

Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) na Avaliação da Mancha de Inundação da Enchente de 2024 no Município de Pelotas-RS

Application of the Roughness Concentration Index (Rci) in the Assessment of the Flood Extent of the 2024 Flood Event in the Municipality of Pelotas-RS

Tainara Goulart Corrêa¹

Tássia Parada Sampaio²

Luciano Martins Tavares³

Diuliana Leandro⁴

Pascal Silas THUE⁵

Robson Andreazza⁶

Maurizio Silveira Quadros⁷

Palavras-chave

ICR
SIG
Mancha de
Inundação
ODS
Enchentes

Resumo

O presente estudo investiga o aumento na frequência de eventos catastróficos, como enchentes urbanas, e suas consequências sociais e econômicas. A pesquisa enfatiza que a intensidade e o padrão da precipitação são fatores determinantes no agravamento dos impactos das inundações, especialmente em áreas urbanas vulneráveis. O objetivo geral é avaliar a mancha de inundação causada pela enchente de 2024 em Pelotas, Rio Grande do Sul, por meio do Índice de Concentração da Rugosidade (ICR). O ICR é uma técnica utilizada na geomorfologia para analisar a superfície terrestre, identificando áreas com características homogêneas de relevo, especialmente no que se refere à distribuição da rugosidade. Os objetivos específicos incluem a identificação e caracterização das zonas de maior e menor rugosidade dentro da mancha de inundação, correlacionando-as com sua extensão e profundidade. A metodologia baseou-se na aplicação de técnicas de geoprocessamento em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com a organização de uma base cartográfica detalhada e a extração de dados altimétricos do município. Os resultados mostraram que o ICR é uma ferramenta eficaz para a análise morfométrica do terreno, permitindo identificar padrões de rugosidade que influenciam diretamente o comportamento dos fluxos hídricos durante eventos extremos. Áreas com baixa rugosidade apresentaram maior acúmulo de água, enquanto zonas com elevada rugosidade atuaram como barreiras naturais, influenciando a dispersão e a profundidade da inundação. Conclui-se que a aplicação do ICR pode fornecer subsídios valiosos para o planejamento urbano e a gestão de riscos em áreas suscetíveis a inundações, contribuindo diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 1, 11 e 13, ao promover cidades mais resilientes e sustentáveis.

Keywords

RCI
GIS
Flood Extent
SDGs
Floods

Abstract

The present study investigates the increasing recurrence of catastrophic events, particularly urban flooding, and their associated social and economic impacts. The research underscores the role of precipitation intensity and spatial-temporal patterns as critical drivers exacerbating flood events, especially in socially and geographically vulnerable urban areas. The main objective is to assess the flood extent generated by the 2024 flood event in Pelotas, Rio Grande do Sul, through the application of the Rugosity Concentration Index (RCI). The RCI is a geomorphological technique used to analyze the Earth's surface, identifying areas with homogeneous terrain characteristics, particularly regarding surface roughness distribution. Specific objectives include the identification and characterization of zones with varying degrees of rugosity within the flood extent, correlating these patterns with spatial coverage and water depth. The methodological framework employed advanced Geographic Information System (GIS) techniques for spatial data processing, including the development of a detailed cartographic base and the extraction of elevation data from municipal altimetry datasets. The results demonstrate the effectiveness of the RCI in detecting morphometric patterns and quantifying terrain roughness, contributing to a better understanding of hydrological redistribution processes during extreme events. Critical areas were identified where terrain rugosity significantly influenced both the spatial extent and depth of floodwaters. The study concludes that the integration of the RCI into flood risk assessments can offer strategic insights for urban planning and disaster risk reduction, supporting the implementation of Sustainable Development Goals (SDGs) 1, 11, and 13, and promoting the development of resilient and sustainable urban environments.

¹ Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. tainaragoulart15@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. tssiap.sampaio@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. rstchemartins@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. diuliana.leandro@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. pascalsilasthue@gmail.com

⁶ Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. robsonandreazza@yahoo.com.br

⁷ Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas, RS, Brasil. mausq@ufpel.edu.br

INTRODUÇÃO

De acordo com o Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (CRED), a frequência de eventos catastróficos registrados em 2022 superou a média entre 2002 e 2021 (CRED, 2023). Além dos danos diretos, às enchentes urbanas geram impactos sociais e econômicos expressivos, como o empobrecimento populacional, degradação do ambiente urbano e prejuízos à renda. A situação se agrava com falhas em infraestruturas críticas, como o fornecimento de energia, comprometendo a recuperação das populações atingidas (Guimarães *et al.*, 2021).

A intensificação e variabilidade do regime pluviométrico ampliam os impactos de eventos extremos, com picos de precipitação associados a danos mais severos e menor tempo de resposta (Mei *et al.*, 2020). Populações urbanas de baixa renda são particularmente vulneráveis, com maior suscetibilidade a comorbidades pós-enchente e efeitos prolongados na saúde física e mental (Escobar Carías *et al.*, 2022). Enchentes urbanas também representam risco à saúde pública e ambiental devido à dispersão de patógenos e ao colapso de sistemas de esgoto (Kim *et al.*, 2022).

As inundações entre abril e maio de 2024, causadas por um anticiclone migratório sobre o Atlântico Sul que impulsionou massas de ar quente e úmido para o interior do continente, resultaram em chuvas extremas no Rio Grande do Sul. O evento afetou mais de 9.000 localidades, com destaque para Pelotas, São José do Norte, Rio Grande e São Lourenço do Sul, que decretaram estado de calamidade pública devido a severos prejuízos urbanos, agrícolas e na infraestrutura viária (BBC, 2024; Azevedo, 2024).

Diante da necessidade crescente de aprimorar o planejamento urbano e a gestão de riscos, os mapas de suscetibilidade à inundação constituem ferramenta estratégica. A integração de métricas geomorfológicas permite identificar e hierarquizar áreas críticas, subsidiando ações preventivas e de mitigação (Pace, 2022). Entre essas métricas, destaca-se o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR), relevante na análise geomorfológica por avaliar a homogeneidade do relevo a partir da variação das declividades. O índice contribui para a delimitação de unidades morfométricas, facilitando a compreensão da dinâmica superficial e sua relação com processos hidrológicos (Paz; Sampaio, 2016). A literatura, entretanto, evidencia uma lacuna quanto à aplicação do ICR em estudos de suscetibilidade

à inundação, o que reforça a pertinência da abordagem proposta.

Estudos como os de Flores e Oliveira (2016) demonstram que o ICR é uma métrica eficaz na identificação da fragmentação do relevo e no mapeamento das inclinações do solo e da vegetação (Araújo *et al.*, 2022). Sua aplicação também contribui para localizar regiões com diferentes graus de influência tectônica, sendo útil na prevenção de desastres ambientais (Morais; Fernandes, 2023). Por meio da análise de lineamentos, o ICR evidencia áreas com diferentes níveis de incisão fluvial, favorecendo a interpretação da dinâmica geomorfológica, sobretudo em zonas de falha e fratura (Flores; Oliveira, 2016).

Essa abordagem é essencial para estudos geomorfológicos, por oferecer leitura detalhada das características físicas do terreno, auxiliando na diferenciação de padrões globais e locais de relevo (Sousa *et al.*, 2016; Fan, 2022). Trata-se, portanto, de ferramenta com elevada relevância morfométrica, eficaz em análises ambientais e de mapeamento (Navarro, 2023).

Considerando o potencial analítico do ICR, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a mancha de inundação provocada pela enchente de 2024 no município de Pelotas-RS. Utiliza-se o ICR como ferramenta central para identificar padrões de rugosidade do relevo que influenciam a extensão e a profundidade das áreas alagadas. Os objetivos específicos envolvem a análise das zonas com maior e menor rugosidade dentro da mancha de inundação, relacionando essas variáveis às dinâmicas de escoamento superficial.

Este estudo também se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com ênfase nos objetivos 1 (Erradicação da pobreza), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao oferecer subsídios técnicos para políticas públicas voltadas à resiliência urbana e à redução da vulnerabilidade frente a desastres ambientais (ONU Brasil, 2024; Governo Federal; Silva, 2018).

Ao analisar criticamente a relação entre eventos extremos e as características geomorfológicas urbanas, com foco na enchente de 2024 em Pelotas-RS, esta pesquisa contribui para o entendimento dos condicionantes espaciais das inundações e para o aperfeiçoamento das estratégias de mitigação diante da intensificação dos impactos climáticos sobre os centros urbanos brasileiros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Análise Bibliométrica

Com o objetivo de fundamentar a discussão teórica e evidenciar a relevância da temática, este estudo conduziu uma análise bibliométrica sobre a aplicabilidade do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR). Foram selecionadas cinco palavras-chave: *Roughness Concentration Index* (ICR), *Urban flood*, *Digital Elevation Models* (DEM), *Flood damage assessment* e *Relief Dissection*.

A escolha das palavras-chave considerou aspectos metodológicos e aplicações práticas da pesquisa. *Roughness Concentration Index* (ICR) direcionou a busca para estudos sobre a métrica central, enquanto *Urban flood* e *Flood damage assessment* ampliaram a investigação sobre inundações em áreas urbanas. *Digital Elevation Models* (DEM) representaram o relevo e permitiram o cálculo do ICR. *Relief Dissection* contribuiu para a análise da compartimentação morfológica do terreno e sua influência na suscetibilidade a inundações. A seleção dos descritores garantiu uma abordagem abrangente e integrada ao tema.

No entanto, a investigação apresentou limitações quanto à disponibilidade de dados em bases consolidadas, como a Scopus. Observou-se escassez significativa de artigos, em inglês e português, especificamente sobre o uso do ICR em análises de alagamentos e morfometria do relevo. Embora essa limitação represente um obstáculo metodológico, evidencia o caráter inédito e inovador da abordagem, conferindo originalidade à pesquisa.

Os dados bibliográficos foram organizados e analisados no software VOSviewer (disponível gratuitamente sob licença pública) (Van Eck; Waltman, 2025), que permite a criação de Mapas de Coocorrência. Esses mapas são representações visuais que evidenciam a frequência com que termos ou autores aparecem em conjunto nas publicações científicas, permitindo identificar padrões temáticos, redes de colaboração e lacunas na literatura (Luiz *et al.*, 2023). O VOSviewer destaca-se por sua interface intuitiva e pela possibilidade de exportar dados para outras plataformas, ampliando sua aplicabilidade em revisões sistemáticas e estudos exploratórios.

Além das limitações bibliográficas, o estudo enfrentou restrições metodológicas relacionadas à resolução e acurácia dos Modelos Digitais de Terreno (MDTs) utilizados. A aplicação do ICR exige dados de alta qualidade, cuja confiabilidade pode ser comprometida em áreas

urbanas com vegetação densa ou edificações. A precisão dos MDTs influencia diretamente os cálculos de declividade e os resultados do índice, ressaltando a importância de considerar as incertezas associadas aos dados de entrada na interpretação final.

Mapeamento Automatizado

Para alcançar o objetivo proposto, a primeira etapa consistiu na delimitação da área de estudo. A cidade de Pelotas, localizada no entorno da Lagoa dos Patos, foi selecionada devido ao impacto significativo das enchentes de maio de 2024. Sendo uma das mais afetadas da região, tornou-se um local de interesse para investigar os efeitos das inundações e aplicar índices de análise, como o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) na avaliação da extensão e dinâmica da mancha de inundação. Essa seleção visa compreender melhor as dinâmicas associadas às cheias e contribuir para o aprimoramento de estratégias de mitigação de desastres naturais.

Os Modelos Digitais de Terreno (MDTs) são ferramentas versáteis na análise geográfica, aplicáveis ao mapeamento de vulnerabilidades, à classificação de atributos topográficos e à identificação de áreas suscetíveis a impactos antrópicos (Paz; Sampaio, 2017). A compreensão dos aspectos físicos da paisagem em escala de bacia hidrográfica, como relevo, morfometria e dinâmica hídrica, é fundamental. A distribuição e densidade da drenagem são controladas principalmente pelo gradiente topográfico e pela rede hidrográfica, elementos que subsidiam a análise de suscetibilidades e o planejamento ambiental (Simonetti *et al.*, 2022).

A integração entre sensoriamento remoto, SIGs e modelos matemáticos têm ampliado a análise geomorfológica. Os MDTs incorporam informações de solo, drenagem e declividade, proporcionando uma leitura integrada da paisagem, enquanto os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) priorizam a representação topográfica. A aplicação desses modelos favorece a formulação de cenários preventivos e o aprimoramento da gestão ambiental e territorial.

A metodologia empregada por Sampaio (2008) para identificação de unidades homogêneas do relevo utiliza o processamento matemático de pixels em MDEs, possibilitando a análise quantitativa da forma das vertentes e da dissecação do relevo. A técnica fundamenta-se na avaliação das curvaturas verticais e horizontais, permitindo uma classificação precisa do relevo quanto aos termos

morfométricos (Júnior *et al.*, 2015; Sampaio, 2017).

A área de estudo integra a região hidrográfica das bacias litorâneas, delimitada pela bacia Mirim-São Gonçalo, uma das três grandes regiões hidrográficas do Rio Grande do Sul (Neves, 2012). Com 28.499 km², a bacia tinha, em 2020, uma população de 770.308 habitantes, sendo 684.202 urbanos e 86.106 rurais (Rio Grande do Sul, 2020). A proporção da área correspondente de Pelotas na bacia é de 90%.

Após a definição da área de estudo, a análise dos dados foi realizada com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A base cartográfica foi organizada com dados altimétricos obtidos por meio do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - TOPODATA. A partir desses dados, iniciou-se uma série de procedimentos necessários para o cálculo do ICR, garantindo uma abordagem metodológica adequada.

Os dados do TOPODATA foram processados no software QGIS 3.16 (QGIS Development Team, 2025), com inserção das imagens e projeção definida em SIRGAS 2000/UTM zone 22S, onde se delimita a área de estudo. Em seguida, foram extraídas as elevações e obtidos os dados de declividade, categorizados conforme diretrizes do IBGE (2015). Após a definição das classes, a análise foi realizada no mesmo software, resultando na declividade expressa em porcentagem.

Iniciou-se então a elaboração do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR), técnica que permite a identificação de unidades geomorfológicas homogêneas com base em padrões morfométricos de dissecação e declividade (Sampaio; Augustin, 2014). Como esse índice utiliza a declividade como parâmetro fundamental, o primeiro passo foi a conversão dos dados matriciais em pontos vetoriais.

Em seguida, a estimativa de densidade de kernel foi aplicada por meio da ferramenta "Kernel Density" do software ArcGIS 10.2 (ESRI, 2025). Essa técnica calcula a concentração de eventos pontuais, gerando uma superfície contínua que representa a distribuição espacial dos dados (Costa *et al.*, 2019). É especialmente útil para identificar padrões de agrupamento e áreas críticas. Okabe, Satoh e Sugihara (2009) destacam sua aplicação em redes espaciais,

como vias urbanas e margens de rios, mesmo diante de limitações técnicas. Ao suavizar os dados em um plano bidimensional, essa técnica favorece análises espaciais mais precisas, contribuindo para diagnósticos e planejamento.

Na configuração do "Search radius", adotaram-se raios de 282 metros para o cálculo do Índice de Concentração de Rugosidade Local e 564 metros para o Índice de Concentração de Rugosidade Global. A escolha foi fundamentada na metodologia de Sampaio, que recomenda a escala 1:25.000 para análises morfométricas. Essa escala é adequada à área urbana de Pelotas, considerando sua extensão territorial e a necessidade de detalhamento das variações de relevo que influenciam diretamente na dinâmica das águas pluviais e nas áreas suscetíveis à inundação.

Após essa etapa, os índices foram classificados onde o ICR Local se subdividiu em cinco classes, determinadas a partir dos quartis, e o ICR Global em seis classes, conforme a metodologia de Sampaio e Augustin (2014). Essa categorização permite análise detalhada da variabilidade da rugosidade em diferentes escalas espaciais.

Com a proposta de analisar a mancha de inundação e após a obtenção dos dados do ICR, realizou-se a sobreposição entre a mancha da enchente de 2024 em Pelotas e os valores de ICR. A análise considerou o cenário em que o nível da Lagoa dos Patos atingiu 3,13 metros, permitindo correlacionar a extensão da área inundada com os diferentes níveis de rugosidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapa de Coocorrências

O mapa de coocorrências das palavras-chave ajuda a visualizar as conexões temáticas na literatura científica sobre inundações urbanas. As palavras-chave analisadas estão ligadas às dinâmicas das inundações em áreas urbanizadas, sendo relevantes para estudos acadêmicos e gestão de desastres. Os termos mais frequentes são: "Urban flood", "flood damage assessment" e "flood disaster management", que se destacam como conceitos centrais na revisão da literatura (figura 1)

Figura 1- Mapa de Coocorrências gerado pelo VosViewer



Fonte: Os autores (2024).

A análise temporal do corpus bibliográfico abrangeu um período de 33 anos (1991–2024), sem restrições cronológicas, a fim de incorporar estudos considerados “clássicos”. O ano médio de publicação, 2020, evidencia uma intensificação recente da produção científica, diretamente associada ao aumento de eventos hidrometeorológicos extremos, atribuídos às mudanças climáticas e à urbanização não planejada. A análise de coocorrência de palavras-chave, visualizada com o *software* VOSviewer, revelou um agrupamento central de termos interligados, destacando as principais áreas temáticas da literatura científica sobre inundações urbanas.

Os *clusters* indicam a existência de núcleos temáticos fortemente conectados, refletindo o enfoque em gestão de desastres e políticas de mitigação, por meio do termo “*flood disaster management*”, e na avaliação de impactos causados por eventos extremos, identificado por “*flood damage assessment*”. A expressão “*urban flood*” reflete a crescente preocupação com os ambientes urbanos, enquanto “*design rainstorms*” e “*numerical simulations*” apontam para o uso de abordagens preditivas e o planejamento de cenários, demonstrando o uso cada vez mais recorrente de ferramentas de simulação e modelagem numérica no estudo de inundações. Complementarmente, termos como *Roughness Concentration Index* (ICR) e *relief dissection*, embora menos frequentes,

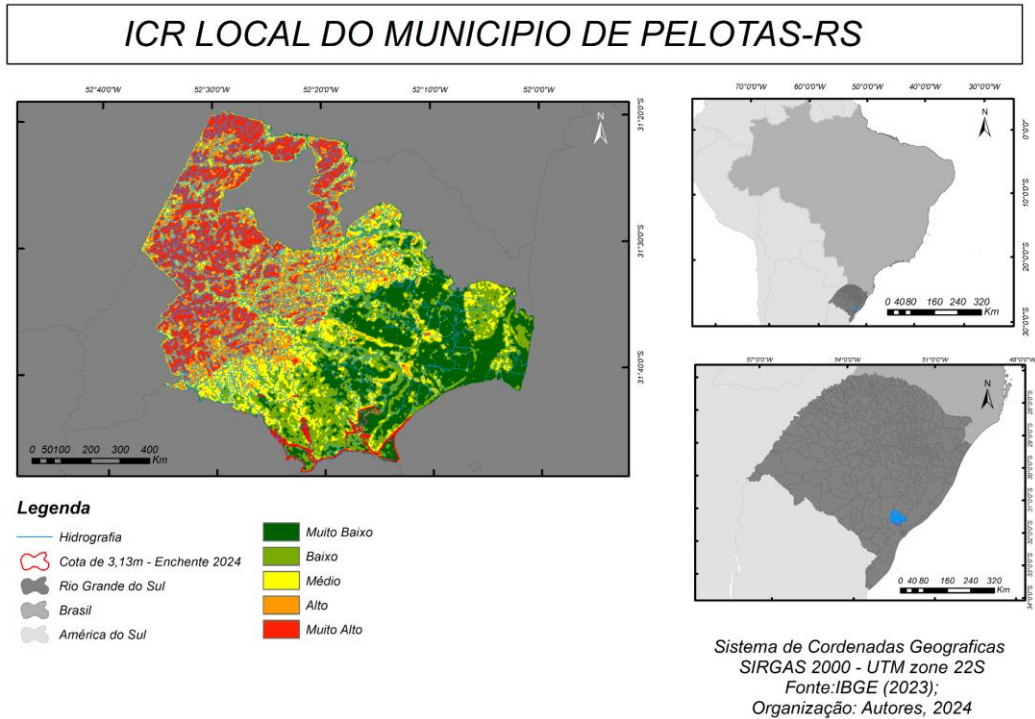
evidenciam abordagens emergentes que integram análises geomorfológicas às práticas de previsão e manejo de inundações. Onde o ICR permite identificar áreas com maior rugosidade topográfica. Por conseguinte, mais suscetíveis à concentração de escoamento superficial, enquanto a dissecação do relevo contribui para a compreensão da fragmentação do terreno e de sua influência sobre os padrões de drenagem.

Os resultados da análise bibliométrica, reforçam não apenas a relevância científica crescente do tema, mas também a urgência em aprofundar estratégias de adaptação e mitigação diante do cenário atual de intensificação dos eventos climáticos extremos em áreas urbanas.

Índice de Concentração de Rugosidade Local

A análise detalhada dos resultados encontrados evidenciam uma correlação direta entre as menores rugosidades locais do relevo e a extensão da mancha de inundação de 3,13m registrada na cidade de Pelotas-RS no ano de 2024 (Figura 2). Esse padrão reforça a relevância de integrar variáveis geomorfológicas, suas interações espaciais e os padrões morfológicos subjacentes em estudos voltados à análise de riscos e ao planejamento territorial.

Figura 2 - Mapa do Índice de Concentração da Rugosidade Local (ICR Local) do município de Pelotas-RS



Fonte: Os autores (2024).

Conforme metodologia de Sampaio e Augustin (2014) e aplicabilidade de Paganotto (2022), o ICR local foi dividido em cinco classes baseadas em quartis (Tabela 1).

Tabela 1- Análise do índice de concentração de rugosidade local na mancha de inundação da cidade de Pelotas em 2024

Índice de Concentração de Rugosidade Loca	Área Total de Pelotas-RS (km²)	Área Total na Mancha de Inundação de 2024 em Pelotas-RS (km²)
Muito Baixa	316,42	13,75
Baixa	329,75	15,45
Média	318,90	1,90
Alta	313,68	0,025
Muito Alta	330,45	—

Fonte: Os autores (2024).

O quadro apresenta a relação entre o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) e a distribuição espacial da área total de Pelotas-RS em comparação com a área afetada pela mancha de inundação de 2024. Os resultados indicam que as áreas classificadas com rugosidade “Muito Baixa” e “Baixa” foram as mais impactadas, somando 13,75 km² e 15,45 km² das regiões inundadas, respectivamente. Esses valores correspondem às maiores extensões afetadas, o que evidencia a vulnerabilidade dessas superfícies ao alagamento. Superfícies de

baixa rugosidade, por apresentarem menor resistência ao escoamento superficial, favorecem a rápida propagação da lâmina d’água e dificultam o amortecimento do fluxo hídrico. Esse comportamento hidrológico resulta em maior acúmulo de água e contribui para a intensificação e expansão da área de inundação. Em contraste com as áreas de baixa rugosidade, as classes de rugosidade “Média”, “Alta” e “Muito Alta” apresentaram uma interação significativamente menor. As áreas com rugosidade “Média” registraram uma

extensão inundada de apenas 1,90 km², enquanto as de rugosidade "Alta" totalizaram apenas 0,025 km², valor praticamente residual. Notavelmente, nas regiões classificadas como "Muito Alta", não foi observada qualquer sobreposição com a área de inundação. Esse padrão evidencia o papel da rugosidade elevada como barreira natural ao avanço da lâmina d'água, uma vez que superfícies mais irregulares e fragmentadas contribuem para a dissipação da energia do escoamento superficial, favorecendo a infiltração e retardando o acúmulo de água em superfície. Além disso, a maior complexidade topográfica dessas áreas tende a direcionar o fluxo para as zonas de menor cota e menor rugosidade, funcionando como áreas de proteção natural contra a propagação da inundação.

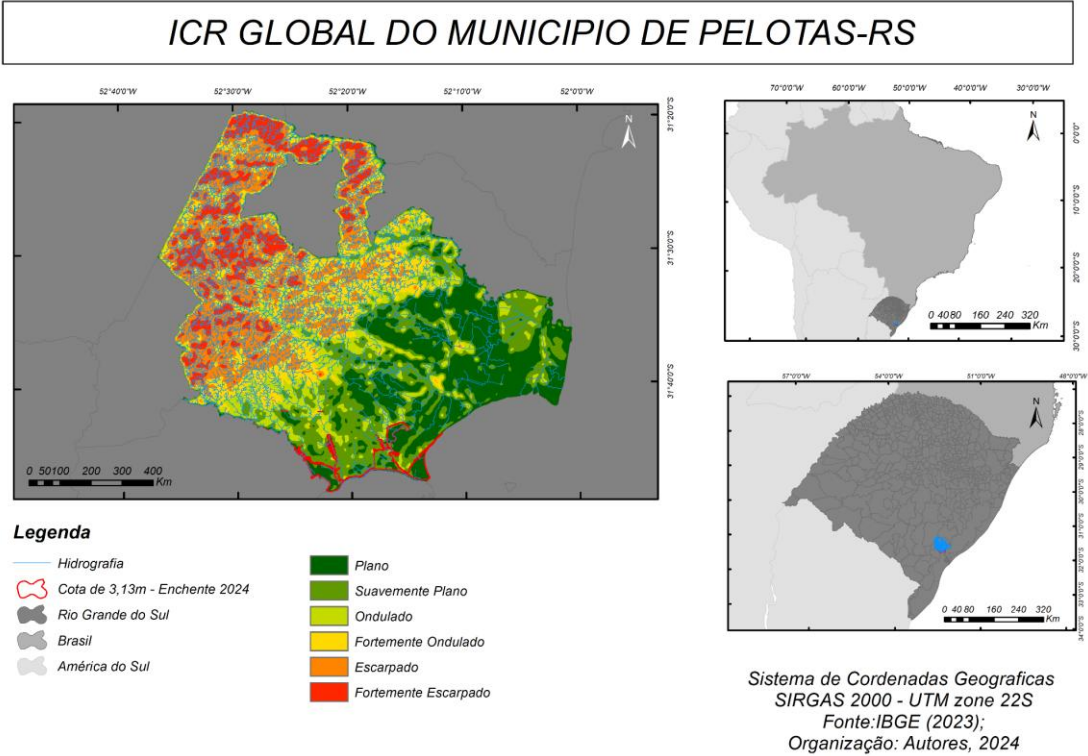
Observa-se que a ausência de sobreposição entre a classe de rugosidade "Muito Alta" e a mancha de inundação de 2024 se deve à localização dessas áreas, conforme identificado na análise espacial. Essas zonas, geralmente associadas a terrenos de maior declividade e topografia acentuada, favorecem o rápido

escoamento das águas pluviais e limitam o acúmulo superficial. Como resultado, apresentam baixa suscetibilidade à inundação, funcionando como áreas de escoamento natural que evitam a concentração de fluxo e a formação de alagamentos.

Índice de Concentração de Rugosidade Global

Para a aplicação do ICR Global, adotou-se a mesma metodologia empregada no cálculo do ICR Local, diferenciando-se pela classificação dos resultados em seis classes, conforme Sampaio e Augostin (2014). As classes foram definidas com base nos valores do ICR: plano (ICR abaixo de 2,5), indicando superfícies com mínima variação altimétrica; suavemente ondulado (ICR de 2,5 a 6), áreas com leve irregularidade; ondulado (ICR de 6 a 14), terrenos com variação moderada de declividade; fortemente ondulado (ICR de 14 a 30), relevo mais acentuado; escarpado (ICR de 30 a 45), áreas de alta energia de relevo; e fortemente escarpado (ICR acima de 45), correspondendo aos terrenos mais acidentados (Figura 3).

Figura 3 - Mapa do Índice de Concentração da Rugosidade Local (ICR global) do município de Pelotas-RS



Fonte: Os autores (2024).

Notou-se que as classes deste índice não se mantinham uniforme por toda área de estudo. Visto isso, analisou-se como se dividia esta classificação na mancha de inundação. A mancha de inundação corresponde ao evento hidrológico extremo ocorrido em maio de 2024 no município de Pelotas (RS), caracteriza-se como a representação espacial das áreas alagadas, mapeada por meio da interpretação de dados de sensoriamento remoto e/ou validação em campo, evidenciando a extensão e a gravidade do impacto hidrometeorológico na região.

Tabela 2 - Análise do índice de concentração de rugosidade global na mancha de inundação da cidade de Pelotas em 2024

Índice de Concentração de Rugosidade Global	Área Total de Pelotas-RS (km²)	Área Total na Mancha de Inundação de 2024 em Pelotas-RS (km²)
Plano	305,05	18,11
Suavemente Ondulado	309,33	11,63
Ondulado	207,81	0,55
Fortemente Ondulado	239,86	0,00272
Escarpado	335,91	—
Fortemente Escarpado	166,28	—

Fonte: Os autores (2024).

A tabela 2 apresentado relaciona o índice de concentração de rugosidade global ao impacto da mancha de inundação de 2024 na cidade de Pelotas-RS, apresentando dados que revelam uma clara influência do padrão de relevo global na suscetibilidade à inundação, destacando as áreas planas como as mais afetadas, com 18,11

km² inundados, seguidas das áreas suavemente onduladas, que contabilizaram 11,63 km².

A morfologia do relevo exerce influência direta na dinâmica das águas pluviais. Superfícies planas e suavemente onduladas, devido à baixa declividade, apresentam maior tendência ao acúmulo de água, elevando a suscetibilidade a alagamentos. Em contrapartida, em áreas mais declivosas, o escoamento superficial é acelerado, diminuindo a retenção hídrica, porém intensificando o potencial erosivo e o risco de enxurradas concentradas.

Nas categorias com maior ondulação e irregularidade do relevo, os impactos diminuem substancialmente. Áreas classificadas como "Ondulado" apresentaram apenas 0,55 km² de área inundada, enquanto na categoria "Fortemente Ondulado" a extensão foi mínima, com 0,00272 km². Já as áreas classificadas como "Escarpado" e "Fortemente Escarpado" não registraram valores significativos de inundação, o que sugere que relevo mais acidentado desempenha um papel relevante na dispersão e infiltração das águas, reduzindo a vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos.

Essas evidências reforçam a importância de incorporar a análise do índice de rugosidade local e global em estudos de planejamento territorial e gestão de riscos. A compreensão do comportamento hidrológico a partir da morfologia do terreno é fundamental para definir áreas prioritárias e estratégias de mitigação. Para as regiões mais vulneráveis, recomenda-se o aprimoramento da drenagem urbana, o uso de infraestruturas verdes para aumentar a infiltração e o reforço do monitoramento e do zoneamento para controle da ocupação em áreas de risco. Em uma escala territorial mais ampla, embora a aplicação desse tipo de análise ainda seja mais frequentemente direcionada para estudos de dinâmica erosiva, conforme exemplificado nas investigações de Goulart *et al.* (2018), suas contribuições são igualmente relevantes para a compreensão integrada dos processos geomorfológicos que influenciam a suscetibilidade à inundação e à degradação ambiental. A ampliação dessa abordagem para além dos estudos de erosão representa uma oportunidade promissora para avançar na identificação de áreas críticas e na formulação de políticas públicas mais eficazes para a resiliência urbana e regional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizada destaca a importância de integrar variáveis geomorfológicas na análise de riscos e no planejamento territorial. O Mapa de Coocorrências revelou cinco palavras-chave centrais relacionadas às inundações urbanas, evidenciando a crescente relevância do tema, especialmente diante das consequências adversas das mudanças climáticas e da intensificação dos eventos hidrometeorológicos extremos.

A aplicação do ICR Local demonstrou uma correlação direta entre as menores classes de rugosidade do relevo e a extensão das áreas inundadas. Áreas classificadas como de rugosidade "Muito Baixa" e "Baixa" mostraram-se mais vulneráveis, correspondendo às maiores extensões afetadas, o que reforça a necessidade de considerar a rugosidade do terreno na formulação de estratégias de mitigação e adaptação a eventos extremos.

De forma complementar, o ICR Global indicou que áreas planas e suavemente onduladas são mais suscetíveis a inundações, enquanto regiões com maior acentuação topográfica apresentam menor vulnerabilidade. Esses resultados evidenciam o potencial dos índices de rugosidade como ferramentas de apoio à gestão de riscos e ao ordenamento territorial.

Recomenda-se a adoção de estratégias direcionadas de mitigação, como a ampliação de áreas de amortecimento por meio de parques lineares, o aprimoramento dos sistemas de drenagem urbana e a definição de zonas prioritárias para manejo do risco hídrico, apoiadas em um zoneamento ambiental criterioso. A integração dos índices de rugosidade em instrumentos de planejamento territorial, como os planos diretores e estudos de impacto ambiental, contribui para aumentar a resiliência urbana diante dos eventos de inundação.

Por fim, destaca-se a relevância de futuras pesquisas que aprofundem a relação entre rugosidade do relevo, grau de impermeabilização do solo e a eficiência dos sistemas de drenagem urbana. Investigações nesse sentido podem ampliar a aplicabilidade dos índices analisados, promovendo soluções mais integradas e eficazes para a gestão de inundações urbanas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. P. C.; SILVA, F. A. D.; NAZAR, T. I. S. M. Uso de Técnicas Geomorfométricas para Identificação dos Padrões de Relevo na Bacia do Rio Preto, no Planalto Ocidental Paulista. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 34, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64869>
- AZEVEDO, A. L. Anticiclone que causou chuvas no RS criou domo invisível que provoca calorão no Rio de Janeiro: entenda. **O Globo**, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/05/04/anticiclone-que-causou-chuvas-o-rs-criou-domo-invisivel-que-provoca-calorao-no-rio-de-janeiro-entenda.ghtml>. Acesso em: 14 out. 2024.
- BC News Brasil. Enchentes em Pelotas: análise da situação. **BBC**, 2024. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/clllv0d62zjo>. Acesso em: 28 out. 2024.
- BEUMIER, C; IDRISSE, M. Deriving a DTM from a DSM by uniform regions and context. **EARSeL eProceedings**, 2015. <https://doi.org/10.12760/01-2015-1-02>
- COSTA, I.; ROCHEDO, P.; COSTA, D.; FERREIRA, P.; ÁRAUJO, M.; SHAEFFER, R.; SZKLO, A. Placing hubs in CO2 pipelines: An application to industrial CO2 emissions in the Iberian Peninsula. **Applied Energy**, [s. l.], v. 236, p. 22–31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.050>
- CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Disasters in numbers (2022). Brussels: **CRED**, 2023. Disponível em: https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf. Acesso em: 23 nov. 2024.
- ESCOBAR CARÍAS, M. S.; JOHNSTON, D. W.; KNOTT, R.; SWEENEY, R. Flood disasters and health among the urban poor. **Health Economics**, [s. l.], v. 31, n. 9, p. 2072–2089, 2022. <https://doi.org/10.1002/hec.4566>
- ESRI. ArcGIS. **Geospatial platform** – GIS software for business & government. [S.l.]: [s.n.], [2025]. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/geospatial-platform/overview>. Acesso em: 14 maio. 2025.
- FAN, L. Comparisons of five indices for estimating local terrain surface roughness using LiDAR point clouds. In: International Conference on Geoinformatics, 29., 2022, Beijing, China. **Proceedings** [...]. Beijing: IEEE, 2022. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/Geoinformatics57846.2022.9963877>
- FERREIRA, A. B. R.; FONSECA, B. M.; PEREIRA, G. Compartimentação do relevo baseada em parâmetros morfométricos: uma análise da região do extremo oeste da Bahia. **Caderno de Geografia**, 2020. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30n60p236-251>
- FLORES, D. M.; OLIVEIRA, D. D. Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) para análise de bacias hidrográficas e para traçado de lineamentos estruturais. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 20, n. 3, p. 125, 29 dez. 2016. <https://doi.org/10.5902/2236499422544>
- GOULART, A.; OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C. Utilização do Índice De Concentração De Rugosidade para identificação de feições erosivas na região noroeste do estado do Paraná. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 12, 2018, Crato, CE. **Anais** [...]. Crato: XII SINAGEO, 2018. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/9/9-305-1383.html>. Acesso em: 25 out. 2024.
- GOVERNO FEDERAL; SILVA, Enid Rocha Andrade da. **Agenda 2030**: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável Metas Brasileiras. [s. l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2018. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8855/1/Agenda_2030_ods_metas_nac_dos_obj_de_desenv_susten_propos_de_adequa.pdf. Acesso em: 14 out. 2024.
- GUIMARÃES, L. F.; BATTEMARCO, B. P.; OLIVEIRA, A. K. B.; MIGUEZ, M. G. A new approach to assess cascading effects of urban floods. **Energy Reports**, [s. l.], v. 7, p. 8357–8367, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.047>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Manuais Técnicos em Geociências, Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95017.pdf>. Acesso em: 24 out. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**: Malha Municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 24 out. 2024.
- JÚNIOR, E. M. B.; SIQUEIRA, J. B.; ALMEIDA, J. A. P. **Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) em uma região de pediplano sertanejo no semi-árido nordestino**, Nossa Senhora da Glória/SE. [S.l.]: [s.n.], 2015. p. 6. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311518937_Aplicacao_do_Indice_de_Concentracao_de_Rugosidade_ICR_em_uma_regiao_de_pediplano_sertanejo_no_semi-arido_nordestino_Nossa_Senhora_da_GloriaSE. Acesso em: 24 out. 2024.
- KIM, M.; KIENAST, Y.; HATT, J. K.; KIRBY, A. E.; KONSTANTINIDIS, K. T. Metagenomics indicate that public health risk may be higher from flooding following dry versus rainy periods. **Environmental Microbiology Reports**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 265–273, 2022. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13047>

- LEITE, E. **Impactos das chuvas e cheias extremas no Rio Grande do Sul em maio de 2024**. [s. l.], n. 01, p. 54, 2024. <https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/relatorio-sisperdas-evento-enchentes-em-maio-2024.pdf>. Acesso em: 24 out. 2024.
- LUIZ, I. C.; HENNING, E.; KALBUSCH, A. Desvendando o VOSviewer: uso de um software de bibliometria no estudo do consumo de água. *In: Seminário De Iniciação Científica (Sic)*, 33., 2023, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: UDESC, 2023. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/16931/DESVENDANDO_O_VOSVIEWER_USO_DE_UM_SOFTWARE_DE_BIBLIOMETRIA_NO_ESTUDO_DO_CONSUMO_DE_GUA_16950466260603_16931.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.
- MEI, C.; LIU, J.; WANG, H.; LI, Z.; YANG, Z.; SHAO, W.; DING, X.; WENG, B.; YU, Y.; YAN, D. Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics. *Science China Technological Sciences*, [s. l.], v. 63, n. 11, p. 2292–2304, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1523-2>
- MORAIS, L. O.; FERNANDES, E. **Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) na identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos de encostas em Sorocaba, São Paulo**. [S.l.]: [s.n.], 2023. p. 4. Disponível em: https://proceedings.science/proceedings/100327/papers/164166/download/abstract_file1?lang=pt-br. Acesso em: 25 out. 2024.
- NAVARRO, I. F. Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) para Avaliação da Mancha de Inundação da Barragem Vargem Grande em Nova Lima (MG). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**. [s. l.] v. 4, n. 1, p. 30. 2023 <https://doi.org/10.5281/zenodo.10440042>
- NEVES, E. H. **Análise da degradação ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas-RS, através do Diagnóstico Físico-Conservacionista (DFC)**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Linha de Pesquisa Análise Ambiental, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/60815/000863284.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 out. 2024.
- OKABE, A.; SATOH, T.; SUGIHARA, K. A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 7–32, 2009. <https://doi.org/10.1080/13658810802475491>
- Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 23 out. 2024.
- PAGANOTTO, V. **As quedas d'água enquanto geopatrimônio dos municípios de Pelotas e Arroio do Padre: contribuições ao geoturismo na costa doce do Rio Grande do Sul**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/25887/DIS_PPGGEOGRAFIA_2022_PAGANOTTO_VICT%C3%93RIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 out. 2024.
- PAZ, O. L. S.; SAMPAIO, T. V. M. Correlação espacial entre nascentes e o Índice de Concentração de Rugosidade Global (ICR-Global) na folha Eldorado Paulista (Paraná e São Paulo). *In: Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 11., 2016, Maringá. **Anais** [...]. Maringá: XI SINAGEO, 2016. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-146-1617.html>. Acesso em: 25 out. 2024
- PAZ, O. L. S.; SAMPAIO, T. V. M. Influência da acurácia altimétrica do modelo digital do terreno na elaboração do Índice de Concentração de Rugosidade Global (ICR – Global). *In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 17, 2017, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: Unicamp, 2017. p. 4810–4820. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2190>
- PACE, A. **Análise espacial e conceitual de diferentes produtos cartográficos aplicados ao mapeamento de inundação**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244410>. Acesso em: 23 out. 2024.
- PINHEIRO, M. A.; LIMA, M. T. B.; SILVA, J. M. O. Geomorfologia aplicada ao mapeamento da vulnerabilidade na microbacia do Rio Salamanca, Barbalha/Ceará-Brasil. *In: Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 11., 2016, Maringá, PR. **Anais** [...]. Maringá: XI SINAGEO, 2016. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-364-1323.html>. Acesso em: 25 out. 2024
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Version 3.34. Beaverton, OR: OSGeo, 2025. Software. Disponível em: <https://qgis.org/>. Acesso em: 25 jul. 2025.
- SAMPAIO, T. V. M. **Morphometric parameters to improve the accuracy of drainage network mapping: a proposal based on the analysis of the Benevente River Basin – ES**. 2008. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto

- de Geociências, Belo Horizonte, 2008.
- SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1 (2014)b. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i1.376>
- SAMPAIO, T. V. M.; SOPCHAKI, C. H. Geomorphological analysis applied to the study of land transportation routes (Geomorphological analysis applied to the study of land transportation routes). **RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise**, [S.l.], v. 41, p. 151–173, 2017. <https://doi.org/10.5380/raega.v41i0.51895>
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Bacias Hidrográficas**. Rio Grande do Sul: Secretária de Meio Ambiente e Infraestrutura, 2020. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>. Acesso em: 14 out. 2024.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo**. Rio Grande do Sul: Secretária de Meio Ambiente e Infraestrutura, 2020. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/040-bh-mirim>. Acesso em: 14 out. 2024.
- SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. E.; ROSA, A. H. Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.], v. 23, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2037>
- SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. E.; ROSA, A. H. Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.], v. 23, n. 1, 2022. Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-174-1224.html?_gl=1*lbjme*_gcl_au*NzY4NjQyNTQ2LjE3Mjk4MjkxNzA. Acesso em: 25 out. 2024.
- 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: 27 jun. 2025.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Tainara Goulart Corrêa: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal de dados, Metodologia, Pesquisa, Visualização de dados, Software, Validação, Redação do manuscrito original, Revisão e edição do texto.

Tássia Parada Sampaio: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal de dados, Pesquisa, Validação, Software, Redação do manuscrito original, Revisão e edição do texto.

Luciano Martins Tavares: Curadoria de dados, Disponibilização de ferramentas, Visualização de dados, Software, Revisão e edição do texto.

Diuliana Leandro: Recebimento de financiamento, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Revisão e edição do texto.

Pascal Silas Thue: Administração do projeto, Supervisão.

Robson Andreazza: Administração do projeto, Supervisão.

Maurizio Silveira Quadros: Administração do projeto.



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.