

MODELO ALTIMÉTRICO OBTIDO POR GNSS, TOPOGRAFIA E RPA PARA GESTÃO DE INUNDAÇÕES URBANAS: ESTUDO DE CASO NO BAIRRO PORTO, PELOTAS-RS

ALTIMETRIC MODEL OBTAINED BY GNSS, TOPOGRAPHY AND RPA FOR URBAN FLOOD MANAGEMENT: CASE STUDY IN THE PORTO NEIGHBORHOOD, PELOTAS-RS

MODELO ALTIMÉTRICO OBTENIDO POR GNSS, TOPOGRAFÍA Y RPA PARA LA GESTIÓN DE INUNDACIONES URBANAS: ESTUDIO DE CASO EN EL BARRIO DE PORTO, PELOTAS-RS

 <https://doi.org/10.56238/arev7n7-125>

Data de submissão: 09/06/2025

Data de publicação: 09/07/2025

Luciano Martins Tavares
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: rstchemartins@gmail.com

Tássia Parada Sampaio
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: tssiap.sampaio@gmail.com

Tainara Goulart Corrêa
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: tainaragoulart15@gmail.com

Pascal Silas Thue
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: pascalsilasthue@gmail.com

Andrea Souza Castro
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: andreascastro@gmail.com

Diuliana Leandro
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: diuliana.leandro@gmail.com

Maurizio Silveira Quadros
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: mausq@hotmail.com

Robson Andreazza
Instituição: Universidade Federal de Pelotas
E-mail: robsonandreazza@yahoo.com.br

RESUMO

A urbanização acelerada e as mudanças climáticas têm intensificado inundações e alagamentos em áreas urbanas, demandando ferramentas eficazes para análise e mitigação de riscos. A impermeabilização do solo aumenta a vulnerabilidade das cidades a eventos hidrológicos extremos. Este estudo aplica geotecnologias na identificação de áreas críticas de risco hidrológico no bairro Porto, em Pelotas-RS, utilizando sensoriamento remoto e SIG. A metodologia empregou imagens aerofotogramétricas de alta resolução capturadas por RPAS e dados planialtimétricos precisos por GNSS e topografia, gerando ortomosaico georreferenciado e Modelo Digital de Elevação detalhado da área. A análise incluiu rigorosa avaliação da exatidão cartográfica dos produtos gerados e estudo aprofundado da suscetibilidade a inundações baseada em parâmetros topográficos e características do terreno. Os resultados evidenciam variações altimétricas em torno de um metro no tecido urbano e identificaram áreas particularmente vulneráveis a alagamentos, permitindo a classificação de zonas de risco. A análise bibliométrica complementar demonstrou a crescente relevância do aprendizado de máquina e modelagem hidrodinâmica na previsão e gestão de riscos urbanos, indicando tendências metodológicas promissoras. O estudo conclui que a integração sistemática de geotecnologias permite diagnóstico preciso de áreas críticas, contribuindo para políticas públicas efetivas de gestão de riscos e planejamento urbano sustentável, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relacionados à gestão hídrica, desenvolvimento urbano resiliente e proteção ambiental.

Palavras-chave: SIG (Sistema de Informação Geográfica). Modelagem hidrológica. Inundações urbanas. Altimetria. Acurácia.

ABSTRACT

Rapid urbanization and climate change have intensified urban floods and inundations, demanding effective tools for risk analysis and mitigation. Soil impermeabilization increases cities' susceptibility to extreme hydrological events. This study applies geotechnologies to identify critical flood risk areas in the Porto neighborhood, Pelotas-RS, using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). The methodology integrates high-resolution aerial photogrammetric images captured by Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) and precise planialtimetric data obtained through Global Navigation Satellite System (GNSS) and topographic surveys, generating a georeferenced orthomosaic and a detailed Digital Elevation Model (DEM). A rigorous cartographic accuracy assessment was performed, along with an in-depth flood susceptibility analysis based on topographic parameters and terrain characteristics. The results revealed altimetric variations of approximately one meter within the urban fabric and identified highly flood-prone areas, enabling risk zone classification. A complementary bibliometric review highlighted the growing relevance of machine learning and hydrodynamic modeling in urban risk prediction and management, revealing promising methodological trends. The study concludes that the systematic integration of geotechnologies enables precise identification of critical areas, contributing to effective public policies for risk management and sustainable urban planning, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs) related to water management, resilient urban development, and environmental protection.

Keywords: GIS (Geographic Information System). Hydrological modeling. Urban floods. Altimetry. Accuracy.

RESUMEN

La rápida urbanización y el cambio climático han intensificado las inundaciones en zonas urbanas, lo que requiere herramientas eficaces para el análisis y la mitigación de riesgos. La impermeabilidad del suelo aumenta la vulnerabilidad de las ciudades a eventos hidrológicos extremos. Este estudio aplica geotecnologías para identificar áreas críticas de riesgo hidrológico en el barrio Porto de Pelotas, Rio

Grande do Sul, mediante teledetección y SIG. La metodología empleó imágenes fotogramétricas aéreas de alta resolución capturadas por RPAS y datos planialtimétricos precisos de GNSS y topografía, generando un ortomosaico georreferenciado y un Modelo Digital de Elevación detallado del área. El análisis incluyó una evaluación rigurosa de la precisión cartográfica de los productos generados y un estudio exhaustivo de la susceptibilidad a inundaciones basado en parámetros topográficos y características del terreno. Los resultados destacaron variaciones de elevación de aproximadamente un metro en el tejido urbano e identificaron áreas particularmente vulnerables a inundaciones, lo que permitió la clasificación de zonas de riesgo. El análisis bibliométrico complementario demostró la creciente relevancia del aprendizaje automático y el modelado hidrodinámico en la predicción y gestión del riesgo urbano, lo que indica tendencias metodológicas prometedoras. El estudio concluye que la integración sistemática de geotecnologías permite un diagnóstico preciso de áreas críticas, contribuyendo a la eficacia de las políticas públicas de gestión de riesgos y a la planificación urbana sostenible, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la gestión del agua, el desarrollo urbano resiliente y la protección del medio ambiente.

Palabras clave: SIG (Sistema de Información Geográfica). Modelización hidrológica. Inundaciones urbanas. Altimetría. Precisión.

1 INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e as mudanças climáticas têm intensificado desastres naturais, especialmente inundações, que impactam a infraestrutura urbana e a qualidade de vida, agravados pela impermeabilização do solo e pelo escoamento superficial (HETTIARACHCHI; WASKO; SHARMA, 2018; MARELLE *et al.*, 2020; HEMMATI; ELLINGWOOD; MAHMOUD, 2020; MILLER; HUTCHINS, 2017). A expansão desordenada das cidades amplia a vulnerabilidade e dificulta a gestão do risco hidrológico (SHRESTHA *et al.*, 2021; ZOPE; ELDHO; JOTHIPRAKASH, 2016).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta fundamental para monitoramento ambiental, permitindo a análise de alterações no uso do solo e dinâmicas ambientais em larga escala (WILLIS, 2015; WOODCOCK *et al.*, 2020). Imagens de satélite possibilitam avaliar padrões de uso da terra e diagnosticar vulnerabilidades hídricas (GORELICK *et al.*, 2017; SHEFFIELD *et al.*, 2018). Além disso, sensores remotos facilitam a gestão de riscos, especialmente em locais de difícil acesso, ao fornecer dados consistentes para modelagem hidrológica e previsão de eventos extremos (DU *et al.*, 2019; MANFREDA *et al.*, 2018; GHAFFARIAN; KERLE; FILATOVA, 2018). A integração desses dados com Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIG) aprimora a modelagem hidrológica e auxilia na adaptação das cidades às mudanças climáticas (GUPTHA *et al.*, 2021; MARK *et al.*, 2004; ZHU *et al.*, 2021).

O monitoramento da expansão urbana é fundamental para entender os impactos do uso do solo nos riscos hidrológicos (GUO *et al.*, 2022; KALANTARI *et al.*, 2019; PAIVA *et al.*, 2020). O planejamento inadequado pode agravar a drenagem e aumentar a vulnerabilidade urbana (WEI, 2017), enquanto o sensoriamento remoto auxilia na identificação de áreas vulneráveis e na adoção de estratégias de mitigação, como infraestrutura verde (SOKOLOVA *et al.*, 2024). A Agenda 2030 e os ODS, especialmente o ODS 6, 11 e 15, promovem a urbanização sustentável, alinhando-se ao uso do sensoriamento remoto e SIG para integrar sistemas ambientais e sociais, fortalecendo a resiliência urbana (ALIBAŠIĆ, 2022; DA SILVA *et al.*, 2025).

Este estudo investiga o uso do sensoriamento remoto para monitorar áreas de risco hidrológico, integrando dados de RPAs ao SIG. O estudo de caso analisa como essas tecnologias contribuem para o planejamento urbano sustentável e a formulação de políticas de prevenção de desastres. Alinhado à Agenda 2030 (ONU, 2015), busca subsidiar estratégias de mitigação e adaptação climática, promovendo cidades mais seguras e sustentáveis.

Considerando a influência da variação altimétrica nos processos hidrológicos, este estudo avalia a qualidade altimétrica de diferentes métodos de levantamento topográfico na construção de Modelos Digitais do Terreno (MDT), essenciais para simulações de escoamento e inundações. Foram

comparadas duas abordagens: levantamento por GNSS e levantamento topográfico clássico, analisando separadamente dois métodos de GNSS para determinar sua precisão na modelagem hidrodinâmica. Essa análise aprofunda a compreensão da relação entre morfologia do terreno e riscos hidrometeorológicos, subsidiando estratégias de mitigação de desastres e promovendo cidades mais seguras e sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A revisão teórica desta pesquisa foi conduzida por meio de um levantamento bibliográfico sistemático na base de dados Scopus, uma das principais plataformas internacionais de literatura científica revisada por pares (SCOPUS, 2025), com o objetivo de fornecer uma análise atualizada sobre o tema. Para alcançar os objetivos propostos, foi elaborada uma estratégia de busca que contemplasse a intersecção entre sistemas de informação geográfica, eventos de inundação e estudos de acurácia em publicações recentes.

A pesquisa foi estruturada utilizando uma combinação de termos específicos nos campos de título, resumo e palavras-chave, sendo eles "*GIS*", "*flooding*" e "*accuracy*", conduzida predominantemente na língua inglesa. A escolha destes termos teve o intuito de identificar estudos que abordem simultaneamente aspectos relacionados à análise espacial, eventos hidrológicos e avaliação de precisão metodológica. Para assegurar a contemporaneidade da análise, estabeleceu-se um recorte temporal que engloba publicações do período de 2020 a 2024, conforme detalhado no Quadro 1.

Quadro 1: Scripts de palavras-chave utilizando a base de dados SCOPUS

PESQUISA = 215 (TITLE-ABS-KEY (gis) AND TITLE-ABS-KEY (flooding) AND TITLE-ABS-KEY (accuracy)) AND PUBYEAR > 2019

Fonte: os autores, 2024.

Para a análise bibliométrica, utilizou-se o *software* VOSviewer, considerando-se as métricas de ligações, ocorrências e ano médio de publicação, com ênfase na força total de ligação. Ademais, os dados extraídos da base bibliográfica foram incorporados no formato ".ris" ao *software* para então análise bibliométrica.

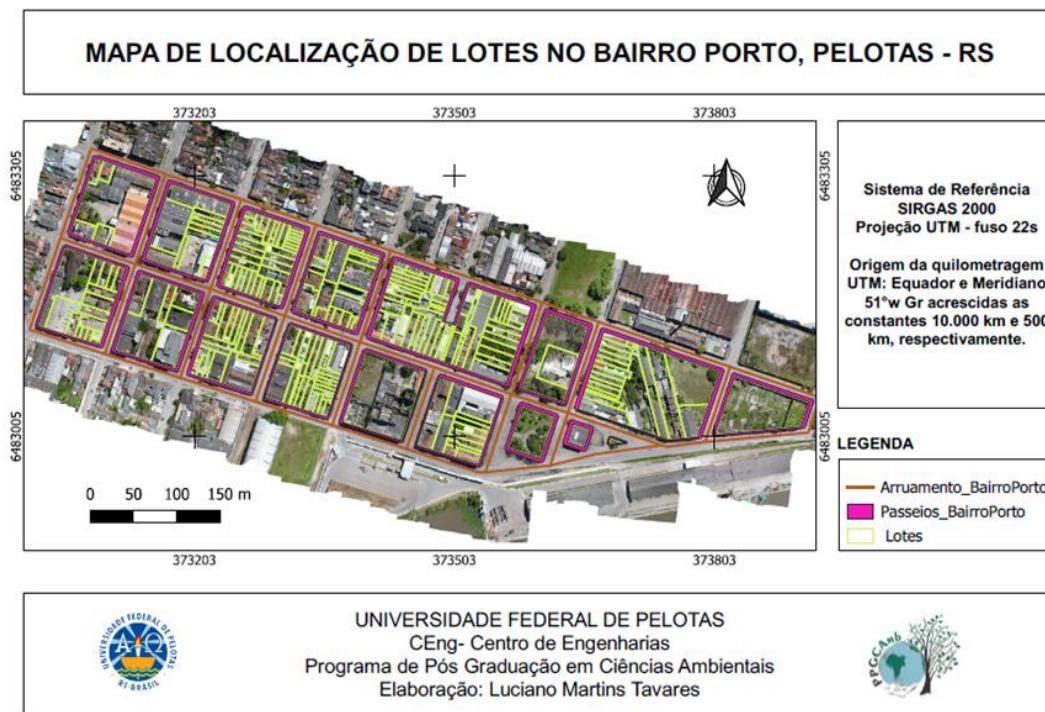
A análise bibliométrica utiliza quatro métricas principais: ligações, para identificar conexões entre termos, autores e periódicos; ocorrências, para medir a frequência de termos e destacar temas centrais; ano médio de publicação, para visualizar a evolução temporal; e força total de ligação, para quantificar a solidez das conexões e a consolidação dos tópicos. Essa abordagem sistemática mapeia a

evolução do campo, identifica lacunas e orienta pesquisas futuras, fornecendo bases para análises aprofundadas sobre tendências e desenvolvimento da área.

2.2 ANÁLISE ESPACIAL E SENSORIAMENTO REMOTO NA AVALIAÇÃO DO RISCO HIDROLÓGICO

Para atingir o objetivo deste estudo, a metodologia fundamenta-se na integração de técnicas de sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e análise espacial avançada, visando à compreensão das complexas dinâmicas territoriais urbanas no perímetro delimitado pelas vias Almirante Barroso, Benjamim Constant, Conde de Porto Alegre, Almirante Tamandaré e Xavier Ferreira, localizadas no município de Pelotas-RS (Figura 1). A abordagem metodológica foi estruturada para identificar padrões espaciais específicos e processos de transformação territorial que influenciam significativamente à vulnerabilidade hidrológica na área em questão.

Figura 1: Mapa de Localização da área de estudo.



Fonte: os autores, 2024.

Para a avaliação das áreas críticas de risco hidrológico, a pesquisa adotou uma abordagem metodológica baseada na aquisição e análise de dados altimétricos, essenciais para a modelagem hidrológica e a simulação de processos de escoamento superficial. A variação altimétrica exerce influência direta na dinâmica das inundações, impactando a distribuição e a velocidade do escoamento

em áreas urbanizadas, onde a impermeabilização do solo agrava a vulnerabilidade hídrica. Neste contexto, a precisão dos Modelos Digitais do Terreno (MDT) torna-se um fator determinante para a confiabilidade das simulações hidrodinâmicas e, consequentemente, para a formulação de estratégias eficazes de mitigação de desastres.

A obtenção dos dados topográficos foi realizada por meio de dois métodos distintos: o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e o levantamento topográfico clássico. A técnica GNSS permitiu a coleta de pontos georreferenciados tridimensionais (X, Y, Z) com ampla cobertura espacial, fornecendo um panorama detalhado da morfologia da superfície. No entanto, sua precisão altimétrica pode ser influenciada por fatores como a geometria dos satélites e a qualidade do sinal recebido, especialmente em áreas urbanas densamente edificadas, ou pela técnica de aquisição escolhida. Paralelamente, o levantamento topográfico clássico, realizado por meio de estação total, foi empregado para a aferição detalhada da variação altimétrica em setores estratégicos da área de estudo. Embora essa abordagem demande maior tempo de coleta e processamento, sua elevada precisão em medições altimétricas justifica sua aplicação em estudos de modelagem hidrológica.

Dado o objetivo de avaliar a adequação de cada método na representação da variação altimétrica, os dados foram analisados separadamente, buscando identificar a confiabilidade das coordenadas obtidas para a integração de modelos para uso na simulação de escoamento superficial e processos hidrológicos extremos. Pequenas discrepâncias na elevação podem resultar em diferenças significativas na modelagem de fluxos d'água, influenciando a delimitação de áreas suscetíveis a inundações e a definição de medidas de controle.

Essa fase da pesquisa foi realizada em três etapas principais: imageamento por meio de um Veículo Aéreo Remotamente Pilotado (RPAS – Remotely Piloted Aircraft System), coleta de dados planialtimétricos e geração do Modelo Digital de Elevação (MDE).

Figura 2: Etapas do processo da metodologia.



Fonte: os autores, 2024.

2.2.1 Levantamento fotogramétrico com RPAS

O levantamento aerofotogramétrico foi conduzido utilizando um Veículo Aéreo Remotamente Pilotado (RPA) equipado com um sensor RGB de alta resolução, operando em conformidade com a legislação vigente. O planejamento de voo foi estruturado para garantir uma sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 60%, assegurando a captura redundante de cada ponto do terreno em múltiplas imagens, requisito fundamental para a obtenção de um ortomosaico de alta precisão e a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE).

Foram adquiridas 200 imagens aerofotogramétricas da área de estudo, das quais 95 foram selecionadas com base na qualidade de sobreposição e nitidez. A aquisição ocorreu sob condições meteorológicas favoráveis, minimizando interferências atmosféricas que pudessem comprometer a acurácia dos dados. As imagens foram processadas no software *Agisoft Metashape*, utilizando técnicas de fotogrametria digital para reconstrução tridimensional da superfície, resultando em um ortomosaico detalhado e na modelagem altimétrica da área analisada.

2.2.2 Levantamento planialtimétricos

A obtenção de dados planialtimétricos foi realizada utilizando um par de receptores GNSS RTK-GSM Emlid RS2, com o objetivo de determinar as coordenadas precisas dos pontos de controle. Para garantir maior precisão em áreas problemáticas para levantamentos GNSS, o levantamento foi complementado por medições com uma estação total *Geomax Zoom10*. Os dados foram processados

e convertidos para o sistema de coordenadas UTM (SIRGAS 2000, fuso 22° Sul), assegurando conformidade cartográfica (MOREIRA; KRUEGER, 2020).

Os receptores GNSS RTK-GSM operaram em tempo real por meio de conexão à internet, utilizando a técnica NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). O protocolo padronizado assegurou a transmissão de correções diferenciais, garantindo elevada precisão geodésica (RAMACHANDRAN *et al.*, 2018). Os dados brutos foram registrados nos receptores para posterior processamento no Sistema IBGE-PPP, disponibilizado no site do IBGE, e foi empregado como método complementar para determinação das coordenadas geodésicas. Esse método, baseado na utilização de efemérides precisas e correções atmosféricas, permitiu alcançar alta exatidão posicional sem a necessidade de uma estação de referência próxima.

Os pontos de controle 1 e 2, utilizados para a comparação da coordenada vertical (altitude), foram estabelecidos em uma área livre de obstruções, a fim de minimizar interferências no sinal GNSS e garantir a precisão das medições. Localizados na Rua Conde de Porto Alegre, nas proximidades do Porto de Pelotas, esses pontos geodésicos de referência já possuíam georreferenciamento prévio e coordenadas de alta precisão.

A aquisição dos dados brutos foi realizada com uma taxa de registro de cinco segundos, enquanto a coleta dos pontos de interesse foi conduzida por meio de locomoção manual, assegurando uma amostragem detalhada e representativa da área de estudo.

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), disponibilizado pelo IBGE, foi empregado como método complementar para determinação das coordenadas geodésicas. Esse método, baseado na utilização de efemérides precisas e correções atmosféricas, permitiu alcançar alta exatidão posicional sem a necessidade de uma estação de referência próxima ou transmissão via GSM das estações da RBMC. O processamento dos dados foi realizado por meio da plataforma IBGE-PPP, utilizando modelos matemáticos avançados e correções fornecidas pelo International GNSS Service (IGS). A acurácia final foi condicionada a fatores como tempo de coleta, geometria dos satélites e qualidade dos dados adquiridos.

Os dados adquiridos com método topográfico clássico com uma Estação Total, permitiu a determinação precisa das coordenadas de pontos no terreno.

Os dados coletados forneceram três informações essenciais: coordenadas Leste (E) e Norte (N) e altitude ortométrica (H). Esses dados foram organizados em um arquivo “.csv” e importados para o software *Agisoft Metashape*, onde foram associados às imagens capturadas pelo Veículo Aéreo Remotamente Pilotado (RPA). Essa etapa garantiu um georreferenciamento preciso das imagens, assegurando a correspondência entre os dados de campo e os registros fotográficos.

2.2.3 Análise comparativa dos dados

Foi realizada uma análise comparativa entre os dados altimétricos adquiridos por meio do sistema NTRIP e as informações pós-processadas pelo método PPP com os dados obtidos por meio de levantamentos com estação total. O objetivo dessa análise foi avaliar a discrepância entre os métodos e determinar a precisão dos dados obtidos por cada abordagem.

A comparação entre os métodos foi realizada por meio da análise das discrepâncias observadas nas coordenadas altimétricas obtidas. Para quantificar a dispersão dos valores em relação ao método de referência, foi aplicado o Erro Médio Quadrático (RMSE) (*Root Mean Square Error – RMSE*) é uma métrica estatística amplamente utilizada para quantificar a precisão de medições geoespaciais, representa a magnitude média dos erros entre valores observados e valores de referência (CHAI; DRAKLER, 2014). A precisão dos métodos GNSS e do NTRIP foi avaliada a partir de pontos de controle de alta acurácia, obtidos por meio do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Esse método baseia-se na utilização de efemérides precisas dos satélites GNSS, disponibilizadas posteriormente por agências espaciais, em um intervalo de aproximadamente 7 a 12 dias após a coleta dos dados. O uso dessas efemérides permite a correção dos erros orbitais e atmosféricos, garantindo coordenadas com precisão centimétrica e tornando o PPP uma referência confiável para a validação dos demais métodos empregados.

A comparação entre os métodos foi conduzida por meio da análise das discrepâncias observadas nas altitudes obtidas por cada técnica. As diferenças entre as cotas altimétricas foram calculadas considerando o Erro Médio Quadrático (RMSE) como métrica estatística para quantificação da dispersão dos valores em relação ao método de referência. Essa abordagem permitiu verificar a acurácia relativa dos levantamentos, identificando possíveis variações sistemáticas e aleatórias que pudessem impactar a precisão dos modelos digitais gerados. Valores mais baixos de RMSE indicam maior acurácia na medição, sendo um parâmetro essencial para validação da qualidade dos dados geoespaciais em aplicações cartográficas, modelagens hidrológicas e monitoramento ambiental (WANG; WEI; Pi, 2023; XU *et al.*, 2024; ZHAO *et al.*, 2022). A equação do RMSE utilizada é dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X \text{ estimado} - X \text{ real})^2}{n}} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

- X estimado representa os valores obtidos pelo método avaliado;
- X real corresponde aos valores de referência;

- n é o número total de observações.

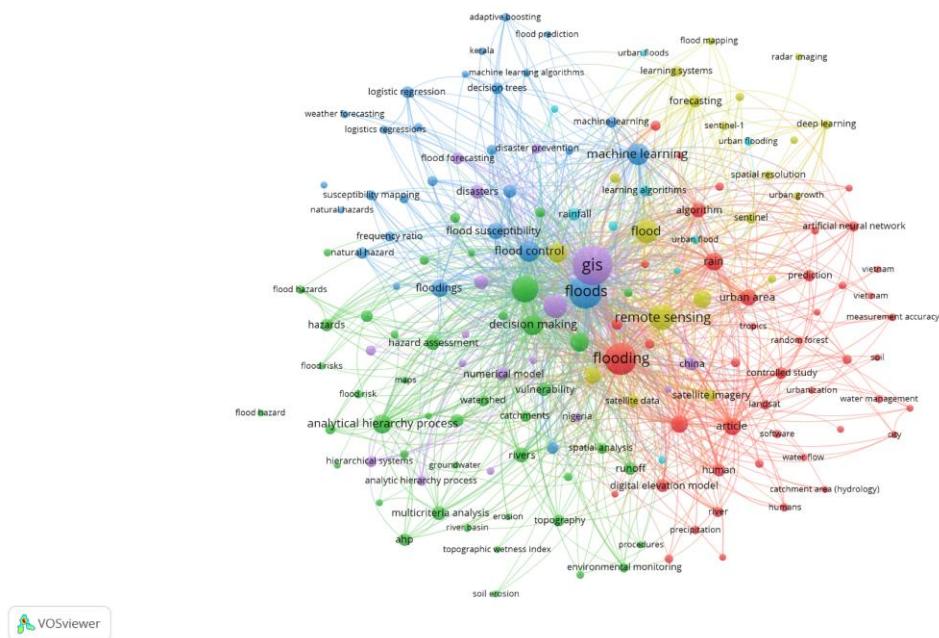
Na avaliação dos pontos foi considerado como referência para “X verdadeiro” as coordenadas obtidas pelo PPP IBGE foram classificadas como “X real” as coordenadas obtidas pelo método RTK-GSM ou topográfico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica quantitativa, fundamentada em um corpus de 215 publicações científicas, revela padrões estatisticamente significativos na literatura contemporânea referente à avaliação de precisão metodológica, implementação de algoritmos de aprendizagem computacional, processos decisórios multicriteriais e modelagem hidrodinâmica. A categorização hierárquica dos descritores em clusters temáticos evidencia distribuições heterogêneas quanto à frequência de ocorrência, força total de acoplamento bibliográfico e temporalidade média das publicações (Figura 3).

Figura 3: Análise de coocorrência pelo VosViewer.



Fonte: os autores, 2024.

A análise bibliométrica revela padrões significativos na literatura científica recente. A avaliação de precisão demonstra relevância contemporânea (225 de força de ligação, 17 ocorrências, média de

publicação em 2022.41), enquanto os processos hierárquicos analíticos (AHP) evidenciam robusta presença na tomada de decisão multicritério, particularmente em estudos ambientais e gestão de risco. O aprendizado de máquina emerge como área fundamental, com "*machine learning*" destacando-se (42 ocorrências, força total de 594) entre algoritmos como árvores de decisão, aprendizado profundo e random forest.

A pesquisa sobre inundações constitui domínio proeminente, com o termo "*flood*" apresentando 47 ocorrências e força de ligação de 632, enquanto termos específicos como "*flood susceptibility mapping*" e "*flood hazards*" reforçam a centralidade desta temática. Os sistemas de informação geográfica representam o núcleo metodológico do campo, com "*geographic information systems*" registrando a maior força de ligação (960) e 62 ocorrências.

A cronologia das publicações indica tendência crescente em temas como riscos de inundaçõa e algoritmos de aprendizado de máquina (média de publicação em 2023), enquanto tópicos como precisão de medição apresentam publicações mais antigas (2020.83), refletindo a evolução das prioridades de pesquisa neste domínio científico.

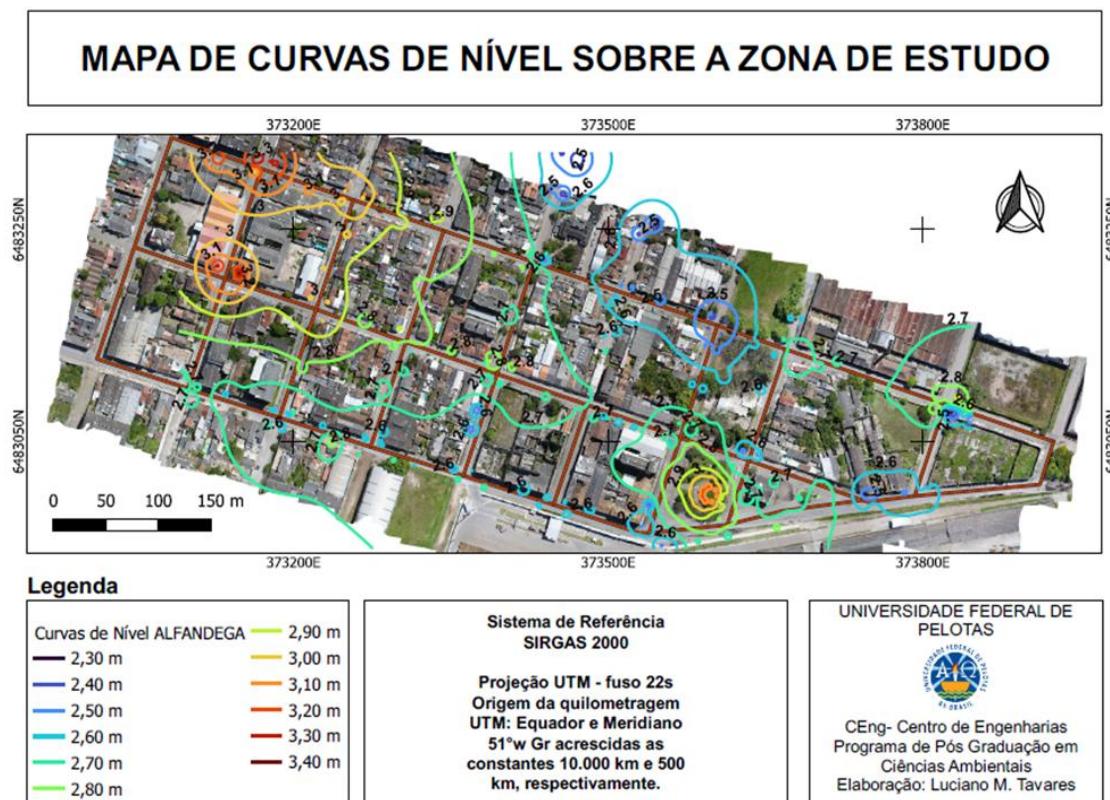
A análise bibliométrica destaca a crescente importância da modelagem ambiental e dos algoritmos de aprendizado de máquina na previsão de desastres naturais, avaliação de riscos e apoio à tomada de decisão. As metodologias estatísticas e de inteligência artificial têm impulsionado avanços na gestão ambiental, apesar dos desafios na integração de dados heterogêneos, aprimoramento da acurácia preditiva e validação longitudinal. A ausência de acesso à base de dados *Web of Science* durante a busca pode ter limitado a abrangência dos resultados.

3.2 ANÁLISE ALTIMÉTRICA E DE RISCO DE INUNDAÇÕES NO BAIRRO PORTO

Os resultados obtidos evidenciaram uma variação altimétrica mínima de 1 metro, com cotas variando entre 2,40 e 3,40 m acima do nível do mar. Uma análise da declividade do terreno, que apresentou valores entre 0% e 14% referente a inclinação, revelou uma baixa capacidade de infiltração da água pluvial, intensificando o risco de inundações, especialmente nas áreas mais baixas e impermeabilizadas do Bairro Porto (KURTZ *et al.*, 2021). Esses dados

tornam-se ainda mais relevantes devido à proximidade do bairro com o Canal São Gonçalo (na região sudeste da Figura 3), principal receptor do escoamento das águas pluviais provenientes do sistema de drenagem urbana da cidade de Pelotas (HANSMANN, 2013).

Figura 3: Mapa de Curvas de Nível.



Fonte: os autores, 2024.

3.3 COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS EMPREGADAS

Os dados adquiridos por meio do GNSS-RTK-GSM demonstraram elevada precisão ao serem comparados com as coordenadas obtidas pelo Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do IBGE, assim como, pelo levantamento com topográfico com Estação Total baseado no ajustamento realizado entre essas medições dos métodos GNSS.

O quadro 2 apresenta a análise da acurácia obtida no ponto 1 e 2.

Quadro 2: Teste de acurácia.

Ponto 1	X (m)	Y (m)	Z (m)	Discrepância X (m)	Discrepância Y (m)	Discrepância Z (m)
PPP IBGE	373597,871	6482955,756	11,850	-	-	-
RTK-GSM	373597,924	6482955,769	11,841	0,053	0,013	-0,009
T0pográfico	373597,942	6482955,780	11,840	0,071	0,024	-0,010
Ponto 2	X (m)	Y (m)	Z (m)	Discrepância X (m)	Discrepância Y (m)	Discrepância Z (m)
PPP IBGE	373560,898	6482950,054	11,660	-	-	-

RTK-GSM	373560,937	6482950,086	11,696	-0,039	0,032	0,036
Topográfico	373560,964	6482950,066	11,695	-0,066	0,012	0,035

Fonte: os autores, 2024.

A análise da acurácia dos levantamentos planialtimétricos realizados com o sistema GNSS RTK-GSM, em comparação com os dados de referência do IBGE, demonstrou uma discrepância centimétrica entre as coordenadas obtidas, evidenciando a elevada precisão do método empregado. Os valores registrados indicam variações milimétricas nas coordenadas X, Y e Z, com um erro médio de apenas 2 cm. Essa margem de discrepância é considerada aceitável no contexto de levantamentos geodésicos de alta precisão voltados para a gestão e planejamento de eventos extremos de inundação e de alagamento em áreas planas, assegurando que as técnicas oferecem a confiabilidade aos dados coletados.

Quadro 3: Classificação das cartas com base na exatidão cartográfica.

Classe	Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico (m)	Erro-Padrão Planimétrico (m)	Altimétrico (m)	Erro-Padrão Altimétrico (m)
A	0,0005	0,0003	0,5	0,333
B	0,0008	0,0005	0,6	0,4
C	0,0010	0,0006	0,75	0,5

Fonte: Adaptado de IBGE, 1989.

A análise dos dados revela que a discrepância entre as coordenadas PPP IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e as obtidas pelo RTK-GSM (*Real Time Kinematic - Global System for Mobile*) permanece em um intervalo centimétrico, com valores máximos de variação de 0,071 m para a Ponto 1 e -0,066 m para a Ponto 2 na coordenada X. As discrepâncias na coordenada Y foram inferiores a 0,032 m, enquanto a variação na altitude (Z) se manteve abaixo de 0,036 m. Os resultados demonstram que o método NTRIP manteve alta consistência com o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Assim como, indicam que a acurácia do GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) RTK-GSM é compatível com levantamentos de alta precisão, atendendo aos critérios da Classe A definidos pelo IBGE.

A comparação entre o ajustamento e o RTK-GSM evidenciou uma maior estabilidade dos valores obtidos com a metodologia RTK-GSM em relação ao ajustamento realizado, especialmente nas coordenadas Y e Z, onde as discrepâncias foram ainda menores. Dessa forma, os resultados reafirmam a confiabilidade dos métodos GNSS na obtenção de coordenadas georreferenciadas, sendo

uma alternativa viável para levantamentos topográficos em regiões urbanas e de baixa declividade, como o Bairro Porto.

Os resultados obtidos demonstram a elevada precisão dos levantamentos altimétricos, com erro médio da ordem de 2 cm, um fator determinante para a gestão e planejamento de inundações em áreas planas. Nessas regiões, pequenas variações na altimetria exercem influência significativa sobre a dinâmica do escoamento superficial, afetando diretamente a distribuição da água e a definição de áreas suscetíveis a alagamentos. Em terrenos de baixa declividade, diferenças sutis na cota do terreno podem modificar o comportamento do fluxo hídrico, alterando padrões de drenagem natural e aumentando a vulnerabilidade de infraestruturas urbanas.

A precisão altimétrica alcançada é essencial para a calibração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e modelos hidrológicos, garantindo que as simulações de inundações sejam mais fidedignas à realidade. Em áreas planas, variações superiores a alguns centímetros podem comprometer a representação do relevo, levando a interpretações equivocadas sobre os caminhos preferenciais do escoamento e a identificação de zonas de acúmulo hídrico.

Além da aplicação na modelagem hidrológica, a obtenção de dados altimétricos precisos desempenha um papel fundamental no planejamento de infraestrutura de drenagem, permitindo o dimensionamento adequado de canais, diques e reservatórios de retenção. A confiabilidade dos levantamentos também favorece o monitoramento de alterações geomorfológicas ao longo do tempo, possibilitando a identificação de processos de sedimentação, erosão e mudanças na rede de drenagem, aspectos essenciais para a manutenção da resiliência hídrica das áreas urbanas e rurais. Assim, a elevada acurácia dos dados geoespaciais obtidos não apenas aprimora o planejamento e a gestão territorial, mas também fortalece a capacidade de resposta a eventos hidrológicos extremos, promovendo maior segurança e sustentabilidade nas regiões suscetíveis a inundações.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente investigação destaca o papel fundamental da modelagem hidrodinâmica e das geotecnologias na avaliação de riscos ambientais, com particular enfoque na gestão de inundações em contextos urbanos. A análise bibliométrica identificou um crescimento notável nas publicações relacionadas à aplicação de inteligência artificial e métodos estatísticos no suporte à tomada de decisão ambiental, evidenciado pela preponderância de termos como "*machine learning*", "*flood risk assessment*" e "*geographic information systems*". Esta tendência reflete a progressiva integração dessas abordagens nas estratégias de previsão de desastres e mitigação de impactos climáticos.

A fusão de dados aerofotogramétricos e plano-altimétricos possibilitou o desenvolvimento de produtos cartográficos de elevada confiabilidade, notadamente o Modelo Digital de Elevação (MDE) e o ortomosaico. Tais produtos constituem fundamento essencial para o planejamento urbano e gestão de riscos hidrológicos, fornecendo bases técnicas imprescindíveis para implementação de sistemas de drenagem otimizados e medidas preventivas em áreas vulneráveis a um baixo custo financeiro. A análise altimétrica do Bairro Porto confirmou sua reduzida capacidade de infiltração pluvial, intensificando sua vulnerabilidade a alagamentos, particularmente devido à proximidade com o Canal São Gonçalo.

A convergência entre geotecnologias e ferramentas de análise espacial, como os Sistemas de Informação Geográfica, potencializa as capacidades de diagnóstico e monitoramento de áreas críticas, permitindo identificar padrões espaciais e tendências temporais. Esta aproximação multidisciplinar facilita a elaboração de políticas públicas mais eficazes, direcionadas tanto à mitigação de desastres quanto à adaptação a eventos climáticos extremos.

Os resultados destacam a relevância do planejamento urbano baseado em dados precisos para minimizar os efeitos de inundações em áreas vulneráveis. As geotecnologias são ferramentas-chave para promover cidades resilientes, oferecendo uma visão integrada do território e suporte a ações estratégicas. As conclusões estão alinhadas à Agenda 2030, principalmente aos ODS 6 (gestão sustentável da água), 11 (cidades sustentáveis) e 15 (preservação ambiental). Estudos futuros em escalas maiores poderiam aprimorar a precisão das análises, porém demandariam mais tempo, recursos e poderiam ampliar riscos de erros, devido à complexidade na coleta e processamento de dados.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 13133: Levantamento topográfico. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Disponível em: <http://www.carto.eng.uerj.br/cdecart/download/NBR13133.pdf>. Acesso em: 06 set. 2024.

ABNT. NBR 14166: Rede de Referência Cadastral Municipal - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. Disponível em: <https://licenciamento.recife.pe.gov.br/sites/default/files/NBR14166.pdf>. Acesso em: jan. 2024.

ALIBAŠIĆ, H. Strategic resilience and sustainability planning: management strategies for sustainable and climate-resilient communities and organizations. Cham: Springer International Publishing, 2022. (Sustainable Development Goals Series). Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-91159-1>. DOI: 10.1007/978-3-030-91159-1. Acesso em: 01 jan. 2025.

ASSEMBLEIA GERAL DA ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 22 jun. 1984. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/legislacao/legisla_decreto_89817_d.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

BRUCH, A. F. et al. Avaliação da acurácia das cubagens de volumes de mineração através de levantamentos convencionais e fotogramétricos. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 1, p. 283-298, 2019. DOI: 10.26848/rbgf.v12.1.p283-298.

CARRION, D. Satellite imagery and GIS to assess urban expansion from a risk perspective. 2019. Tese (Doutorado) – Politecnico di Milano, [s.l.], 2019. Disponível em: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/152780/3/Thesis_Chiara%20Gerosa.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014. DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014.

DA SILVA, Larissa Aldrighi et al. Resiliência urbana: uma análise para desenvolvimento da terminologia. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 18, n. 2, p. 1190-1211, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1190-1211.

DU, J. et al. Remote sensing of environmental changes in cold regions: methods, achievements and challenges. Remote Sensing, v. 11, n. 16, p. 1952, 2019. DOI: 10.3390/rs11161952.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

GHAFFARIAN, S.; KERLE, N.; FILATOVA, T. Remote sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: a review. Remote Sensing, v. 10, n. 11, p. 1760, 2018. DOI: 10.3390/rs10111760.

GUO, H. et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on hydrological ecosystem services in a rapidly urbanizing lake basin in China. *Sustainability*, v. 14, n. 8, p. 4424, 2022. DOI: 10.3390/su14084424.

GUPTHA, G. C. et al. Evaluation of an urban drainage system and its resilience using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 23, p. 100601, 2021. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100601.

HEMMATI, M.; ELLINGWOOD, B. R.; MAHMOUD, H. N. The role of urban growth in resilience of communities under flood risk. *Earth's Future*, v. 8, n. 3, p. e2019EF001382, 2020. DOI: 10.1029/2019EF001382.

HETTIARACHCHI, S.; WASKO, C.; SHARMA, A. Increase in flood risk resulting from climate change in a developed urban watershed – the role of storm temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, n. 3, p. 2041-2056, 2018. DOI: 10.5194/hess-22-2041-2018.

KALANTARI, Z. et al. Meeting sustainable development challenges in growing cities: coupled social-ecological systems modeling of land use and water changes. *Journal of Environmental Management*, v. 245, p. 471-480, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.086.

KURTZ, L.; CASTRO, A. S.; LEANDRO, D. Alterações no ciclo hidrológico local - estudo de caso: Avenida Saldanha Marinho, Pelotas, RS. *Revista de Geografia*, v. 38, n. 2, p. 164-184, 2021. DOI: 10.51359/2238-6211.2021.246119.

MADEIRA, P. M. et al. Plataforma ODSlocal, as metas dos ODS 2030 e os municípios portugueses. In: Colóquio Ibérico de Geografia, CIG22. Anais Eletrônicos. Salamanca, Portugal, 2023. Disponível em: https://strapi36.odslocal.pt/uploads/OD_Slocal_adaptacao_Metas_e83d621a41.pdf. Acesso em: fev. 2024.

MANFREDA, S. et al. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote Sensing*, v. 10, n. 4, p. 641, 2018. DOI: 10.3390/rs10040641.

MARELLE, L. et al. Urbanization in megacities increases the frequency of extreme precipitation events far more than their intensity. *Environmental Research Letters*, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abcc8f>. Acesso em: 08 jan. 2025.

MARK, O. et al. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, v. 299, n. 3-4, p. 284-299, 2004. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.014.

METASHAPE. User manual. 2022. Disponível em: <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

MILLER, J. D.; HUTCHINS, M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: a review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 12, p. 345-362, 2017. DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.06.006.

MOREIRA, L. A.; KRUEGER, C. P. Análise de precisão e acurácia de métodos de posicionamento em tempo real na determinação de desniveis. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 8, n. 1, p. 31-25, 2020. DOI: 10.3895/rbgeo.v8n1.9843.

ONU (Organização das Nações Unidas). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PAIVA, A. C. D. E. et al. Urban expansion and its impact on water security: the case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 720, p. 137509, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137509.

RAMACHANDRAN, Duraisamy vpc v. 891-913, 2018. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-8016-6_64. Acesso em: 25 fev. 2025.

SEEMUANGNGAM, A.; LIN, H.-L. The impact of urbanization on urban flood risk of Nakhon Ratchasima, Thailand. *Applied Geography*, v. 162, p. 103152, 2024. DOI: 10.1016/j.apgeog.2023.103152.

SHEFFIELD, J. et al. Satellite remote sensing for water resources management: potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*, v. 54, n. 12, p. 9724-9758, 2018. DOI: 10.1029/2017WR022437.

SOKOLOVA, M. V. et al. The role of green infrastructure in providing urban ecosystem services: insights from a bibliometric perspective. *Land*, v. 13, n. 10, p. 1664, 2024. DOI: 10.3390/land13101664.

TANG, Q. et al. Remote sensing: hydrology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, v. 33, n. 4, p. 490-509, 2009. DOI: 10.1177/0309133309346650.

WANG, Mi; WEI, Yu; PI, Yingdong. Geometric positioning integrating optical satellite stereo imagery and a global database of ICESat-2 laser control points: a framework and key technologies. *Geo-spatial Information Science*, v. 26, n. 2, p. 206-217, 2023. DOI: 10.1080/10095020.2022.2159885.

WEI, Y. Urban land expansion and regional inequality in transitional China. *Landscape and Urban Planning*, v. 163, p. 17-31, 2017. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.019.

WILLIS, K. S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, v. 182, p. 233-242, 2015. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.12.006.

WOODCOCK, C. E. et al. Transitioning from change detection to monitoring with remote sensing: a paradigm shift. *Remote Sensing of Environment*, v. 238, p. 111558, 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111558.

XU, Weifeng et al. 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. DOI: 10.3390/land10080839.

ZHAO, Shangmin et al. Fusion scheme and implementation based on SRTM1, ASTER GDEM V3, and AW3D30. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 11, n. 3, p. 207, 2022. DOI: 10.3390/ijgi11030207.

ZHU, Z. et al. Urban flood analysis in ungauged drainage basin using short-term and high-resolution remotely sensed rainfall records. *Remote Sensing*, v. 13, n. 11, p. 2204, 2021. DOI: 10.3390/rs13112204.

ZOPE, P. E.; ELDHO, T. I.; JOTHPRAKASH, V. Impacts of land use–land cover change and urbanization on flooding: a case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *CATENA*, v. 145, p. 142-154, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.06.009.