

MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE DADOS DE GNSS RTK NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO RIO PIRATINI EM PEDRO OSÓRIO E CERRITO

Eduardo Luceiro Santana

Mestre em Recursos Hídricos – UFPel
Doutorando em Recursos Hídricos – UFPel
E-mail: eduardoluceirosantana@hotmail.com

Laura Martins Bueno

Mestra em Recursos Hídricos – UFPel
Doutoranda em Recursos Hídricos – UFPel
E-mail: laurambueno_@outlook.com

Aryane Araujo Rodrigues

Doutora em Recursos Hídricos – UFPel
Pesquisadora PDTI 2 – FAPERGS na UFPel
E-mail: aryanec032@gmail.com

Tamara Leitzke Caldeira Beskow

Doutora em Manejo e Conservação do Solo e da Água – UFPel
Professora Adjunta do Departamento de Recursos Hídricos/Escola de Engenharia – UFLA
E-mail: tamaraleitzkecaldeira@gmail.com

Samuel Beskow

Doutor em Engenharia Agrícola – UFLA
Professor Associado IV do Departamento de Recursos Hídricos/Escola de Engenharia da UFLA
E-mail: samuelbeskow@gmail.com

RESUMO

Este estudo apresenta o desenvolvimento de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta precisão para a planície de inundação do rio Piratini, abrangendo as áreas urbanas dos municípios de Pedro Osório e Cerrito (RS). O levantamento planialtimétrico foi realizado com receptor GNSS RTK Emlid Reach RS2, totalizando 2.921 pontos coletados entre fevereiro e agosto de 2024. Os dados foram processados no ArcGIS Pro 3.5.3 por meio do método geoestatístico de Krigagem Ordinária, que apresentou erro médio de 0,01 metros e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,61 metros na validação cruzada. O MDE resultante, adotando-se o modelo esférico de semivariograma, com resolução espacial de 5 m, foi disponibilizado em duas versões - altitude normal e de referência local, esta última compatibilizada com as réguas fluviométricas da ANA. O estudo evidencia o potencial dos levantamentos GNSS RTK em escala urbana para complementar os MDEs globais tradicionalmente utilizados como SRTM, ASTER e NASADEM, especialmente em regiões planas e urbanizadas próximas a cursos d'água, ampliando a capacidade de representação do relevo e reduzindo incertezas em aplicações hidrológicas diversas, como análise de suscetibilidade a inundações, modelagem hidrodinâmica e aprimoramento do sistema de previsão hidrológica e alerta antecipado operado pelo NIP/UFPel.

PALAVRAS-CHAVE: Levantamento topográfico; Geoestatística; Krigagem ordinária; Sistema de Informações Geográficas; Inundações urbanas.

DIGITAL ELEVATION MODEL FROM RTK GNSS DATA IN THE PIRATINI RIVER FLOODPLAIN IN PEDRO OSÓRIO AND CERRITO

ABSTRACT

This study presents the development of a high-precision Digital Elevation Model (DEM) for the floodplain of the Piratini River, covering the urban areas of the municipalities of Pedro Osório and Cerrito (RS), Brazil. The topographic survey was conducted using an Emlid Reach RS2 GNSS RTK receiver, totaling 2,921 points collected between February and August 2024. The data were processed in ArcGIS Pro 3.5.3 using the Ordinary Kriging geostatistical method, which yielded a mean error of 0.01 meters and a root mean square error (RMSE) of 0.61 meters in cross-validation. The resulting DEM, adopting a spherical semivariogram model with a spatial resolution of 5 m, was made available in two versions—normal altitude and local reference altitude, the latter being adjusted to match the hydrometric gauges of ANA (Brazilian National Water and Sanitation Agency). The study highlights the potential of GNSS RTK surveys at the urban scale to complement globally available DEMs such as SRTM, ASTER, and NASADEM, especially in flat and urbanized areas near watercourses, improving terrain representation and reducing uncertainties in various hydrological applications, such as flood susceptibility analysis, hydrodynamic modeling, and enhancement of flood forecasting and early warning systems operated by the NIP/UFPel.

KEYWORDS: Topographic survey; Geostatistics; Ordinary kriging; Geographic Information System; Urban flooding.

INTRODUÇÃO

As inundações constituem uma das principais ameaças geo-hidrológicas ao desenvolvimento socioeconômico e à segurança pública em escala global (Liu *et al.*, 2025). A intensificação desse fenômeno está fortemente associada às mudanças climáticas, que têm alterado os regimes de precipitação e aumentado a frequência e a intensidade dos eventos extremos. Além disso, a expansão urbana desordenada e a conversão da cobertura natural do solo em superfícies impermeáveis reduzem a infiltração da água, ampliam o escoamento superficial direto e elevam a frequência e a magnitude das cheias (Bibi *et al.*, 2023).

Esse cenário global manifesta-se de forma particularmente crítica no sul do Brasil (MDR, 2025). O Estado do Rio Grande do Sul tem vivenciado, nos últimos anos, uma sucessão de eventos de inundação sem precedentes, com destaque para as cheias históricas de 2023 e 2024 (Collischonn *et al.*, 2025), que afetaram extensas áreas urbanas e rurais, comprometendo infraestruturas, atividades produtivas e o bem-estar das populações locais. Esses episódios evidenciam a urgência de fortalecer os sistemas regionais de monitoramento e de resposta, com foco em estratégias preventivas e de adaptação às novas condições climáticas.

Nesse contexto, destacam-se os municípios de Pedro Osório e Cerrito, localizados no sul do Rio Grande do Sul, cujas populações convivem historicamente com as cheias recorrentes do rio

Piratini, um divisor natural e limite administrativo entre ambos os municípios. Em cada evento de inundação, o transbordamento do rio provoca impactos expressivos sobre áreas residenciais, vias urbanas e atividades econômicas situadas nas margens, exigindo respostas emergenciais recorrentes. A vulnerabilidade dessas localidades é potencializada pela configuração topográfica predominantemente plana da planície de inundação e pela ocupação urbana próxima ao leito principal do rio.

Até 2023, o rio Piratini não contava com um sistema de previsão hidrológica capaz de fornecer alertas antecipados às populações ribeirinhas de Pedro Osório e Cerrito. As ações de resposta a eventos extremos ocorriam de forma reativa, baseadas apenas na observação direta dos níveis do rio e na experiência empírica das comunidades locais. Diante dessa lacuna, o Núcleo Integrado de Previsão (NIP/UFPel) desenvolveu, em 2023, um sistema de previsão hidrológica simplificado que passou a fornecer previsões antecipadas de nível do rio, em estreita articulação com as Coordenadorias Municipais de Proteção e Defesa Civil e com a Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul. Desde então, o sistema foi utilizado de forma operacional em múltiplas ocasiões e demonstrou elevada acurácia para tomadas de decisões de evacuação preventiva ou de não evacuação. Essa cooperação técnica consolidou um marco regional no monitoramento e na gestão de riscos hidrológicos.

O sistema vem sendo continuamente aprimorado por meio de projetos de pesquisa e desenvolvimento financiados pelos governos estadual e federal, os quais integram redes de monitoramento em tempo real, previsão meteorológica e modelagem hidrológica e hidrodinâmica. Até 2023, a modelagem hidrodinâmica ainda apresentava limitações decorrentes da utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) provenientes de fontes públicas de sensoriamento remoto com cobertura continental ou global, como os MDEs SRTM, ASTER e NASADEM, amplamente empregados em estudos hidrológicos (Moura *et al.*, 2021). Entretanto, esses produtos não ofereciam o nível de detalhamento necessário para representar com fidelidade as variações altimétricas da planície de inundação, especialmente em áreas urbanas e com baixa declividade. Os MDEs, entretanto, constituem a base espacial de qualquer modelagem hidrodinâmica. Diante disso, a adoção de MDEs de alta precisão, obtidos por meio de levantamentos in situ com receptores GNSS, por exemplo, representa um avanço significativo, capaz de aprimorar a representação topográfica, reduzir incertezas e aumentar a acurácia da modelagem hidrodinâmica.

A partir de 2024, o NIP iniciou levantamentos sistemáticos de alta precisão com receptores GNSS RTK, voltados à construção de uma base topográfica detalhada para os perímetros urbanos de Pedro Osório e Cerrito.

Considerando os dados altimétricos obtidos de forma pontual, a conversão desses dados em uma superfície contínua demandou o emprego de um interpolador capaz de incorporar a estrutura de dependência espacial entre as amostras. Nesse contexto, adotou-se a krigagem, método geoestatístico fundamentado nos trabalhos de Krige (1951) e Matheron (1963), amplamente utilizado para estimar valores em locais não amostrados e quantificar a incerteza associada ao processo de interpolação.

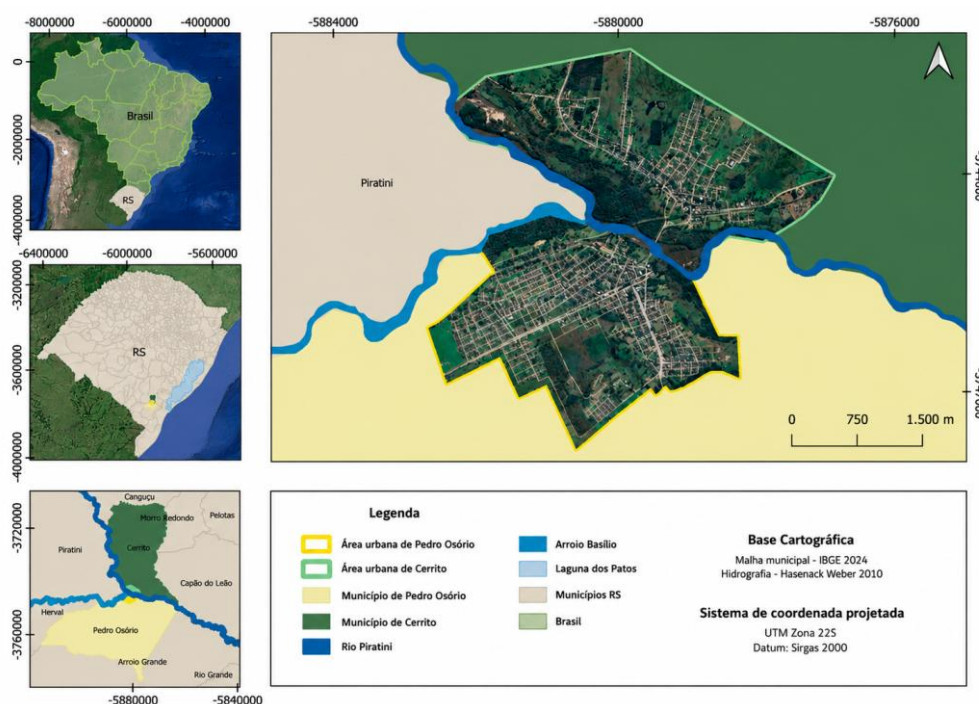
A aplicação dessa abordagem permitiu gerar um Modelo Digital de Elevação (MDE) consistente com a variabilidade topográfica local e forneceu uma base altimétrica mais adequada à representação da planície de inundação urbana e ao aprimoramento da modelagem hidrodinâmica. O produto constitui a base altimétrica necessária para o aprimoramento da modelagem e do sistema de previsão hidrológica operado pelo NIP.

OS MUNICÍPIOS DE PEDRO OSÓRIO E CERRITO

Os municípios de Pedro Osório e Cerrito são margeados pelo rio Piratini (Figura 1), que atua como limite natural entre ambos e constitui um dos principais afluentes da bacia hidrográfica Mirim–São Gonçalo, no extremo sul do Rio Grande do Sul. O rio Piratini drena uma área de aproximadamente 5.810 km² e abrange municípios desde sua nascente em Piratini e Pinheiro Machado, até a foz no Canal São Gonçalo, o qual conecta a Lagoa Mirim à Laguna dos Patos. No trecho que compreende Pedro Osório e Cerrito, o rio drena uma área de cerca de 4.700 km², correspondente a mais de 80% de sua bacia total, representando o principal eixo de drenagem da porção média e inferior da bacia. De acordo com dados do IBGE (2025), Pedro Osório e Cerrito apresentam áreas territoriais de 603,76 km² e 451,70 km², populações estimadas em 7.631 e 5.910 habitantes, e densidades demográficas de 12,40 e 12,86 hab/km², respectivamente.

A região caracteriza-se pela transição entre o Planalto Sul-Riograndense e a Planície Costeira Interna, com relevo suavemente ondulado que favorece a formação de amplas planícies de inundação. Durante alguns eventos de chuvas intensas, o escoamento superficial supera a capacidade do canal principal, ocasionando o transbordamento das águas sobre áreas urbanas e rurais. O arroio Basílio, afluente do rio Piratini, intensifica as inundações na margem direita, especialmente em sua confluência com o rio, onde contribui para o acúmulo de águas na planície de inundação.

Figura 1 - Área de estudo



Fonte: Autores

LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E PÓS-PROCESSAMENTO

A área de estudo abrange o perímetro urbano dos municípios de Pedro Osório e Cerrito (Figura 1) e compreende uma área de 6,47 km². O levantamento planialtimétrico foi realizado por meio do método cinemático ponto-a-ponto, com um receptor GNSS RTK (Real-Time Kinematic) modelo Emlid Reach RS2 (Figura 2a). Os dados foram coletados com alta precisão, no sistema de projeção UTM Zona 22S, Datum SIRGAS 2000, e armazenados e gerenciados no aplicativo Emlid Flow. A precisão posicional foi aprimorada com correções em tempo real via NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), utilizando como estação base a estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) denominada PELOTAS – CAPÃO DO LEÃO, localizada no município de Capão do Leão/RS (Latitude: 31° 48' 8,81800" S; Longitude: 52° 25' 3,46276" W; Altitude elipsoidal: 37,130 m). O levantamento foi conduzido com taxa de registro instantânea, linha de base média de 40,86 km e erro posicional inferior a 1,5 cm.

Ao todo, foram realizadas oito campanhas de campo entre 16 de fevereiro e 23 de agosto de 2024 (Figura 2b). O levantamento de campo resultou em 2.921 pontos amostrados, distribuídos ao longo dos logradouros urbanos (Figura 2c). A distribuição espacial não constitui uma malha regular: a distância mínima e máxima entre pontos foi de 0,5 m e 268 m, respectivamente, com média de 20 m entre observações.

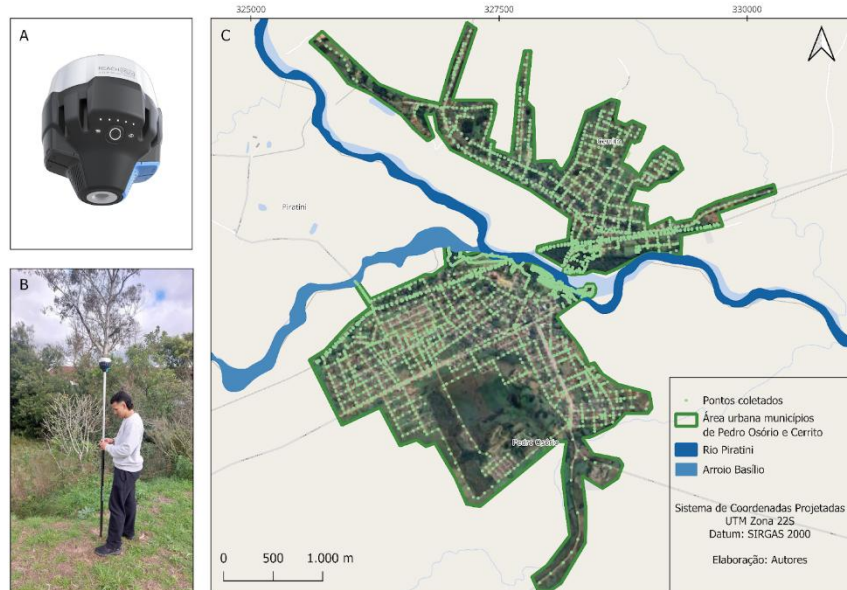
Os dados brutos foram processados para conversão das altitudes elipsoidais em normais, aplicando-se o modelo de ondulação geoidal *hgeoHNOR2020* (IBGE, 2023). Essa etapa assegurou a compatibilidade dos dados com o referencial vertical oficial brasileiro, constituindo a base altimétrica de alta precisão utilizada para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), descrito no item seguinte.

GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O MDE foi gerado pelo método geoestatístico de Krigagem Ordinária (Isaaks & Srivastava, 1989). O processo iniciou-se com a elaboração do semivariograma experimental, utilizado para caracterizar a dependência espacial entre os pontos amostrados de altitude normal. Foram testados modelos teóricos de semivariograma (gaussiano, exponencial e esférico) e selecionado aquele que apresentou menores valores de erro na validação cruzada (pelo método *leave-one-out*), conforme Yamamoto & Landim (2013).

A partir do modelo teórico ajustado, realizou-se a interpolação espacial, resultando em uma superfície contínua da variável interpolada e no respectivo campo de erro da predição. Todas as etapas de ajuste, validação e geração do MDE foram conduzidas no ArcGIS Pro 3.5.3 e na ferramenta *Geostatistical Wizard* (ESRI, 2025), que permitem configurar, testar e validar os parâmetros geoestatísticos empregados. Os resultados estão ilustrados na Figura 3.

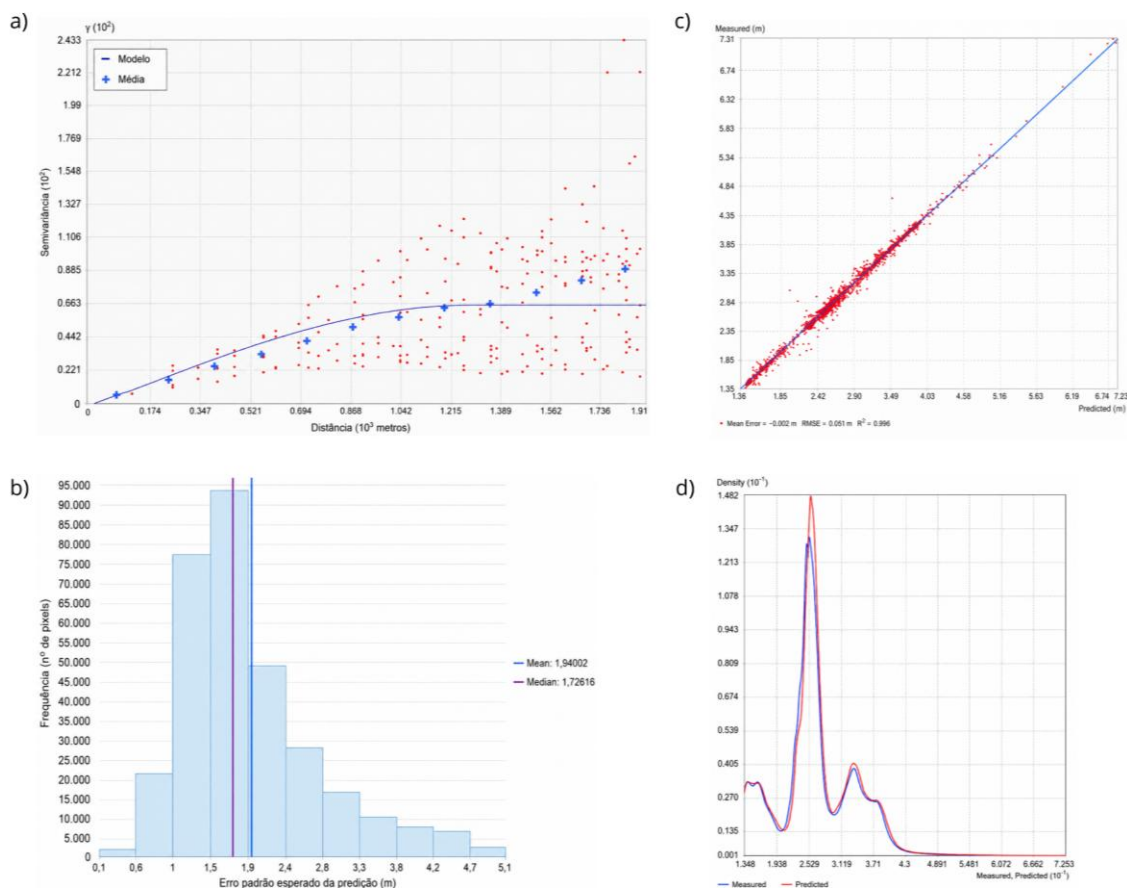
Figura 2 - a) Receptor GNSS RTK EMLID Reach RS-2+; b) Levantamento planialtimétrico da área de estudo; e c) Malha de pontos amostrada no levantamento planialtimétrico da área de estudo.



Fonte: Autores

O melhor ajuste do modelo teórico foi o esférico (Figura 3a), comumente utilizado para dados de altitude. Os dados brutos foram mantidos sem transformações, remoção de tendência ou consideração de anisotropia. A Figura 3b ilustra a distribuição do erro de predição, enquanto as Figuras 3c e 3d evidenciam a elevada acurácia do modelo: o diagrama de paridade indica ausência de viés, com a linha de regressão praticamente coincidente com a 1:1, indicando ausência de super ou subestimativas sistemáticas. O erro médio (0,01) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (0,61) confirmam a boa capacidade da Krigagem Ordinária em reproduzir a variabilidade observada na área de estudo.

Figura 3 - a) Semivariograma experimental e teórico isotrópicos; b) Distribuição de frequência do erro padrão esperado da predição nos locais amostrados; c) Diagrama de paridade entre os valores amostrados *versus* preditos; d) Distribuição de frequência dos valores amostrados *versus* preditos pela Krigagem Ordinária.

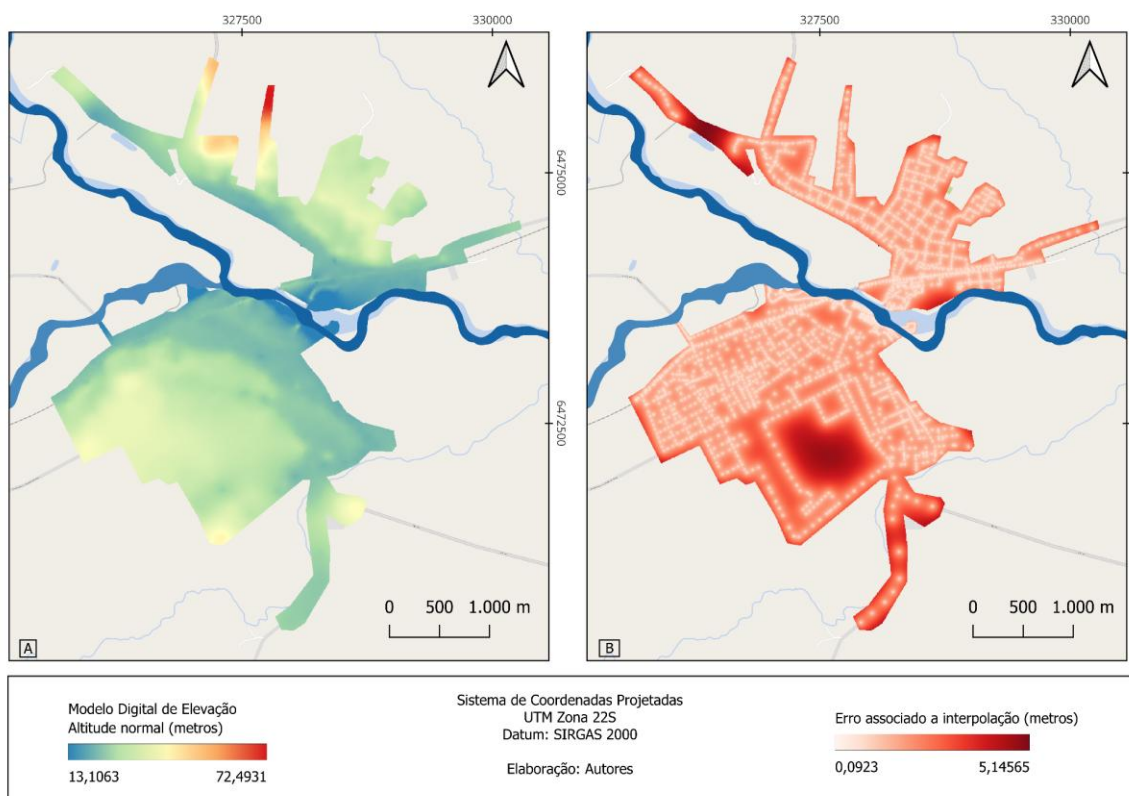


Fonte: Autores

A interpolação espacial resultou na geração do MDE normal com resolução espacial de 5 metros (Figura 4a), fornecendo um sistema vertical padronizado, adequado a comparações regionais

e integração com outros produtos geoespaciais. O campo de incerteza (Figura 4b) revelou maiores erros nas áreas periféricas e pouco amostradas - fenômeno esperado em malhas não uniformes, conhecido como efeito de borda (Rios, 2018). As regiões com tonalidades mais intensas, onde o erro ultrapassa 2 m, concentram-se nas bordas urbanas e zonas extrapoladas, mas o erro global permaneceu baixo, assegurando um produto confiável para aplicações hidrológicas e hidrodinâmicas.

Figura 4 - a) Modelo Digital de Elevação com referência de altitude normal (MDE normal); e b) Campo de incerteza da predição.



Fonte: Autores

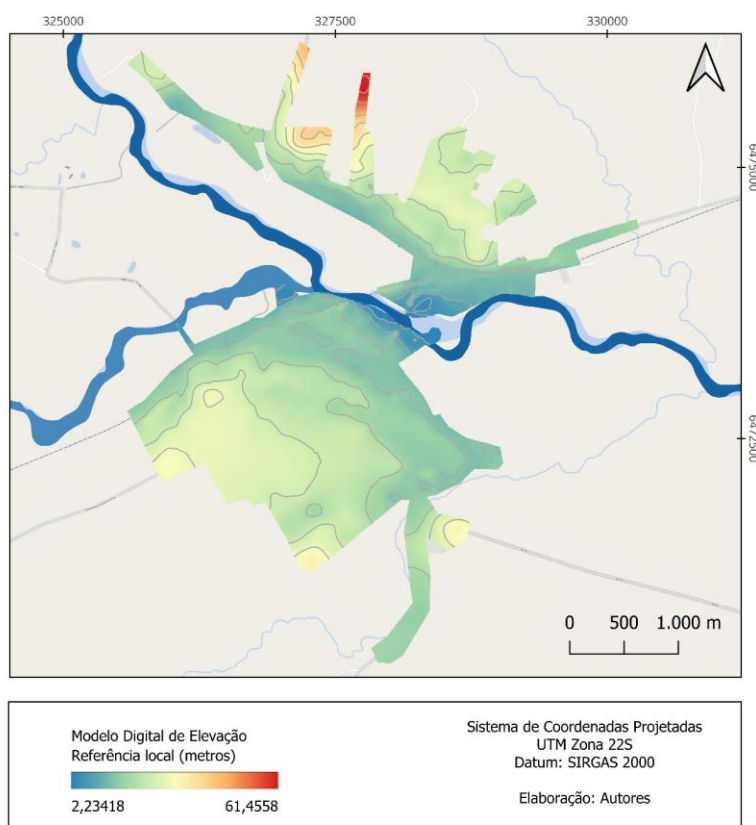
Ao analisar os dados ilustrados na Figura 4b, constatou-se que aproximadamente 85% dos pixels apresentam incerteza inferior a 1,96 m, evidenciando a boa consistência espacial do MDE gerado a partir da interpolação dos pontos coletados ao longo da malha viária. Esse resultado demonstra que, mesmo com a distribuição amostral concentrada nos arruamentos, o modelo apresentou baixa incerteza global, erro médio reduzido e coerência compatível com a finalidade proposta para aplicações urbanas multidisciplinares.

A parcela restante, correspondente a cerca de 15% dos pixels com incerteza superior a 1,96 m, ocorre principalmente em setores com menor suporte amostral, maior afastamento em relação aos

pontos levantados e nos limites da área interpolada, refletindo o comportamento esperado do processo de interpolação em regiões não diretamente amostradas. Portanto, esses pixels não comprometem a qualidade geral do produto, mas indicam áreas de menor confiabilidade relativa, que devem ser consideradas com maior cautela em aplicações sensíveis a pequenas variações altimétricas, como análises hidrológicas urbanas, delimitação de áreas inundáveis e estudos em superfícies de baixa declividade.

A partir do MDE normal, foi gerado um segundo modelo com referência altimétrica local (MDE de referência local), ilustrado na Figura 5, de modo a compatibilizar as altitudes com o nível de referência das réguas linimétricas mantidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) na estação fluviométrica Pedro Osório (código 88641000). A integração entre o MDE normal e o MDE de referência local foi realizada mediante um procedimento de vinculação altimétrica com garantia metrológica e rastreabilidade institucional. A vinculação das altitudes normais às cotas locais foi efetuada a partir do Nível de Referência Nacional (RN2 da CPRM), correspondente à estação fluviométrica Pedro Osório, localizada na cabeceira da ponte que interliga os municípios e previamente referenciada às réguas linimétricas. Esse valor de referência foi transferido até o marco de centragem forçada, construído segundo os padrões do IBGE, por meio de nivelamento geométrico composto Classe I, garantindo a continuidade métrica entre a rede oficial e a malha altimétrica local. Com as informações obtidas no marco de centragem forçada, foi possível estabelecer o fator de correlação entre a altitude normal e a cota local, possibilitando converter com alta precisão as altitudes do MDE normal para o sistema local.

Figura 5 - Modelo Digital de Elevação com referência local.



Fonte: Autores | Santana *et al.* (2024), disponível via ISBN.

A conversão das altitudes normais para a referência vertical local resultou em um decréscimo de 11,004 metros, valor correspondente à diferença média entre as duas referências adotadas. Essa transformação não altera a morfologia do relevo, mas garante maior padronização e comparabilidade entre diferentes conjuntos de dados altimétricos, sendo essencial para análises de maior abrangência espacial e para a integração com outros produtos geoespaciais.

O MDE de referência local expressa as cotas em relação às réguas instaladas em campo, constituindo uma referência operacional amplamente utilizada em estudos hidrológicos. Essa abordagem possibilita a correlação direta entre o relevo do terreno e as cotas observadas nos cursos d'água, o que é essencial para a modelagem hidrodinâmica e o sistema de previsão hidrológica e alerta antecipado operado pelo NIP. Em contraste, o MDE normal fornece um sistema vertical padronizado e internacionalmente reconhecido, adequado a estudos comparativos e análises regionais. Assim, a coexistência dos dois modelos assegura tanto rigor científico quanto aplicabilidade operacional, fortalecendo a integração entre monitoramento, modelagem e previsão hidrológica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de alta precisão para as áreas urbanas dos municípios de Pedro Osório e Cerrito representa um avanço expressivo em relação às bases altimétricas tradicionalmente utilizadas, como os modelos SRTM, ASTER e NASADEM, cujas resoluções continentais ou globais não oferecem o detalhamento necessário para representar com fidelidade o relevo em áreas urbanas e planícies de inundação.

Os MDEs aqui produzidos, obtidos a partir de levantamentos GNSS RTK e integrados às referências normal e local, constituem uma base geoespacial robusta e precisa, fundamental para subsidiar a modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia do rio Piratini. Esses produtos elevam o nível de detalhamento das análises e reduzem significativamente as incertezas em simulações de cheias, contribuindo para aprimorar o sistema de previsão hidrológica e alerta antecipado operado pelo NIP.

Além de seu caráter técnico e institucional, este estudo se configura como um caso de sucesso na aplicação de levantamentos GNSS RTK em escala local para complementar bases altimétricas públicas e representar com alta fidelidade o relevo de áreas urbanas em planícies de inundação. A experiência demonstrada em Pedro Osório e Cerrito reforça o potencial desse tipo de abordagem para ser replicada em outras áreas urbanas brasileiras sujeitas a inundações, incentivando o uso de tecnologias acessíveis e precisas na construção de infraestruturas geoespaciais voltadas à gestão de riscos e à resiliência climática.

136

REFERÊNCIAS

BIBI, T. S.; REDDYTHTA, D.; KEBEBEW, A. S. Assessment of the drainage systems performance in response to future scenarios and flood mitigation measures using stormwater management model. **City and Environment Interactions**, v. 19, Art. 100111, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100111>.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

COLLISCHONN, W. *et al.* The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, e1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240119>.

ESRI. **ArcGIS Pro**: versão 3.5. Redlands, CA: Esri, 2025. Programa de computador. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>. Acesso em: 07 out. 2025.

IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Modelo hgeoHNOR2020 para Conversão de Altitudes Geométricas em Altitudes Normais**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. 51 p. (Relatórios Metodológicos, v. 47).

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

LIU, J. *et al.* A novel flood conditioning factor based on topography for flood susceptibility modeling. **Geoscience Frontiers**, v. 16, Art. 101960, 2025.

MDR - Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. **Atlas digital de desastres no Brasil**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/graficos.xhtml>. Acesso em: 11 out. 2025.

MOURA, M. M.; BESKOW, S.; TERRA, F. S.; MELLO, C. R.; CUNHA, Z. A.; CASSALHO, F. Evaluation of geomorphological approaches combined with digital elevation models for the Nash's instantaneous unit hydrograph. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 107, Art. 103153, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103153>.

RIOS, É. S. **O efeito de borda na Geoestatística**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

SANTANA, E. L. *et al.* **Mapa de cotas linimétricas do rio Piratini na área urbana de Cerrito**. 2024. ISBN 978-65-01-28830-7.

SANTANA, E. L. *et al.* **Mapa de cotas linimétricas do rio Piratini na área urbana de Pedro Osório**. 2024. ISBN 978-65-01-28832-1.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p. ISBN: 978-85-7975-077-9.