOPO30.

No contexto brasileiro, o TOPODATA, desenvolvido por Valeriano (2008) no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), consiste em um refinamento dos dados originais do SRTM (resolução de aproximadamente 90 m e acurácia vertical absoluta de 6,2 m) por meio de técnicas de krigagem, resultando em um modelo digital de elevação com resolução nominal de 30 m (1 segundo de arco).

Amplamente reconhecido como uma das bases altimétricas de uso livre mais precisas em escala regional (Bielski *et al.*, 2024), o TOPODATA apresenta erro quadrático médio vertical (RMSE) em torno de 6 m, valor compatível com estudos prévios (Valeriano, 2011; Morais, 2017; Muñoz; Valeriano, 2011).

Contudo, a intensificação das intervenções antrópicas sobre o relevo reforça a necessidade de modelos digitais de elevação mais atualizados e detalhados, sobretudo em áreas urbanas, onde a complexidade topográfica é mais acentuada (Delchiaro *et al.*, 2025).

No contexto da resolução espacial de Modelos Digitais de Elevação (DEM) gratuitos amplamente utilizados, destaca-se que a resolução típica desses DEMs globais, como SRTM e ASTER, é em torno de 30 metros, adequada para aplicações regionais e continentais. Já o TOPODATA, base de dados muito empregada no Brasil, é um derivado do SRTM que passou por um refinamento específico utilizando técnicas de krigagem geoestatística para melhorar a precisão em escala regional (Moura-Bueno *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2022; Valeriano, 2005).

Concomitantemente, diversas bases de dados gratuitos de DEM são amplamente utilizados na comunidade científica, como destaca Pakoksung e Takagi (2021), incluindo GSI-DEM, ASTER Global DEM, SRTM, GMTED2010, HydroSHEDS e GTOPO30. No Brasil, destaca-se o TOPODATA, desenvolvido a partir do SRTM com refino via krigagem, e frequentemente apontado como uma das bases mais precisas de uso livre em escalas regionais (Bielski *et al.*, 2024).

A acurácia de modelos digitais de elevação (MDEs) depende fortemente do tipo de terreno e da escala de aplicação, sendo limitada em áreas de alta variabilidade altimétrica, como escarpas, encostas íngremes e vales encaixados, onde modelos de resolução moderada, como o TOPODATA, com resolução espacial de 30m, podem não representar feições críticas do relevo (Kramm; Hoffmeister, 2019; Ferreira *et al.*, 2023). Neste contexto, o presente estudo realiza uma análise comparativa entre dados obtidos através da metodologia de posicionamento espacial por satélites artificiais pela técnica RTK e dados oriundos de sensoriamento remoto TOPODATA, avaliando discrepâncias altimétricas em diferentes classes de elevação. O objetivo é evidenciar os riscos metodológicos de utilizar modelos generalizados em escalas locais, especialmente em cenários morfológicamente complexos, e discutir suas implicações para modelagem ambiental, planejamento territorial e aplicações de alta

precisão. A pesquisa aborda a subestimação sistemática da altimetria em microescala por modelos derivados de radar e reforça a necessidade de metodologias híbridas que integrem dados remotos e medições de campo, contribuindo para aplicações alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, como agricultura de precisão (ODS 2), cidades sustentáveis (ODS 11) e ação climática (ODS 13).

METODOLOGIA

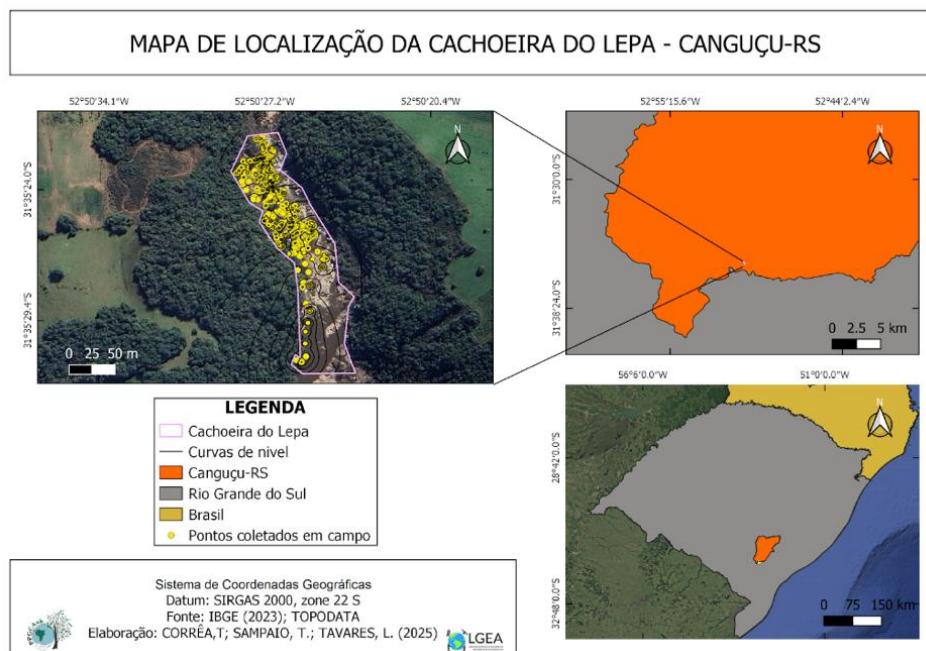
Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no município de Canguçu, localizado na região Sudeste Rio-grandense, inserido na microrregião e região imediata de Pelotas (RS). O município abrange

3.526,316 km² e apresenta relevo variado, com planícies, colinas e morros sobre o Escudo Sul-Rio-Grandense (IBGE, 2025). O substrato é composto por rochas graníticas e metagraníticas do Batólito Pelotas, com Neossolos, Argissolos e Luvissolos. A área apresenta densa rede de drenagem e predomínio de campos nativos e vegetação arbórea, intercalados com áreas agrícolas e silvicultura (Dutra, 2021).

A localidade conhecida como Cachoeira do Lepa, de relevância geomorfológica e ambiental, foi escolhida pela variabilidade altimétrica e formações naturais que afetam a precisão dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) (Figura 1). A região permite comparar MDEs oriundos do RTK e TOPODATA, avaliando discrepâncias e validando estatisticamente os modelos. A integração de dados de campo e sensoriamento remoto possibilita análise robusta das limitações e potencialidades na modelagem da superfície terrestre.

Figura 1 - Mapa de localização da Cachoeira do Lepa



Fonte: Os autores, 2025.

Métodos de coleta

Coleta de dados altimétricos e geração de Modelo Digital de Elevação

Para a realização deste estudo, inicialmente foi determinado o posicionamento geodésico do ponto utilizado como estação Base, por meio do método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Esse procedimento foi realizado a partir dos dados coletados em campo no formato “Rinex”, posteriormente submetidos ao pós-processamento, garantindo a definição de

coordenadas absolutas com alta precisão. A estação Base foi instalada em local estrategicamente selecionado, afastado de potenciais interferências, como vegetação densa ou barreiras físicas, de modo a assegurar a recepção adequada dos sinais orbitais.

Com as coordenadas da Base definidas pelo PPP, procedeu-se à etapa de levantamento em tempo real utilizando a técnica GNSS - RTK. Para isso, foram empregados dois receptores GNSS configurados para comunicação via rádio UHF (*Ultra High Frequency*), permitindo o envio contínuo de correções diferenciais da Base

para o receptor Rover. Os equipamentos utilizados operam em múltiplas frequências (L1 e L2), o que proporciona precisão centimétrica ao posicionamento (Henkel; Gunther, 2008; Mongredien *et al.*, 2016).

Essa elevada precisão relativa é assegurada pela aplicação do Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK), que utiliza observações simultâneas da fase da portadora e realiza diferenciação dupla em tempo real, corrigindo os erros sistemáticos comuns aos dois receptores (Shin *et al.*, 2024). Dessa forma, a definição acurada das coordenadas geodésicas do ponto Base é uma etapa essencial, pois garante a confiabilidade das correções diferenciais transmitidas ao receptor Rover e, consequentemente, a qualidade e robustez das informações geoespaciais produzidas no levantamento.

O receptor Rover foi configurado para coletar dados em intervalos de 0 a 5 segundos, conforme condições de sinal e movimentação do operador, registrando coordenadas de pontos de interesse por caminhamento para mapear o perfil topográfico da Cachoeira do Lepa. A amostragem, densa e precisa, seguiu a altimetria longitudinal e transversal do curso d'água, destacando feições da superfície terrestre. A metodologia usou Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real (RTK), garantindo alta precisão geodésica.

Plataformas de sensoriamento remoto selecionadas

Para a comparação dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), foram utilizadas imagens

raster disponibilizadas no mapa interativo do projeto TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, identificando-se que a área de estudo corresponde à cena 31S54. O processamento foi realizado no software QGIS 3.40.2 (QGIS Development Team, 2025), onde a área foi recortada com base no shapefile da Cachoeira do Lepa, adotando-se o sistema de referência SIRGAS 2000/UTM zona 22S. Em seguida, aplicou-se renderização específica ao raster recortado, isto é, uma forma de representação visual que associa cores aos valores de altitude, possibilitando a identificação das altitudes máximas e mínimas da área.

Etapas de processamento dos dados para a análise estatística

A análise estatística realizada neste estudo teve como objetivo principal comparar a precisão e a exatidão das elevações obtidas pelos métodos GNSS - RTK e TOPODATA. Para alcançar esse objetivo, foram seguidas diversas etapas. Inicialmente, os dados de elevação provenientes do método GNSS - RTK, coletados na Cachoeira do Lepa, em Canguçu/RS, no dia 12/12/2024, juntamente com os obtidos no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, foram organizados em um banco de dados (arquivo xls). Posteriormente, esses dados passaram por um processo de limpeza e padronização para garantir a qualidade da análise. As coordenadas de cada ponto (Norte e Leste) foram registradas em UTM (*Universal Transverse Mercator*), em metros, (WGS 84 - UTM 22S), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Localização dos dados obtidos

Pontos	Coord. Norte (m)	Coord. Leste (m)	Altitude (m)	HRMS (m)	VRMS (m)	LatRMS (m)	LonRMS (m)	Estado
base	6503468,240	325377,280	110,368	0,001	0,003	0,001	0,001	FIXED
1	6503470,377	325382,114	108,665	0,002	0,003	0,001	0,001	FIXED
2	6503469,613	325379,613	109,495	0,001	0,003	0,001	0,001	FIXED
3	6503465,395	325373,490	109,985	0,003	0,004	0,002	0,002	FIXED
4	6503464,215	325369,812	109,841	0,002	0,004	0,001	0,002	FIXED
5	6503458,794	325372,896	109,492	0,001	0,003	0,001	0,001	FIXED
...
305	6503318,323	325379,411	104,588	0,004	0,007	0,003	0,003	FIXED
306	6503320,603	325374,020	105,900	0,007	0,014	0,005	0,005	FIXED

Fonte: Os autores, 2025.

Legenda dos parâmetros de precisão:

HRMS (Horizontal Root Mean Square): Desvio padrão horizontal bidirecional (componentes X e Y);

VRMS (Vertical Root Mean Square): Desvio padrão vertical (componente Z);

LatRMS: Desvio padrão na componente de latitude (Norte-Sul / eixo Y);

LonRMS: Desvio padrão na componente de longitude (Leste-Oeste / eixo X);

Estado: Qualidade da solução RTK (FIXED = melhor precisão).

Foi realizada uma análise exploratória dos dados, examinando a variação do Erro Médio Quadrático (RMSE) bidimensional e tridimensional, com o objetivo de identificar possíveis inconsistências e avaliar a distribuição

espacial dos pontos amostrais. A partir dessa avaliação, foi possível obter uma visão integrada da qualidade posicional do levantamento e da organização geográfica das amostras no terreno. Além disso, outliers espaciais foram detectados com base em critérios estatísticos aplicados aos resíduos, permitindo a identificação de pontos cujo comportamento se desviava significativamente do padrão observado na vizinhança local. Outliers espaciais foram detectados por critérios estatísticos aplicados aos resíduos, identificando pontos com comportamento anômalo em relação à vizinhança local.

Para analisar a autocorrelação espacial, considerando a natureza geográfica dos dados, aplicou-se o teste de Moran (Anselin, 1995) nos resíduos, verificando a presença de dependência espacial. Além disso, o Índice de Moran foi calculado nas diferenças altimétricas

“(data[‘Diferenca’])” para quantificar a autocorrelação espacial geral presente no erro. Subsequentemente, a análise do semivariograma dos “resíduos sem tendência” foi empregada para investigar a estrutura espacial remanescente após a remoção de uma tendência espacial modelada, oferecendo uma abordagem robusta para compreender a natureza intrínseca do erro. Em resumo, os “resíduos” representam a parcela do erro não explicada por uma tendência espacial de grande escala, permitindo uma análise detalhada das discrepâncias altimétricas entre os dados do projeto TOPODATA e os dados de campo obtidos por GNSS - RTK.

Com o objetivo de ajustar os testes estatísticos na presença de autocorrelação espacial, utilizou-se o método de Dutilleul (1993), que corrige os graus de liberdade efetivos, considerando a dependência espacial dos dados. A avaliação da precisão altimétrica foi realizada por meio das seguintes métricas:

Mean Bias Error (MBE) para quantificação do viés sistemático.

Mean Absolute Error (MAE) para erro absoluto médio.

Root Mean Square Error (RMSE) para erro quadrático médio.

Coeficiente de correlação de Spearman para associação monotônica.

A normalidade dos resíduos foi testada utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov com a correção de Lilliefors, enquanto a homocedasticidade, utilizada para verificar se o erro dos resíduos tem variância constante ao longo das observações, foi avaliada pelo teste de Levene, com os dados estratificados em grupos de elevação (baixa, média e alta).

Esse processo estruturado permitiu uma análise abrangente e estatisticamente robusta das discrepâncias altimétricas, considerando tanto a dependência espacial quanto às propriedades estatísticas dos resíduos.

Análise Estratificada por Elevação

Os dados foram estratificados em três grupos de elevação de igual tamanho ($n=102$ cada) para investigar variações na precisão altimétrica em

função do relevo. A comparação entre grupos foi realizada através do teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Rahrig, 2024), seguido de testes *post-hoc* de Mann-Whitney com correção de Bonferroni para múltiplas comparações.

O tamanho do efeito foi quantificado através do Delta de Cliff (Cliff, 1993), que fornece uma medida robusta da magnitude das diferenças entre grupos ordinais.

Validação Cruzada Espacial

A robustez dos resultados foi avaliada por validação cruzada espacial, considerando a autocorrelação dos dados, conforme Roberts *et al.* (2017). A técnica *leave-one-out* foi usada para analisar a influência individual dos pontos amostrais.

Análise de Incerteza

A incerteza foi quantificada por *bootstrap* espacial com 1.000 iterações, calculando médias e desvios padrão com intervalos de confiança de 95%. Simulação Monte Carlo (10.000 iterações) gerando intervalos de confiança para a média. Incertezas expandidas calculadas com fatores de cobertura para 90%, 95% e 99% com base na incerteza padrão.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Espacial

Análise Inferida por RTK

A metodologia GNSS - RTK aplicada para aquisição de coordenadas altimétricas proporcionou alta precisão, resultando em um detalhamento topográfico confiável da área de estudo. A geração do modelo altimétrico detalhado foi viabilizada pela metodologia GNSS, que, ao aplicar a técnica RTK, permite a obtenção rápida de coordenadas de pontos de interesse com precisão centimétrica. Foram coletados 306 pontos altimétricos através de equipamento GNSS - RTK, sendo uma prévia deles demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Altimetria dos pontos coletados na Cachoeira do Lepa através de GNSS - RTK

Pontos	Elevação em metros (GNSS - RTK)
Base	109.74
1	108.037
2	108.867
3	109.357
4	109.213
...	...
305	103.96
306	105.272

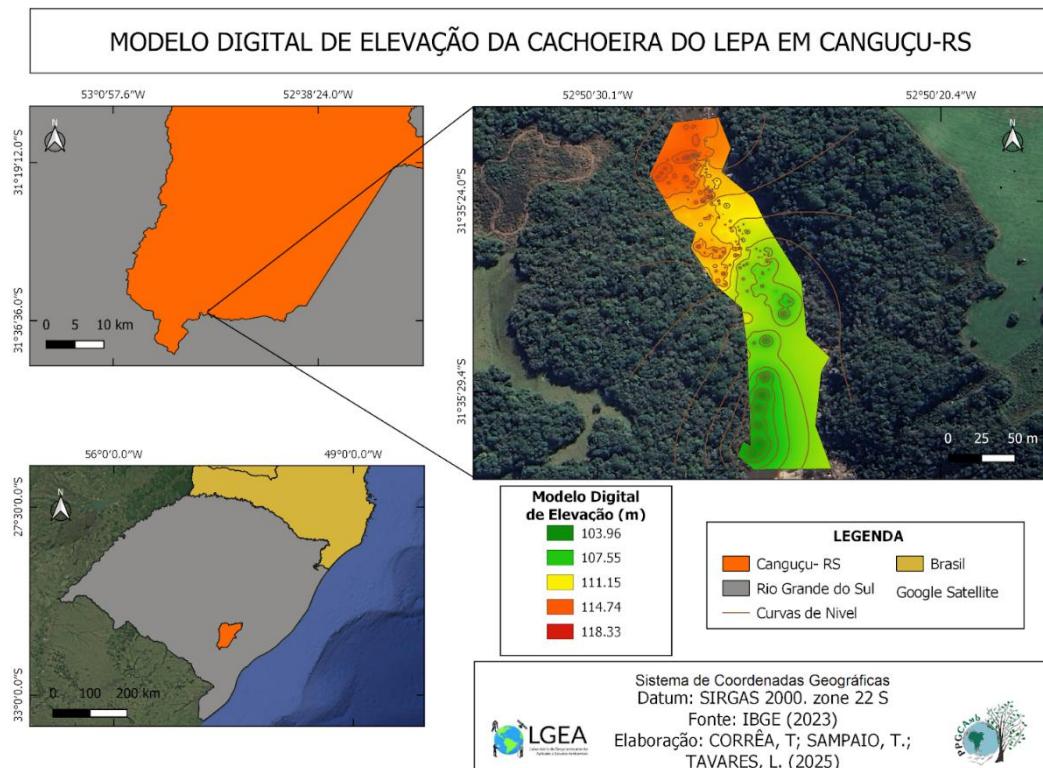
Pontos	Elevação em metros (GNSS - RTK)
Base	109.74
1	108.037
2	108.867
3	109.357
4	109.213
...	...
305	103.96
306	105.272

Fonte: Os autores, 2025.

Com base nos dados altimétricos obtidos em campo, foi gerado o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo (Figura 2). A análise dos dados evidenciou uma elevação mínima de 103,96 m e uma elevação máxima de 118,33 m.

Dessa forma, a variação altimétrica da Cachoeira do Lepa, determinada por meio do levantamento com GNSS - RTK, resultou em um desnível de 14,37 m.

Figura 2 - Mapa do modelo digital de elevação da área de estudo, obtido por meio do GNSS - RTK



Fonte: Os autores, 2025.

Análise inferencial por Sensoriamento Remoto

Com as coordenadas planimétricas previamente determinadas em campo por meio do GNSS-RTK, foi possível extraír, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), os valores altimétricos correspondentes aos mesmos

pontos. Esse procedimento permitiu a realização de uma análise estatística comparativa entre os diferentes métodos de obtenção dos MDEs, visando avaliar sua acurácia altimétrica e a consistência entre as superfícies geradas.

As altitudes obtidas a partir das imagens TOPODATA, apresentadas na Tabela 3, resultaram nos seguintes valores:

Tabela 3 - Altimetria dos pontos coletados da Cachoeira do Lepa através do TOPODATA

Pontos	Elevação em metros (TOPODATA)
base	106.545
1	106.545
2	106.545
3	106.545
4	106.924
...	...
305	95.839
306	95.839

base	106.545
1	106.545
2	106.545
3	106.545
4	106.924
...	...
305	95.839
306	95.839

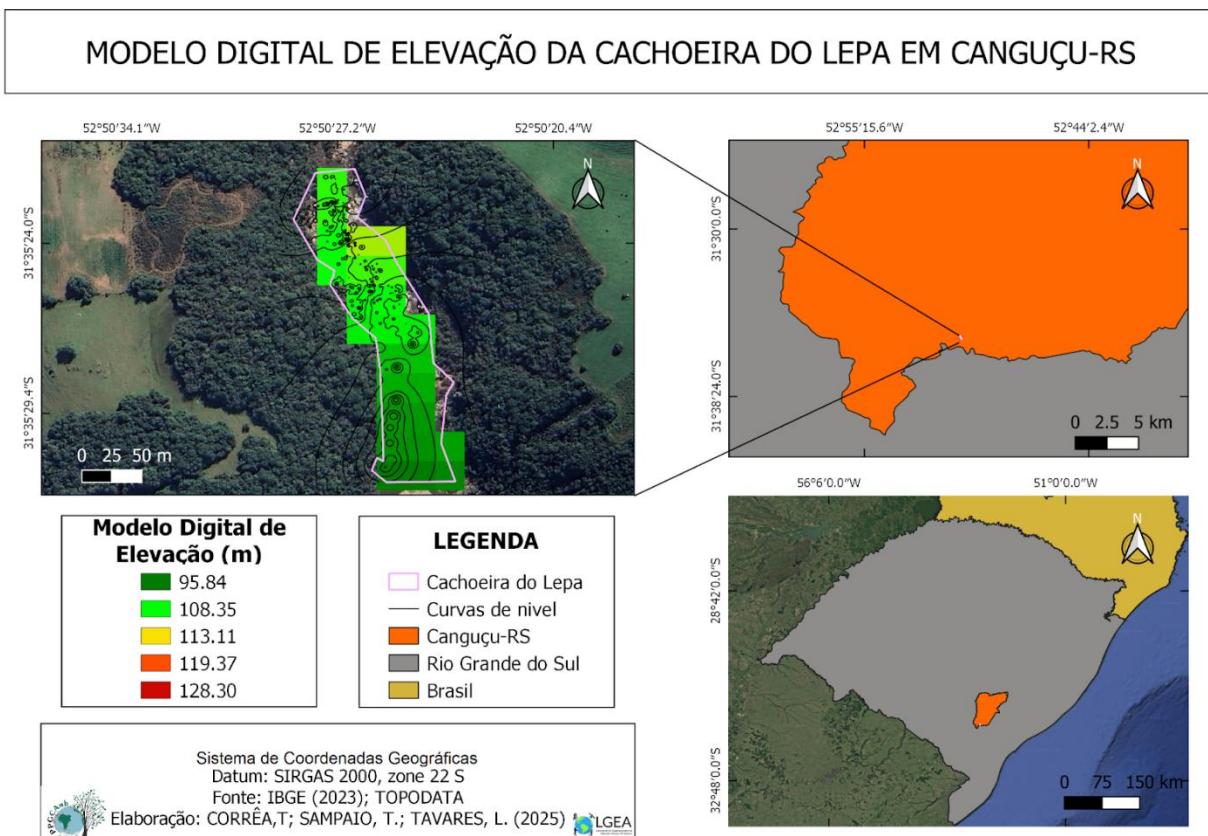
Fonte: Os autores, 2025.

O conjunto de dados TOPODATA, desenvolvido pelo INPE por meio da reamostragem dos dados SRTM com o método de krigagem, gerou um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros. Embora eficiente em escala regional, essa resolução limita análises detalhadas em áreas pequenas. Na área estudada, foram identificadas elevações entre 95,84 m e 128,30 m, com desnível de 32,46 m (figura 3), evidenciando variações altimétricas que

impactam a precisão da representação do relevo.

Ressalta-se que as altitudes em torno de 113,11 metros representam pontos específicos da área, cuja frequência relativa é estatisticamente pouco expressiva frente à totalidade do território analisado. Essa distribuição altimétrica heterogênea reforça as limitações do modelo em capturar nuances topográficas locais, especialmente em estudos que demandam maior acurácia espacial.

Figura 3 - Mapa do modelo digital de elevação da área de estudo, obtido por meio do TOPODATA



Fonte: Os autores, 2025.

Análise Estatística

A análise estatística desempenha papel fundamental na interpretação de dados georreferenciados, permitindo identificar padrões espaciais, discrepâncias e correlações entre variáveis de interesse. No presente estudo, foram analisadas 306 observações, organizadas em colunas correspondentes: Ponto, Norte, Leste, Método GNSS-RTK e Método TOPODATA 30m. Essas variáveis fornecem uma base robusta para avaliar a precisão e a consistência das medições de elevação obtidas em campo (via GNSS - RTK) e por sensoriamento remoto (dados TOPODATA).

As análises foram realizadas em *Python*, na IDE (ambiente de desenvolvimento) *Pycharm Community Edition 2024.1.3* (versão gratuita) ([JetBrains, 2025](#)), utilizando bibliotecas distintas, como: Pandas para manipulação de

dados, *NumPy* para cálculos numéricos e *SciPy* para testes estatísticos, incluindo normalidade, comparações entre medições e intervalos de confiança, entre outras.

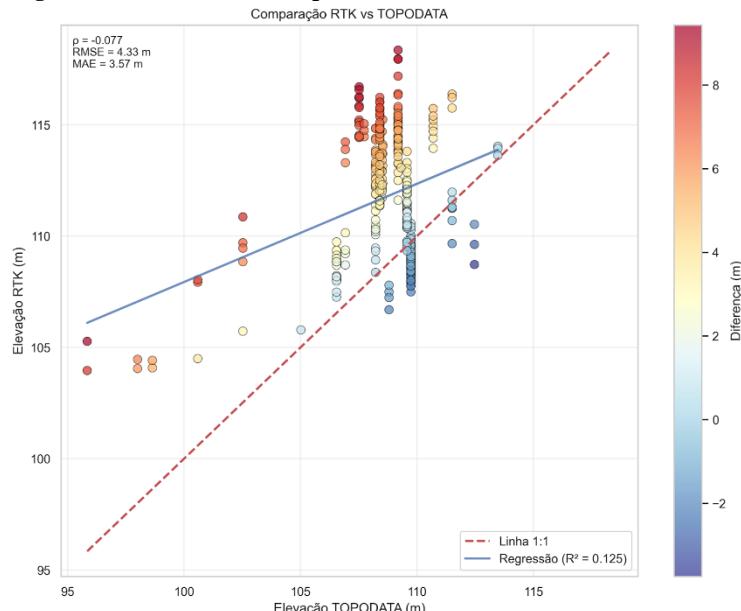
Dados Gerais:

Total de observações: 306.

Colunas: Ponto, Norte, Leste, Método GNSS-RTK e Método TOPODATA 30m.

A análise comparativa entre os dados GNSS - RTK e TOPODATA revelou diferenças sistemáticas significativas. A diferença média (MBE) foi de $3,15 \pm 2,98$ m, indicando tendência de subestimação do TOPODATA em relação às elevações em relação obtidas com o método GNSS - RTK. A Figura 4 apresenta o gráfico de dispersão entre os dois conjuntos de dados, evidenciando a baixa correlação linear entre os métodos.

Figura 4 - Gráfico de Dispersão: GNSS - RTK e TOPODATA



Fonte: Os autores, 2025.

As tabelas 4, 5 demonstram alguns dos valores resultantes da análise estatística realizada:

Tabela 4 - Resultados das Métricas de Comparação (GNSS - RTK vs TOPODATA)

Outras Métricas	Valor
Correlação de Spearman (GNSS - RTK vs TOPODATA)	-0,0770
Erro Médio Absoluto (MAE)	3,57 metros
Erro Médio Quadrático (RMSE)	4,33 metros

Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 5 - Estatísticas Descritivas: GNSS - RTK vs TOPODATA

Estatísticas	GNSS - RTK (metros)	TOPODATA (metros)
Contagem (n)	306	306
Média	111.717	108.567
Desvio Padrão (DP)	2.874	2.307
Mínimo	103.960	95.840
1º Quartil (25%)	109.344	108.222
Mediana (50%)	111.890	109.188
3º Quartil (75%)	114.192	109.698
Máximo	118.357	113.474

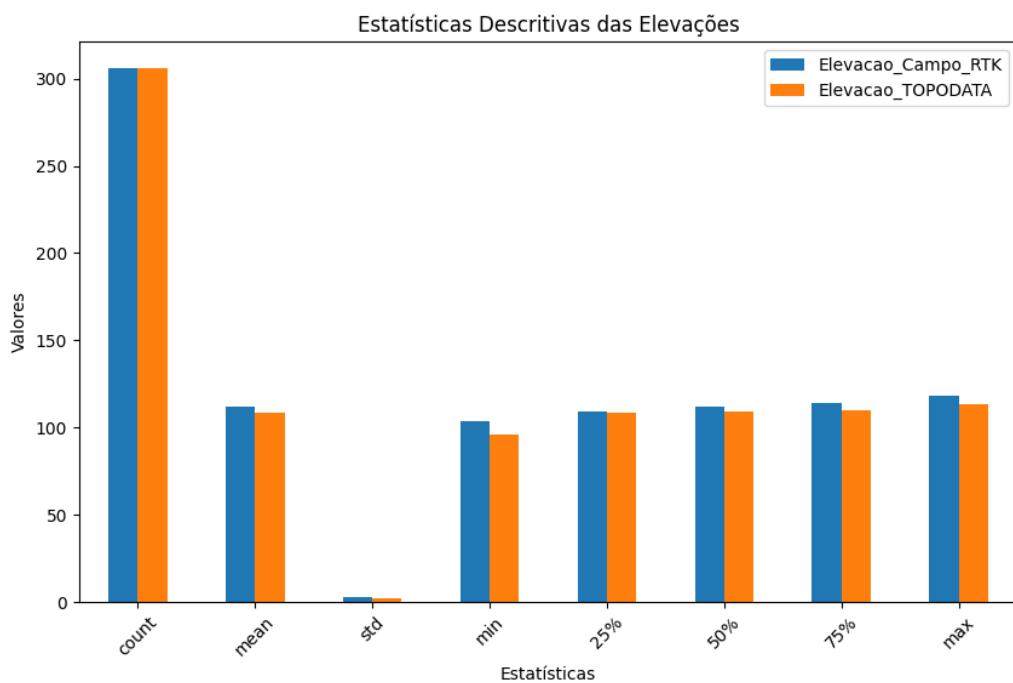
Fonte: Os autores, 2025.

A análise da Figura 4 e do Quadro 1 mostra uma correlação praticamente nula (Spearman $\rho = -0,077$) entre as elevações do GNSS - RTK e do TOPODATA, indicando ausência de relação monotônica clara. O baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,125$) da regressão linear confirma a fraca capacidade do TOPODATA em prever elevações comparando com a metodologia GNSS - RTK. Erros médios ($MAE = 3,57$ m; $RMSE = 4,33$ m) revelam discrepâncias significativas. A coloração dos pontos indica subestimação sistemática do TOPODATA, com dispersão assimétrica acima da linha 1:1,

especialmente entre 108-112 metros, sugerindo limitações do TOPODATA em áreas de baixa variação altimétrica, exigindo cautela em aplicações de alta precisão.

Na Figura 5, a comparação das estatísticas descritivas evidencia médias semelhantes entre os conjuntos, embora o GNSS - RTK apresenta desvio padrão mais elevado, indicando maior sensibilidade a variações locais. O modelo TOPODATA, por sua vez, tende a suavizar a topografia, reduzindo a amplitude das elevações e a capacidade de representar feições topográficas detalhadas.

Figura 5 - Estatística Descritiva: RTK vs TOPODATA



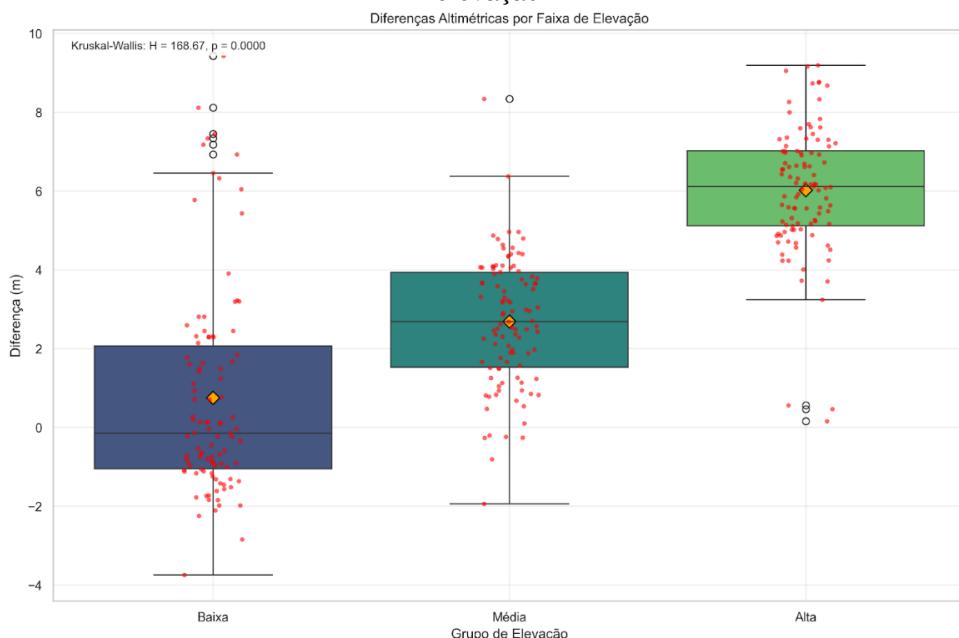
Fonte: Os autores, 2025.

A análise das diferenças altimétricas em classes de elevação (Figura 6) revelou aumento progressivo da discrepância entre os métodos com a altitude, caracterizando subestimação crescente do TOPODATA nas cotas mais elevadas. O teste de Kruskal-Wallis confirmou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ($H = 168,67; p < 0,0001$), indicando que a magnitude do erro varia conforme a classe altimétrica. Na faixa de baixa elevação, as diferenças foram próximas de zero, com

distribuição relativamente simétrica, enquanto nas faixas média e alta observou-se viés positivo acentuado, refletindo uma subestimação sistemática por parte do modelo altimétrico do TOPODATA.

Esses resultados destacam a importância de considerar a dependência altimétrica ao avaliar a acurácia de modelos digitais de elevação em áreas com variações topográficas mais acentuadas.

Figura 6 - Análise das diferenças altimétricas entre os dados GNSS - RTK e TOPODATA por faixa de elevação

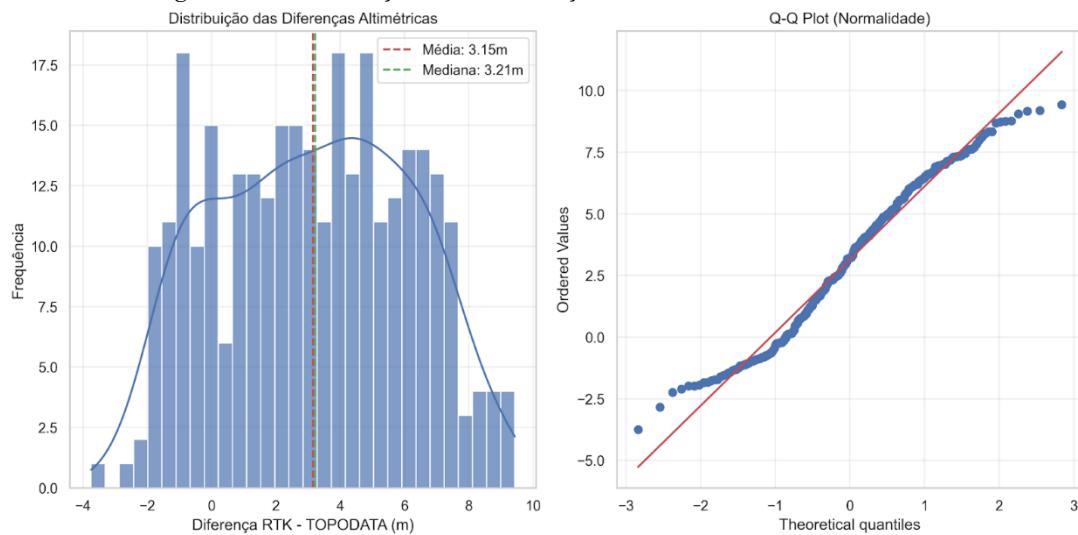


Fonte: Os autores, 2025.

A distribuição das diferenças altimétricas entre os dados obtidos por GNSS - RTK e o modelo TOPODATA é apresentada na figura 7. O histograma com curva de densidade (à esquerda) revela que as discrepâncias se concentram majoritariamente em torno de uma média de 3,15m e mediana de 3,21m, evidenciando uma distribuição aproximadamente simétrica, porém com leve assimetria negativa. Apesar da proximidade entre média e mediana, a presença de valores extremos indica uma tendência à leptocurtose.

O gráfico Q-Q Plot (à direita) confirma essa observação ao demonstrar que, embora a maior parte dos valores siga a distribuição normal esperada, há desvios significativos nas caudas da distribuição. Tais desvios sugerem a presença de outliers e violação da suposição de normalidade, o que justifica a adoção de testes estatísticos não paramétricos em análises subsequentes. Esses resultados reforçam que, embora a distribuição das diferenças altimétricas seja relativamente centrada, não pode ser considerada rigorosamente normal.

Figura 7- Distribuição das diferenças altimétricas e normalidade

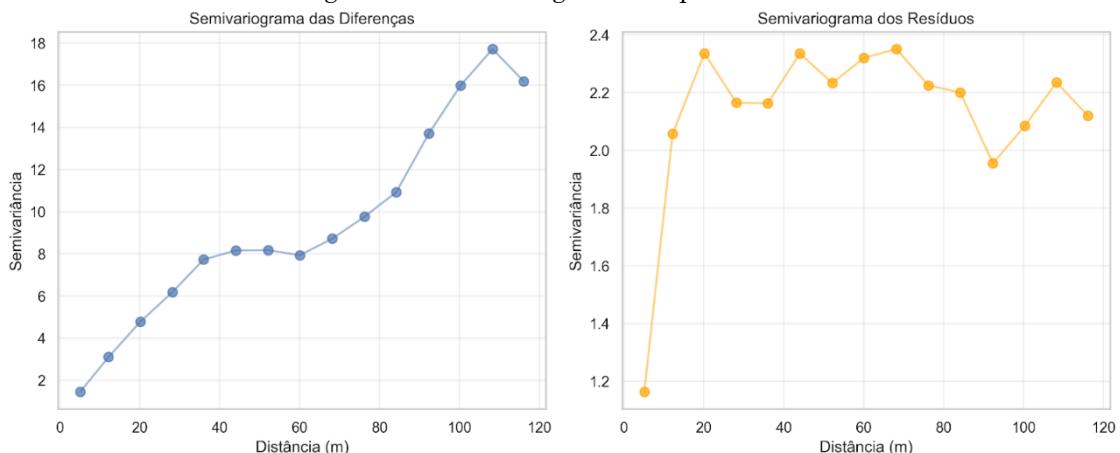


Fonte: Os autores, 2025.

A análise da estrutura espacial das diferenças altimétricas foi realizada por meio de semivariogramas experimentais (Figura 8). O semivariograma das diferenças (lado esquerdo da Figura 8) revelou aumento da semivariância com a distância, indicando dependência espacial positiva. Já o semivariograma dos resíduos (à

direita) apresentou comportamento estacionário, sugerindo ausência de autocorrelação espacial significativa, ou seja, as variações remanescentes são aleatórias, e os principais padrões espaciais foram capturados pelo modelo.

Figura 8 - Semivariogramas experimentais

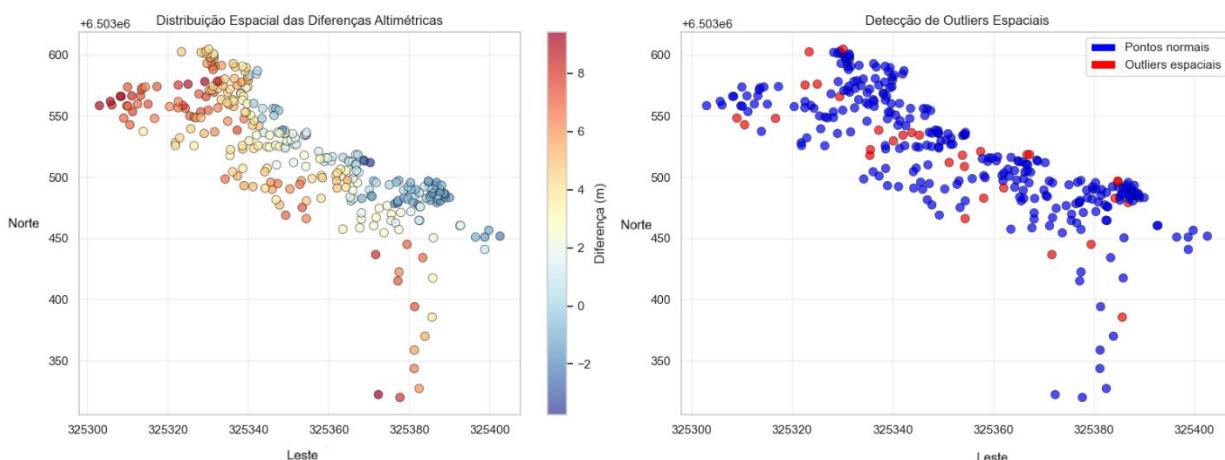


Fonte: Os autores, 2025.

Pela figura 9, que apresenta a distribuição espacial das diferenças altimétricas entre os dados RTK e o modelo TOPODATA (à esquerda), bem como a detecção de *outliers* espaciais (à direita), observa-se uma clara estrutura espacial nas discrepâncias, com agrupamentos de valores

mais elevados concentrados em regiões específicas, especialmente na porção sudoeste da área de estudo. Por outro lado, áreas com diferenças menores ou negativas localizam-se predominantemente na parte nordeste do domínio espacial.

Figura 9 - Distribuição espacial das diferenças altimétricas entre os dados



Fonte: Os autores, 2025.

A análise de *outliers* espaciais revela que os erros não se distribuem de maneira aleatória, mas ocorrem preferencialmente em zonas de transição ou de maior variabilidade local, indicando a presença de inconsistências pontuais acentuadas.

Os resultados evidenciaram discrepâncias altimétricas sistemáticas entre o modelo TOPODATA e dados GNSS - RTK, com subestimação mais pronunciada em áreas elevadas. Esse comportamento, amplamente relatado na literatura, está relacionado à baixa resolução espacial limitada dos MDEs derivados de radar, que tendem a suavizar feições abruptas e reduzir a acurácia em terrenos complexos (Chang; Tsai, 1991). Esse efeito pode afetar simulações hidrológicas, embora os impactos variem: alguns estudos apontam subestimação de picos de vazão em modelos de alta resolução (Goldstein *et al.*, 2016), enquanto outros observaram estabilidade no balanço hídrico, exceto em resoluções muito grosseiras (Bormann, 2006).

No presente estudo, os erros médios ($MBE = 3,15$ m; $RMSE = 4,33$ m) corroboram tais limitações, reforçando que modelos de resolução moderada são inadequados para análises em microescala. Esses achados, análogos aos de pesquisas internacionais, ressaltam os riscos do uso indiscriminado de DEMs derivados de radar em terrenos complexos e apontam a necessidade de calibração, correções sistemáticas ou adoção de modelos híbridos.

CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou que o uso do modelo TOPODATA em análises de microescala, como na área investigada, gera erros sistemáticos e espacialmente correlacionados que ultrapassam simples imprecisões altimétricas pontuais. Os resultados apontam para um viés consistente de subestimação ($MBE = 3,15$ m), o qual se acentua em regiões de maior altitude, revelando dependência altimétrica do erro. Mais relevante que a magnitude do erro absoluto ($RMSE = 4,33$ m) é a ausência prática de correlação (ρ de Spearman $\approx -0,08$) entre as altitudes do TOPODATA e do GNSS - RTK, indicando que o modelo não consegue reproduzir de forma fidedigna a variabilidade e a estrutura do relevo. Essa limitação é reforçada pela excessiva suavização do terreno, decorrente de sua resolução espacial de 30 m, que elimina feições que promovem a homogeneização da superfície topográfica e elimina feições críticas do relevo local.

Tais restrições colocam em dúvida a aplicabilidade do TOPODATA em finalidades que demandam alta precisão geométrica ou sensibilidade à dinâmica topográfica. No âmbito da Engenharia e do Planejamento Urbano (ODS 11), cálculos de corte e aterro, projetos de drenagem e mapeamentos de risco podem ser seriamente comprometidos. Na Agricultura de Precisão (ODS 2), práticas como a gestão de

irrigação e a aplicação localizada de insumos, que dependem do entendimento detalhado do fluxo hídrico, tendem a ser comprometidos pela resolução espacial e vertical limitada do modelo. Do mesmo modo, na Modelagem Ambiental (ODS 13 e 15), a baixa acurácia compromete a representação da rede de drenagem e das declividades, podendo levar à subestimação de picos de vazão ou à delimitação equivocada de áreas de preservação.

Portanto, embora o TOPODATA mantenha sua utilidade para sínteses regionais e macroescalas, seu uso em escala local deve ser precedido de uma ressalva importante. Os resultados apresentados dialogam com os ODSs não apenas pela menção direta, mas sobretudo ao alertar sobre os riscos do uso acrítico de bases públicas de geoinformação na tomada de decisão (ODS 9). A solução não reside no abandono do sensoriamento remoto, mas na adoção de metodologias híbridas que integrem validação em campo e calibração de modelos globais a partir de dados geodésicos de alta precisão, de modo a corrigir os vieses sistemáticos identificados. Tal abordagem representa o caminho mais consistente para atender às demandas técnicas e contribuir efetivamente para o cumprimento dos ODS.

REFERÊNCIAS

- AKTURK, E.; ALTUNEL, A. O. Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. *Measurement*, v. 136, p. 382–386, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.101>
- ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- BIELSKI, C.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, C.; GROHMANN, C. H.; GUTH, P. L.; HAWKER, L.; GESCH, D.; TREVISANI, S. Novel Approach for Ranking DEMs: Copernicus DEM Improves One Arc Second Open Global Topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 62, p. 1–22, 2024. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3368015>
- BORMANN, H. Impact of spatial data resolution on simulated catchment water balances and model performance of the multi-scale TOPLATS model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006. <https://doi.org/10.5194/hess-10-165-2006>
- Cao, X.; Liu, Z.; Hu, C.; Song, X.; Quaye, J.; Lu, N. Three-Dimensional Geological Modelling in Earth Science Research: An In-Depth Review and Perspective Analysis. *Minerals*, 2024. <https://doi.org/10.3390/min14070686>
- CHANG, K.; TSAI, B. The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect Mapping. *Cartography and Geographic Information Systems*, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 69–77, 1991. <https://doi.org/10.1559/152304091783805626>
- CLIFF, N. Dominance Statistics: Ordinal Analyses to Answer Ordinal Questions. *Psychological Bulletin*, p. 494–509, 1993. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.3.494>
- CRUZ, J. P. **Bioestatística**. 2019. Disponível em: <https://sweet.ua.pt/pedrocruz/bioestatistica/an-ks.html#gsc.tab=0>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- CRUZ, J.; BUDAY-BÓDI, E.; NAGY, A.; FEHÉR, Z. Z.; TAMÁS, A.; VIRÁG, I. C.; BOJTOR, C.; FORGÁCS, F.; VAD, A. M.; KUTASY, E. Multispectral Analysis of Small Plots Based on Field and Remote Sensing Surveys—A Comparative Evaluation. *Sustainability*, v. 14, n. 6, p. 3339, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14063339>
- CSAJBÓK, J.; BUDAY-BÓDI, E.; NAGY, A.; FEHÉR, Z. Z.; TAMÁS, A.; VIRÁG, I. C.; BOJTOR, C.; FORGÁCS, F.; VAD, A. M.; KUTASY, E., 2022. Multispectral Analysis of Small Plots Based on Field and Remote Sensing Surveys—A Comparative Evaluation. *Sustainability*, v. 14, n. 3339. <https://doi.org/10.3390/su14063339>
- DALPOSSO, G. H. **Método Bootstrap na agricultura de precisão**. 2017. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/3075>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- DELCHIARO, M.; VERGARI, F.; ESPOSITO, C.; DEL MONTE, M. The influence of anthropogenic topographic changes on geomorphological processes in the city of Rome (Italy): A case study of the Malagrotta area. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 50, n. 3, p. e70033, 2025. <https://doi.org/10.1002%2Fesp.70033>
- DONG, X.; GARRATT, M. A.; ANAVATTI, S. G.; ABBASS, H. A. Towards Real-Time Monocular Depth Estimation for Robotics: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 23, n. 10, p. 16940–16961, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.08600>
- DUTILLEUL, P.; CLIFFORD, P.; RICHARDSON, S.; HEMON, D. Modifying the t Test for Assessing the Correlation Between Two Spatial Processes. *Biometrics*, v. 49, n. 1, p. 305, 1993. <https://doi.org/10.2307/2532625>
- DUTRA, D. da S. **Caracterização e zoneamento geoambiental do município de Canguçu/RS**. 2021. 278 f. Dissertação (Mestrado em Geografia)

- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- FERREIRA, Z.; COSTA, A. C.; CABRAL, P. Analysing the spatial context of the altimetric error pattern of a digital elevation model using multiscale geographically weighted regression. **European Journal of Remote Sensing**, v. 56, n. 1, p. 2260092, 2023. <https://doi.org/10.1080/22797254.2023.2260092>
- FRANÇA, L. **Decifrando o RINEX**: o formato aberto para o posicionamento GNSS. Disponível em: <https://geoone.com.br/sobre-rinex/>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- GEORGE, C.; MOHAN, K. Digital Elevation Model (DEM) from Google Earth Pro and Freely Downloadable DEMs – A Case Study. **Scholars Journal of Engineering and Technology**, v. 12, n. 08, p. 263–266, 2024. <https://doi.org/10.36347/sjet.2024.v12i08.002>
- GOLDSTEIN A; FOTI R; MONTALTO F. Effect of Spatial Resolution in Modeling Stormwater Runoff for an Urban Block. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 11, p. 06016009, 2016. <https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001377>
- GOMES, F. C. M.; ZAIDAN, R. T.; ROCHA, C. H. B. Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, nº 5, p. 2448–2462, 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2448-2462>
- GUTH, P. L.; VAN NIEKERK, A.; GROHMANN, C. H.; MULLER, J. P.; HAWKER, L.; FLORINSKY, I. V.; GESCH, D.; REUTER, H. I.; HERRERA-CRUZ, V.; RIAZANOFF, S.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, C.; CARABAJAL, C. C.; ALBINET, C.; STROBL, P. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3581, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183581>
- HENKEL, P.; GUNTHER, C. Precise point positioning with multiple Galileo frequencies. **2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium**, p. 592–599, 2008. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4570102>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Canguçu - RS**: panorama. Cidades@, 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cangucu/panorama>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- JETBRAINS. **PyCharm**: The only Python IDE you need. 2025. Disponível em: <https://www.jetbrains.com/pycharm/>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- KRAMM, T.; HOFFMEISTER, D. Comprehensive vertical accuracy analysis of freely available DEMs for different landscape types of the Rur catchment, Germany. **Geocarto International**, v. 37, n. 25, p. 7774–7799, 2022. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1984588>
- KRAMM, T.; HOFFMEISTER, D. A Relief Dependent Evaluation of Digital Elevation Models on Different Scales for Northern Chile. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 10, p. 430, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijgi8100430>
- LI, D., LI, B.; FENG, H. Q.; KANH, S.; WANG, J.; WEI, Z. Low-altitude remote sensing-based global 3D path planning for precision navigation of agriculture vehicles - beyond crop row detection. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2024. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:268307684>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- LI, M.; YIN, X.; TANG, B.; YANG, M. Accuracy Assessment of High-Resolution Globally Available Open-Source DEMs Using ICESat/GLAS over Mountainous Areas, A Case Study in Yunnan Province, China. **Remote Sensing**, v. 15, n. 7, p. 1952, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15071952>
- LIU, S.; YANG, L. T.; TU, X.; LI, R.; XU, C. Lightweight Monocular Depth Estimation on Edge Devices. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 17, p. 16168–16180, 2022. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3151374>
- MONGRÉDIEN, C.; DOYEN, J. P.; STROM, M.; AMMANN, D. **Centimeter-Level Positioning for UAVs and Other Mass-Market Applications**. Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), **Proceedings** [...], Portland, Oregon, September 2016, p. 1441-1454. <https://doi.org/10.33012/2016.14619>
- MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; CATEN, A. T.; RUIZ, L. F. C.; RAMOS, P. V.; DOTTO, A. C. Assessment of Digital Elevation Model for Digital Soil Mapping in a Watershed with Gently Undulating Topography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 0, 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832016000100304&lng=en&tlang=en. Acesso em: 11 nov. 2025.
- MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. de M. Estimativa da amplitude topográfica por geoprocessamento de dados SRTM para modelagem do relevo. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/download/4908/5137/3824>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- MOYA, C. R. Como escolher o teste estatístico: um guia para o pesquisador iniciante. São Paulo, SP: Claudia Moya, 2021. Disponível em:

- <https://www.sbquadril.org.br/app/uploads/2021/10/Como-escolher-o-teste-estatistico-Um-guia-para-apesquisador-iniciante.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2025.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nossa Mundo:** A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Acesso em: 28 jan. 2025.
- PAKOKSUNG, K.; TAKAGI, M. Assessment and comparison of Digital Elevation Model (DEM) products in varying topographic, land cover regions and its attribute: a case study in Shikoku Island Japan. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 7, n. 1, p. 465–484, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00891-x>
- PANAGIOTOU, E.; CHOCHLAKIS, G.; GRAMMATIKOPOULOS, L.; CHAROU, E. Generating Elevation Surface from a Single RGB Remotely Sensed Image Using Deep Learning. **Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 2002, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12122002>
- 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>
- PREFEITURA DE CACHOEIRA DO SUL. **Cachoeira tem 2.780 estabelecimentos rurais produtivos.** 2018. Disponível em: <https://www.cachoeiradosul.rs.gov.br/portal/noticias/0/3/1932/cachoeira-tem-2780-estabelecimentos-rurais-produtivos>. Acesso em: 15 de jan. 2025.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Version 3.34. Beaverton, OR: OSGeo, 2025. Software. Disponível em: <https://qgis.org/>. Acesso em: 20 jul. 2025.
- RAHRIG, R. R. ANOVA F-test and Kruskal-Wallis test performance comparison under varying distributions, variance heterogeneity, sample sizes, and noncentrality structures. **Journal of Statistics and Management Systems**, 2024. <https://doi.org/10.47974/JSMS-1116>
- ROBERTS, D. R.; BAHN, V.; CIUTI, S.; BOYCE, M. S.; ELITE, J.; GUILLERA-ARROITA, G.; HAUENSTEIN, S.; LAHOZ-MONFORT, J. J.; SCHRODER, B.; THUILLER, W.; WARTON, D. I.; WINTLE, B. A.; HARTIG, F.; DORMANN, C. F. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. **Ecography**, v. 40, n. 8, p. 913–929, 2017. <https://doi.org/10.1111/ecog.02881>
- SAMPAIO, N. A. D. S.; ASSUMPÇÃO, A. R. P. D.; FONSECA, B. B. D. **Estatística Inferencial.** 2018. Disponível em: http://www.poisson.com.br/livros/estatistica/volume2/Estatistica_Inferencial.pdf. Acesso em: 04 jan. 2025.
- SAMEJIMA, K. **Estatística não paramétrica - Testes de Aderência.** 2018. Disponível em: https://est.ufba.br/sites/est.ufba.br/files/kim/m_atd49-aula05-aderencia.pdf. Acesso em: 04 jan. 2025.
- SHEAN, D. E.; ALEXANDROV, O.; MORATTO, Z. M.; SMITH, B. E.; JOUGHIN, I. R.; PORTER, C.; MORIN, P. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 116, p. 101–117, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>
- SHIN, Y.; LEE, C.; KIM, E. Enhancing Real-Time Kinematic Relative Positioning for Unmanned Aerial Vehicles. **Machines**, v. 12, n. 3, p. 202, 2024. <https://doi.org/10.3390/machines12030202>
- SIAVOSHI, M. **10 Python Statistical Functions.** 2025. Disponível em: <https://www.kdnuggets.com/10-pythonstatisticalfunctions#:~:text=Libraries%20for%20Statistical%20Analysis,a%20range%20of%20mathematical%20functions.>. Acesso em: 05 jan. 2025
- VALERIANO, M. M. **Topodata:** guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025
- VALERIANO, M. de M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. 2005. **Anais [...] 2005.** Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- VALERIANO, M. M.; MUÑOZ, V. V. **Estimativa da amplitude topográfica por geoprocessamento de dados SRTM para modelagem do relevo.** Geografia – INPE. 2011. Disponível em: <http://observatoriodegeografia.uepg.br/files/original/d539e3c4eb516c5dba5a51e40f433c678341b860.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOsviewer – Visualizing scientific landscapes.** Leiden: Centre for Science and Technology Studies, Leiden University, 2025. Disponível em: <https://www.vosviewer.com>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- XU, W.; LI, J.; PENG, D.; YIN, H.; JIANG, J.; XIA, H.; WEN, D. Vertical Accuracy Assessment and Improvement of Five High-Resolution Open-Source Digital Elevation Models Using ICESat-2 Data and Random Forest: Case Study on Chongqing, China. **Remote Sensing**, v. 16, n. 11, p. 1903, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16111903>

YANG, L.; ZHU, Z.; SUN, L.; ZHANG, D. Global Attention-Based DEM: A Planet Surface Digital Elevation Model-Generation Method Combined with a Global Attention Mechanism. **Aerospace**, v. 11, n. 7, p. 529, 2024. <https://doi.org/10.3390/aerospace11070529>

TIAN, Y.; GUO, P.; LYU, M.R. Comparative Studies on Feature Extraction Methods for Multispectral Remote Sensing Image Classification. In: 2005 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2005, Waikoloa, HI, USA. 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2005. p. 1275–1279. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2005.1571322>

YIN, Q.; CHEN, Z.; ZHENG, X.; XU, Y.; LIU, T. Sliding Windows Method Based on Terrain Self-Similarity for Higher DEM Resolution in Flood Simulating Modeling. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3604, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183604>

ZHANG, Y.; YU, W. Comparison of DEM Super-Resolution Methods Based on Interpolation and Neural Networks. **Sensors**, v. 22, n. 3, p. 745, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22030745>

ZHU, H.; CHEN, Y. A Study of the Effect of DEM Spatial Resolution on Flood Simulation in Distributed Hydrological Modeling. **Remote Sensing**, v. 16, n. 16, p. 3105, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16163105>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Tássia Sampaio: Conceitualização, Validação, Investigação e Redação do Rascunho e Original; Luciano Tavares: Conceitualização, Validação, Investigação, Redação do Rascunho e Original; Tainara Corrêa: Conceitualização, Validação, Investigação, Redação do Rascunho e Original; Larissa Aldrighi: Investigação e Edição; Carolina Souza: Investigação; Lucas Santos: Investigação; Andréa Castro: Redação da Revisão e Edição; Diuliana Leandro: Redação da Revisão e Edição; Adriano Simon: Redação da Revisão e Edição.

EDITOR ASSOCIADO: Silvio Carlos Rodrigues. 

DISPONIBILIDADE DE DADOS: Os dados que fundamentam os resultados deste estudo poderão ser disponibilizados pelo autor correspondente, mediante solicitação devidamente justificada. [Tássia Parada Sampaio].



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.