

Avaliação da vulnerabilidade a inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé

Assessment of flood vulnerability in the Minas Gerais portion of the Pomba and Muriaé river basins

Breno Verly Rosa^{1*} , Luciana Fernandes Guimarães¹ ,
Rosa Maria Formiga Johnsson¹ , Bruna Peres Battemarco¹ 

RESUMO

As mudanças climáticas e o crescimento desordenado das cidades vêm intensificando a frequência e a severidade das inundações, tornando a gestão do risco um desafio crescente. O mapeamento da vulnerabilidade é essencial para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas voltadas à redução dos impactos das inundações. Nesse sentido, o estudo teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade a inundações na porção mineira das Bacias Hidrográficas dos Rios Pomba e Muriaé, utilizando uma abordagem multicritério. O Índice de Vulnerabilidade a Inundações Fluviais foi calculado com base em quatro indicadores: densidade de vias, densidade populacional, uso e ocupação do solo e distância do rio. Os dados foram processados no **software** QGIS e normalizados em uma escala linear para facilitar a classificação da vulnerabilidade em três níveis (baixo, médio e alto). Os resultados indicaram pontos de alta vulnerabilidade em 41% dos municípios pertencentes às bacias, com destaque para: Carangola, Muriaé, Cataguases, Visconde do Rio Branco e Ubá. Dentre os indicadores utilizados, a distância dos cursos d'água e a densidade populacional foram os mais influentes na definição das áreas de maior vulnerabilidade. A sobreposição do mapa de vulnerabilidade com registros históricos de alagamentos confirmou a correlação entre as áreas mais vulneráveis e os eventos recorrentes de inundação. Por fim, a utilização dos quatro indicadores para a composição do índice de vulnerabilidade mostrou-se apropriada, uma vez que os resultados obtidos refletem, de maneira geral, a realidade e demonstram a eficácia do índice em representar adequadamente a vulnerabilidade.

Palavras-chave: risco a inundações; vulnerabilidade; avaliação multicritério.

ABSTRACT

Climate change and the unplanned growth of cities have intensified the frequency and severity of floods, making risk management an increasing challenge. Mapping vulnerability is a key tool for land-use planning and for the formulation of public policies aimed at reducing flood impacts. In this context, the present study aimed to assess flood vulnerability in the Minas Gerais portion of the Pomba and Muriaé River Basins, using a multicriteria approach. The River Flood Vulnerability Index was calculated based on four indicators: road density, population density, land use and land cover, and distance to the river. The data were processed using QGIS, and normalized on a linear scale to facilitate the classification of vulnerability into three levels (low, medium, and high). The results revealed areas of high vulnerability in 41% of the municipalities within the basins, particularly in Carangola, Muriaé, Cataguases, Visconde do Rio Branco, and Ubá. Among the indicators used, distance to the river and population density were the most influential in defining areas of higher vulnerability. The overlay of the vulnerability map with historical flood records confirmed a correlation between the most vulnerable areas and the recurrent flood events. Finally, the use of the four indicators to compose the vulnerability index proved appropriate, as the results generally reflect the regional reality and demonstrate the effectiveness of the index in adequately representing spatial flood vulnerability.

Keywords: flood risk; vulnerability; multicriteria assessment.

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

***Endereço para correspondência:** Rua São Francisco Xavier, 524 – Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – Bloco F. Rio de Janeiro, RJ. CEP: 20550-900. E-mail: verly.breno@posgraduacao.uerj.br

INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que têm se intensificado tanto em frequência quanto em magnitude, principalmente devido à crescente pressão antrópica sobre a paisagem e às mudanças climáticas (Vojtek *et al.*, 2023). Em função disso, a abordagem tradicional de gestão da drenagem urbana tem sido gradualmente substituída por uma abordagem focada na gestão de risco de inundação (Miguez; Veról, 2017), o que transformou a compreensão e o gerenciamento dos riscos associados a inundações em desafios centrais para o planejamento e a gestão territorial.

Nesse contexto, o mapeamento dos riscos de inundação emerge como uma ferramenta crucial para a gestão desses desastres em todas as etapas de seu ciclo – prevenção, mitigação, preparação para o evento, resposta e recuperação. O mapeamento eficaz permite identificar as áreas mais vulneráveis e implementar ações mais assertivas e eficientes para reduzir os danos, sejam eles ambientais, sociais ou econômicos (Vojtek *et al.*, 2023).

Cabe destacar que o conceito de risco não é universal e distintas áreas do conhecimento adotam definições variadas. Além disso, este conceito foi evoluindo ao longo do tempo à medida que as discussões sobre o tema foram se intensificando. O relatório AR3 do IPCC (Assessment Report ou Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 2001), por exemplo, descreve o risco como uma função da probabilidade de ocorrência de determinado evento e suas consequências. Nos relatórios seguintes, houve a introdução do conceito de vulnerabilidade (IPCC, 2007) e, em seguida, a integração entre os dois conceitos (IPCC, 2014), reforçando o que já havia sido feito no SREX – Relatório Especial sobre Gestão dos Riscos de Eventos Extremos (IPCC, 2012). Já no AR6 do IPCC (IPCC, 2019), o risco foi redefinido como uma função do potencial de geração de consequências adversas para o homem e/ou o meio ambiente e da exposição, da sensibilidade e da capacidade de adaptação do sistema.

Neste trabalho, assume-se o conceito de risco definido nos relatórios mais recentes do IPCC, em que este é determinado pelo perigo, pela vulnerabilidade e pela exposição, sendo os dois últimos associados às consequências potenciais, ou seja, aos danos causados pelo evento. Segundo Samuels

e Gouldby (2009), enquanto a exposição ao risco é a quantidade dos elementos que podem ser afetados, a vulnerabilidade representa os atributos de uma comunidade que podem ser danificados por um evento de inundação devido à sua suscetibilidade e ao valor de cada elemento.

Especificamente quanto ao conceito de vulnerabilidade, o relatório AR4 do IPCC (IPCC, 2007) a definiu como sendo composta de três fatores: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação, enquanto no relatório AR5 (IPCC, 2014), a vulnerabilidade passou a ser definida por somente dois elementos: sensibilidade e capacidade de lidar e se adaptar.

Cabe ressaltar que a vulnerabilidade a inundações é um conceito multidimensional, capaz de envolver diversos componentes sociais, físicos e ambientais e, portanto, pode ser avaliada por meio de diversos critérios e indicadores (Tebasi; Fereshtehpour; Roghani, 2025). Em seu estudo de revisão acerca das estruturas de avaliação de risco de inundação, Tebasi, Fereshtehpour e Roghani (2025) identificaram critérios como a taxa de alfabetização, o uso do solo, a qualidade da construção, a densidade de construção, a proporção de área verde, a idade das construções, a densidade populacional, a densidade de drenagem, a densidade das redes de transportes e a idade da população, para avaliação e quantificação da vulnerabilidade a inundações nos diversos estudos levantados.

Mapear a vulnerabilidade a inundações auxilia na identificação de níveis diferentes de vulnerabilidade em determinada área geográfica, na elaboração de planos estratégicos e de gestão de risco para prevenção e redução de impactos das inundações e na compreensão dos fatores que causam a vulnerabilidade em determinada área, bem como promove a participação de diversas partes interessadas (Membele; Naidu; Mutanga, 2022).

A literatura recente sobre vulnerabilidade a inundações em países em desenvolvimento evidencia crescimento expressivo do interesse científico e a consolidação de abordagens integradas, que articulam variáveis geográficas, ambientais e socioeconômicas. A revisão de Membele, Naidu e Mutanga (2022) destaca esse avanço metodológico, mas também aponta uma baixa representatividade de estudos no Brasil, com apenas cinco trabalhos entre os

130 analisados, indicando uma lacuna relevante na produção científica nacional sobre o tema.

No contexto brasileiro, os estudos identificados apresentam diversidade de enfoques e metodologias. Rasch (2015) desenvolveu um índice nacional de vulnerabilidade à inundações para 1.276 municípios, integrando dados socioeconômicos, do ambiente construído e do meio natural. De Brito, Evers e Almoradie (2018; 2019) propuseram uma abordagem participativa de decisão multicritério aplicada aos municípios de Lajeado e Estrela, incorporando vulnerabilidade social, estrutural e capacidade de enfrentamento, além de análises de sensibilidade e incerteza. Já Caldas *et al.* (2018), ao estudarem Batatais, adotaram critérios físicos e ambientais, produzindo um mapeamento mais associado à suscetibilidade e ao perigo físico de inundações do que à vulnerabilidade socioeconômica.

Por sua vez, Rezende *et al.* (2020) ampliam o debate ao propor um índice de capacidade de recuperação socioeconômica de áreas urbanas sujeitas a inundações, por meio de uma abordagem multicritério aplicada à bacia do Canal do Mangue, no Rio de Janeiro. Em conjunto, esses estudos revelam que a vulnerabilidade a inundações no Brasil é tratada a partir de múltiplas dimensões — social, estrutural, ambiental, física e de resiliência —, evidenciando tanto a riqueza metodológica quanto a fragmentação conceitual do campo, e reforçando a necessidade de modelos integrados que articulem perigo, exposição, vulnerabilidade e capacidade de resposta e recuperação.

Apesar desses avanços, observa-se uma lacuna significativa na produção nacional, tanto em termos de cobertura territorial quanto de consolidação metodológica. Membele, Naidu e Mutanga (2022) identificaram que há necessidade de aprofundamentos no que se refere à produção de mapas de vulnerabilidade a inundações que retratem a distribuição espacial ou padrões e níveis de vulnerabilidade (baixa, média ou alta). Isso porque diferentes aspectos podem ser considerados para identificar pessoas ou grupos que são mais vulneráveis a inundações em áreas geográficas específicas. Além disso, os mapas produzidos devem ser capazes de retratar a realidade local para que sejam usados na tomada de decisões e em intervenções políticas (Membele; Naidu; Mutanga, 2022).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe contribuir para o avanço do conhecimento sobre a vulnerabilidade a inundações, tendo como objetivo calcular o Índice de Vulnerabilidade a Inundações Fluviais na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé, pertencente à Bacia do Rio Paraíba do Sul. Cabe destacar que a Bacia do Rio Paraíba do Sul conta com um plano de gerenciamento de risco (PGR) (Associação Pró-gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, 2022). Assim, por meio desse índice, busca-se uma base sólida para a tomada de decisões e para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes no enfrentamento dos riscos de inundações na região.

METODOLOGIA

A abordagem adotada neste estudo para avaliar a vulnerabilidade fundamenta-se na metodologia multicritério proposta por Cheng *et al.* (2023), na qual a vulnerabilidade é determinada com base em cinco indicadores: densidade de vias, densidade populacional, uso e ocupação do solo, distância do rio e densidade de pontos-chave. Contudo, baseado nas características da área de estudo, o último indicador foi desconsiderado. A Figura 1 mostra o fluxograma com as etapas da pesquisa.

A “densidade de vias” refere-se à relação entre a extensão da rede viária e a área da região. Assim, áreas com altas densidades de vias são consideradas mais vulneráveis a inundações e com maior potencial de danos. A relação população residente-área reflete a distribuição e a concentração de pessoas em um território. Nesse sentido, áreas com alta densidade populacional podem ser mais vulneráveis a desastres e indicam que mais pessoas e atividades podem ser afetadas. O “uso e ocupação do solo”, por sua vez, reflete a forma como o território de determinada região está ocupado e é utilizado. Os variados padrões de uso da terra impactam os processos hidrológicos, uma vez que diferentes padrões apresentam condições distintas de escoamento e capacidade de infiltração. Por fim, o indicador “distância do rio” reflete quão próxima determinada área está do curso d’água. Dessa forma, áreas mais próximas dos cursos d’água são mais vulneráveis por estarem mais propensas a inundações.

A formulação do Índice de Vulnerabilidade é, portanto, um somatório ponderado dos quatro indicadores, expresso em escala linear de 4 a 10. Posteriormente, esses valores foram divididos em faixas (baixa, média e alta), com o intuito de facilitar a interpretação e destacar com maior clareza os diferentes níveis de gravidade. A classificação de cada indicador nas faixas é detalhada na Tabela 1.

Os indicadores foram processados usando o *software* QGIS. Como os indicadores têm unidades diferentes, foi necessária a normalização deles entre 1 e 3 para eliminar a influência dimensional. Cada camada de informação foi transformada em uma camada *raster* com resolução espacial uniforme de 50 × 50 m.

A resolução espacial de 50 × 50 m foi adotada em consonância com a metodologia multicritério proposta por Cheng *et al.* (2023), que enfatiza a necessidade de compatibilidade entre a escala de análise, a resolução dos dados de entrada e o nível de detalhe requerido na avaliação da

vulnerabilidade. Essa resolução é suficiente para capturar a variabilidade espacial dos indicadores analisados, ao mesmo tempo em que evita a superinterpretação de informações provenientes de dados com diferentes escalas e precisões, além de garantir eficiência computacional no processamento das camadas raster.

Para os indicadores “densidade de vias”, “densidade populacional” e “distância do rio”, caracterizados como quantitativos, quatro técnicas distintas apresentadas por *default* no QGIS (intervalo igual, intervalo geométrico, quartil e Quebra Natural de *Jenks*) foram testadas para analisar a sensibilidade dos dados de cada indicador quanto à divisão nas três classes. Contudo, foi adotada aquela que demonstrou a melhor adequação ao tipo e às características dos dados analisados.

Para o indicador “uso e ocupação do solo”, de natureza qualitativa, a classificação foi baseada nas características específicas do local de estudo, levando em consideração o grau de impermeabilização do solo, a presença de

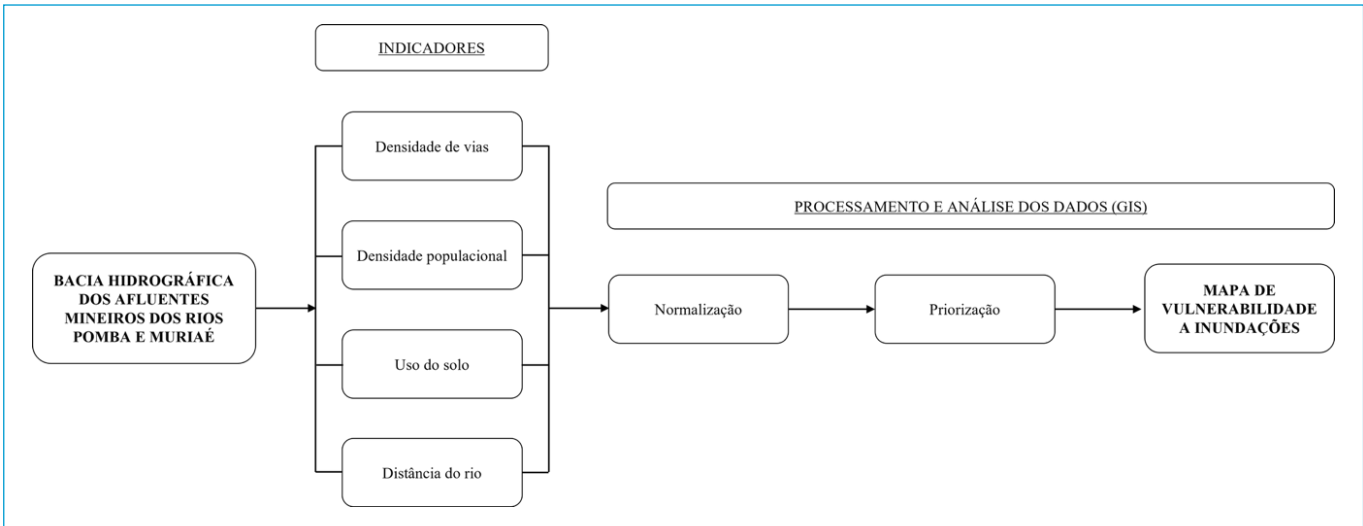


Figura 1 – Metodologia do estudo, adaptado de Cheng et al. (2023)

Tabela 1 – Classificação dos indicadores de vulnerabilidade utilizados

Indicadores	Pesos	Classificação		
		Baixa (≤ 5,35)	Média (5,35-7,00)	Alta (≥ 7,00)
Densidade de vias (km/km²)	0,25	≤ 0,11	0,12-0,18	> 1,18
Densidade populacional (hab./km²)	0,25	≤ 46	47-120	> 120
Uso do solo	0,25	Corpo hídrico, floresta e vegetação, sem classificação	Campos/pastagens e área agrícola	Área urbanizada
Distância do rio (m)	0,25	> 150	151-50	≤ 50

Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2023).

ocupação urbana, bem como a existência de áreas verdes e agrícolas. As classes de uso do solo foram hierarquizadas de acordo com sua maior ou menor suscetibilidade à ocorrência de danos, sendo posteriormente normalizadas para integração ao índice de vulnerabilidade.

Em relação à priorização, optou-se pela simplificação com a utilização de pesos iguais para os indicadores, ou seja, considerou-se que cada indicador exerce a mesma influência na classificação da vulnerabilidade. Por fim, utilizando a ferramenta *raster calculator* para a realizar a sobreposição das camadas *raster* de cada indicador, foi possível criar uma única camada de informação referente ao mapa de vulnerabilidade a inundação.

Características da área de estudo

As Bacias dos Rios Pomba e Muriaé são sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, uma bacia altamente estratégica no cenário nacional, abrangendo áreas de São

Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (Figura 2). Juntas, as duas sub-bacias compreendem 65 municípios e abrangem uma área de 16.778 km², correspondente a 30% da área total da Bacia do Rio Paraíba do Sul. De acordo com o Censo IBGE (2010), a população total das sub-bacias dos Rios Pomba e Muriaé era de 837.509 habitantes (cerca 10% da população total da Bacia Paraíba do Sul), com a maioria vivendo em áreas urbanas (82,6%).

Em termos populacionais, os maiores municípios são (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010): Muriaé (100.765 habitantes), Ubá (100.505 habitantes), Cataguases (69.757 habitantes) e Leopoldina (51.130 habitantes). No entanto, na porção mineira das bacias dos rios Pomba e Muriaé, predomina municípios de pequeno porte, a maioria deles (86,2%) apresentando populações abaixo de 20 mil habitantes.

De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia (2021), 77,5% das faixas marginais dos rios da

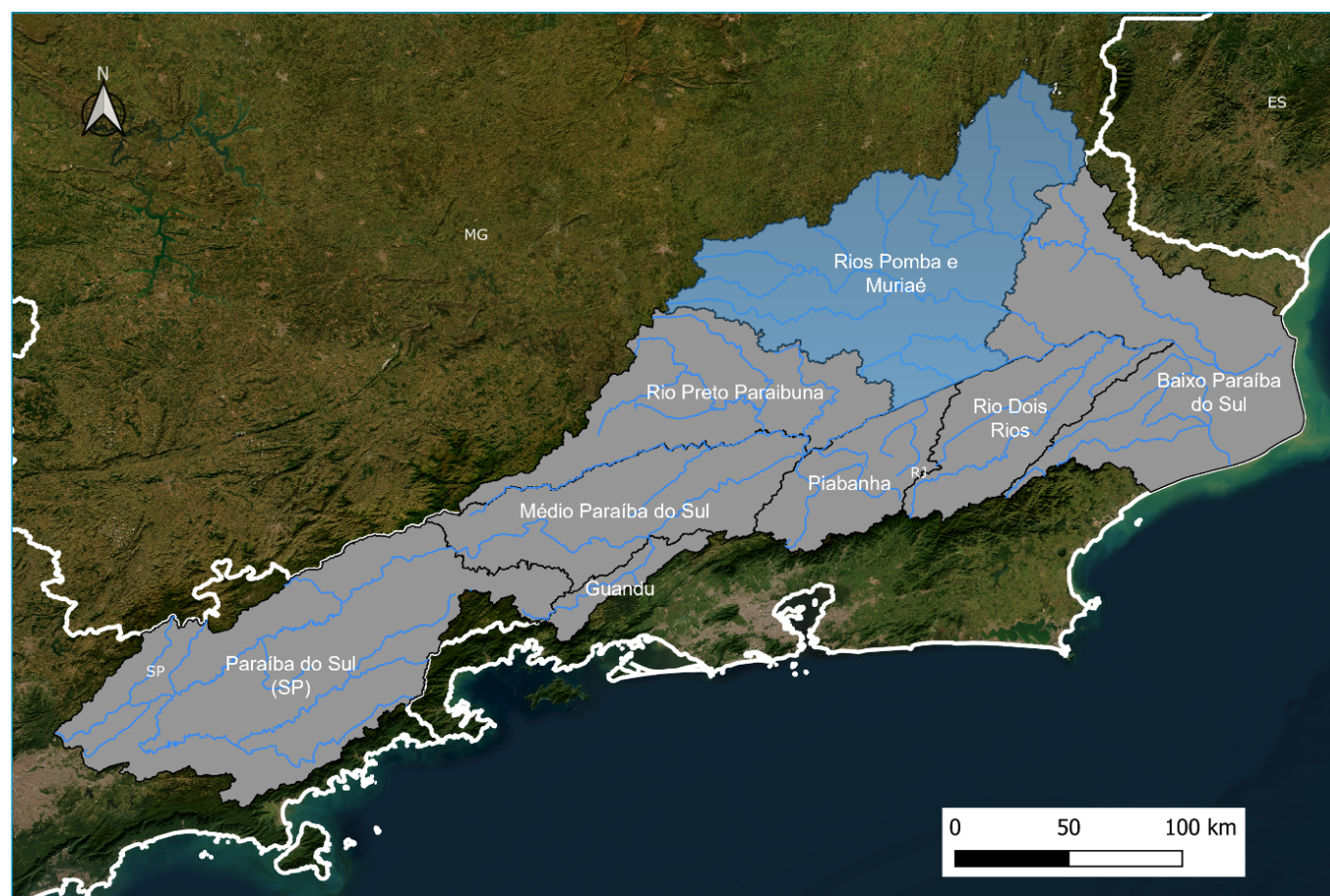


Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo

bacia são áreas afetadas por atividades antrópicas, utilizadas predominantemente como campos/pastagens. Somente 19,8% das faixas marginais estão protegidas ou não estão afetadas pela atividade humana.

Um dos principais desafios enfrentados pelos municípios dessas bacias são as cheias (Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé, 2021), de caráter regional, que impactam várias cidades ao longo dos rios. Esse problema é agravado pela forma como o território foi ocupado: às margens dos rios, algumas vezes em sua calha secundária, em áreas potencialmente alagáveis.

As maiores cheias de caráter regional dos rios Pomba e Muriaé ocorreram nos anos de 1925, 1943, 1961, 1979, 1983, 1985, 1997, 2003, 2007, 2008, 2009 e 2012. As principais cidades afetadas nesses processos foram: Muriaé, Patrocínio do Muriaé, Miraí, Tombos, Cataguases e Carangola. Ressalta-se que eventos críticos nessas sub-bacias são comuns, sendo algumas cidades atingidas quase anualmente por inundações em pontos isolados (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019).

Para o equacionamento da vulnerabilidade à inundação na porção mineira das Bacias dos Rios Pomba e Muriaé, utilizaram-se bases de dados de órgãos oficiais do governo, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e órgãos gestores da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e das sub-bacias dos rios Pomba e Muriaé, conforme apresentado na Tabela 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vulnerabilidade a inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé
A Figura 3 apresenta os mapas resultantes da aplicação de cada um dos indicadores de vulnerabilidade selecionados

à área de estudo. Os resultados dos indicadores “densidade de vias” e “densidade populacional” estão diretamente relacionados às áreas urbanas da área de estudo. Assim, as zonas de alta densidade de vias e alta densidade populacional coincidiram com as áreas urbanas consolidadas, especificamente os centros urbanos das sedes dos municípios.

As maiores densidades de vias foram observadas nas áreas urbanas dos distritos sede de Muriaé, Visconde do Rio Branco, Cataguases e Leopoldina (Figura 3A). Nessas localidades, a impermeabilização do solo dificulta a infiltração da água, intensificando o escoamento superficial.

A densidade populacional na bacia tende a ser baixa, com a maioria dos municípios apresentando valores de até 50 hab./km². Densidades superiores a 100 hab./km² ocorrem nos municípios de Barbacena, Cataguases, Muriaé, Rio Branco e Ubá (Figura 3B), tornando essas áreas mais vulneráveis devido à maior quantidade de pessoas e construções expostas ao perigo.

No que se refere ao uso e à ocupação do solo, as áreas de campos/pastagens, floresta e vegetação são as que predominam na bacia (76,11%) e são as que apresentam menor vulnerabilidade a inundações (Figura 3C). Em contrapartida, as manchas urbanas (3,28%), associadas às sedes dos municípios mais populosos, são mais suscetíveis a eventos de inundação devido à menor capacidade de infiltração da água, ao maior volume de escoamento superficial e ao maior potencial de impacto diante esses eventos.

Quanto à análise acerca da distância do rio (Figura 3D), as áreas mais próximas aos rios e seus afluentes são também as que apresentam os maiores valores de vulnerabilidade, pois estão sujeitas aos impactos diretos do extravasamento do rio. Esse fator torna o indicador crucial na análise da área de estudo, já que a maior parte da

Tabela 2 – Fontes dos dados levantados para a aplicação do Índice de Vulnerabilidade a Inundações na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé

Índice	Indicadores	Fonte de dados
Vulnerabilidade	Densidade de vias (DV)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Face de logradouros, 2022
	Densidade populacional (DP)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – Face de logradouros – Censo 2010
	Uso do solo (US)	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), s.d.
	Distância do rio (DR)	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), s.d.

população da bacia está concentrada próxima às margens dos cursos d'água.

O mapa resultante da avaliação da vulnerabilidade à inundação na porção mineira das bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé é apresentado na Figura 4. Todos os municípios das bacias apresentaram algum nível de vulnerabilidade. Ressalta-se que pontos de alta vulnerabilidade foram observados em 27 municípios (41%), com destaque para Carangola, Muriaé, Cataguases, Visconde do Rio Branco e Ubá.

Os municípios de Visconde do Rio Branco (14,51%), Carangola (13,20%) e Muriaé (12,58%) apresentam parcelas expressivas de suas áreas urbanas inseridas em zonas classificadas como de alta vulnerabilidade a inundações. Destacam-se, entretanto, Ubá e Cataguases, cujas proporções são ainda mais elevadas — 27,75 e 24,17% de suas áreas urbanas, respectivamente, estão enquadradas

nessa mesma categoria de vulnerabilidade. A Figura 5 apresenta a porcentagem da área urbana desses cinco municípios que se sobrepõe às áreas classificadas como de alta vulnerabilidade.

Dentre as sub-bacias, a do Rio Pomba é a que apresenta as maiores extensões de áreas de alta vulnerabilidade (0,21% de seu território total) e, nos municípios, as áreas com pior classificação consistem naquelas situadas às margens dos rios, muitas vezes onde está concentrada praticamente toda a população.

No estudo de caso em questão, os indicadores que mais influenciaram o surgimento de níveis elevados de vulnerabilidade foram a distância em relação ao curso hídrico e a densidade populacional. Isso significa que a interação entre a proximidade dos cursos d'água e a ocupação dessas áreas marginais se revelou um fator de maior importância para o aumento da vulnerabilidade

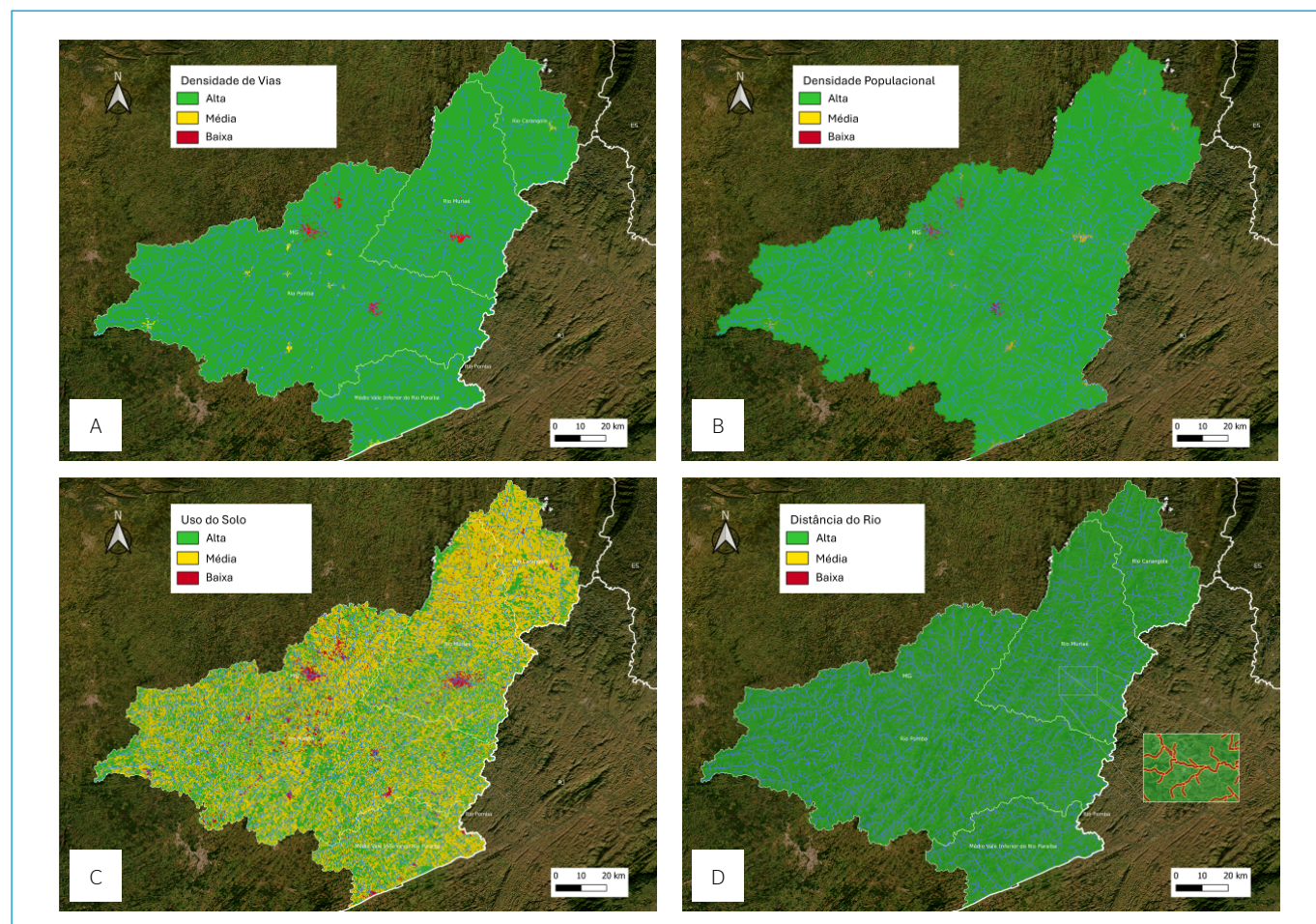


Figura 3 – Mapa dos indicadores de vulnerabilidade na área de estudo: (A) densidade de vias; (B) densidade populacional; (C) uso do solo; (D) distância do rio

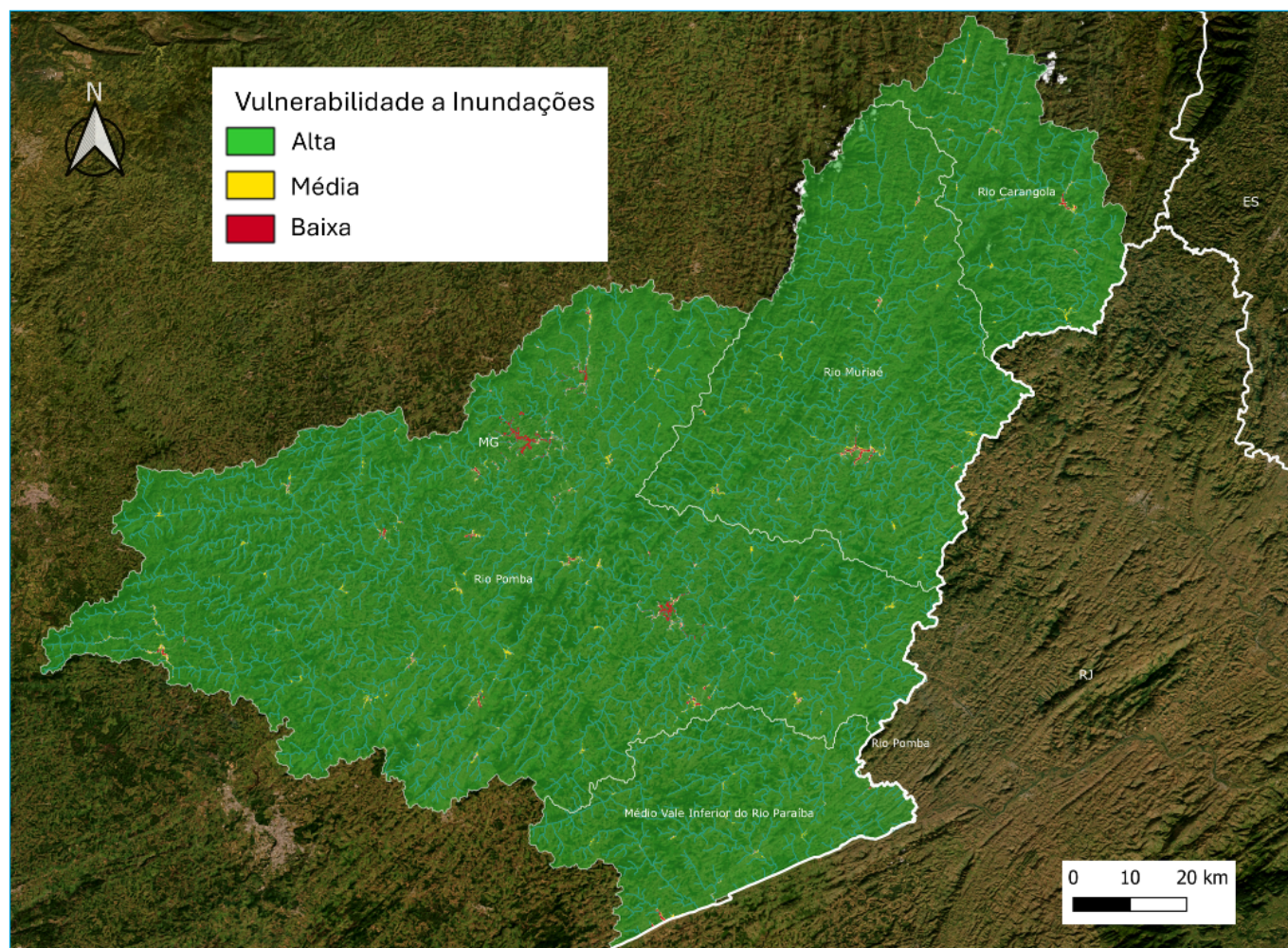


Figura 4 - Avaliação da vulnerabilidade a inundações da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé

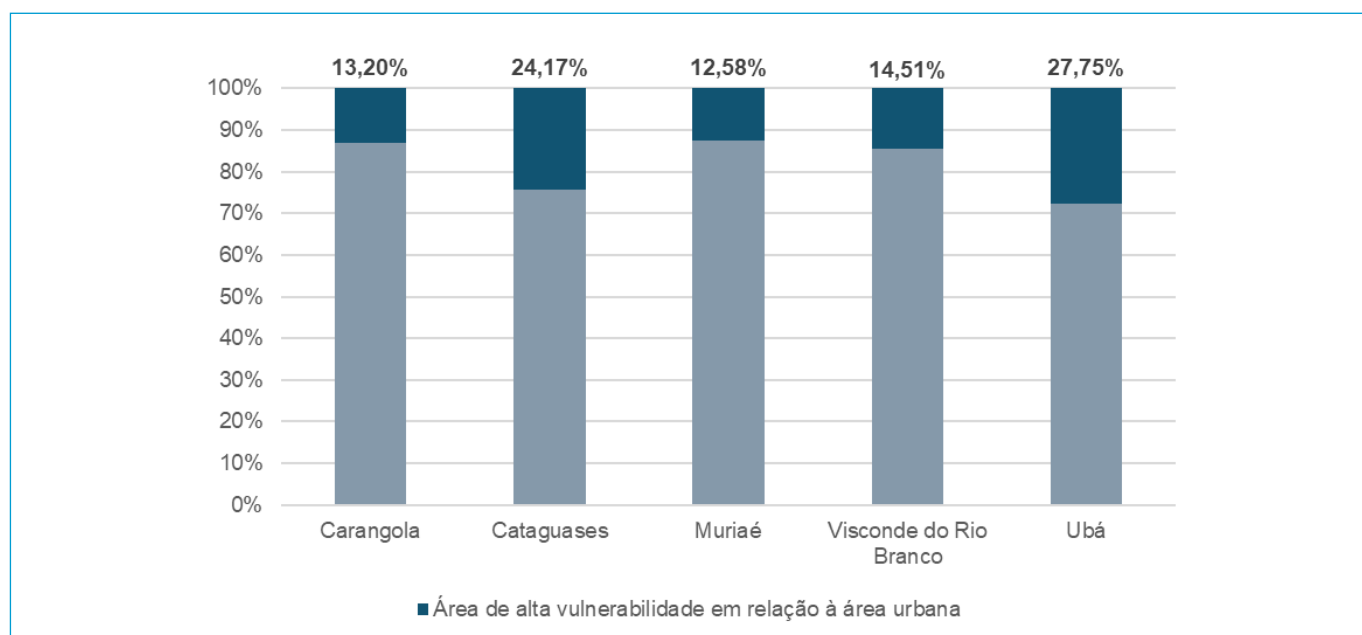


Figura 5 - Área de alta vulnerabilidade a inundações em relação à área urbana

na maioria das regiões. Consequentemente, as áreas mais distantes dos rios, com menores densidades, foram consideradas de baixa vulnerabilidade. Ao mapa do nível de vulnerabilidade foram sobrepostos pontos de alagamentos nos municípios de Carangola, Cataguases e Muriaé (Figura 6), levantados durante o desenvolvimento do Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul — SISPREC

(Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019), a fim de verificar a materialização do risco de inundações. A análise da sobreposição sugere que as áreas de maior vulnerabilidade coincidem, em grande parte, com os locais onde os pontos de alagamento são mais frequentes, evidenciando alto grau de risco às comunidades expostas.

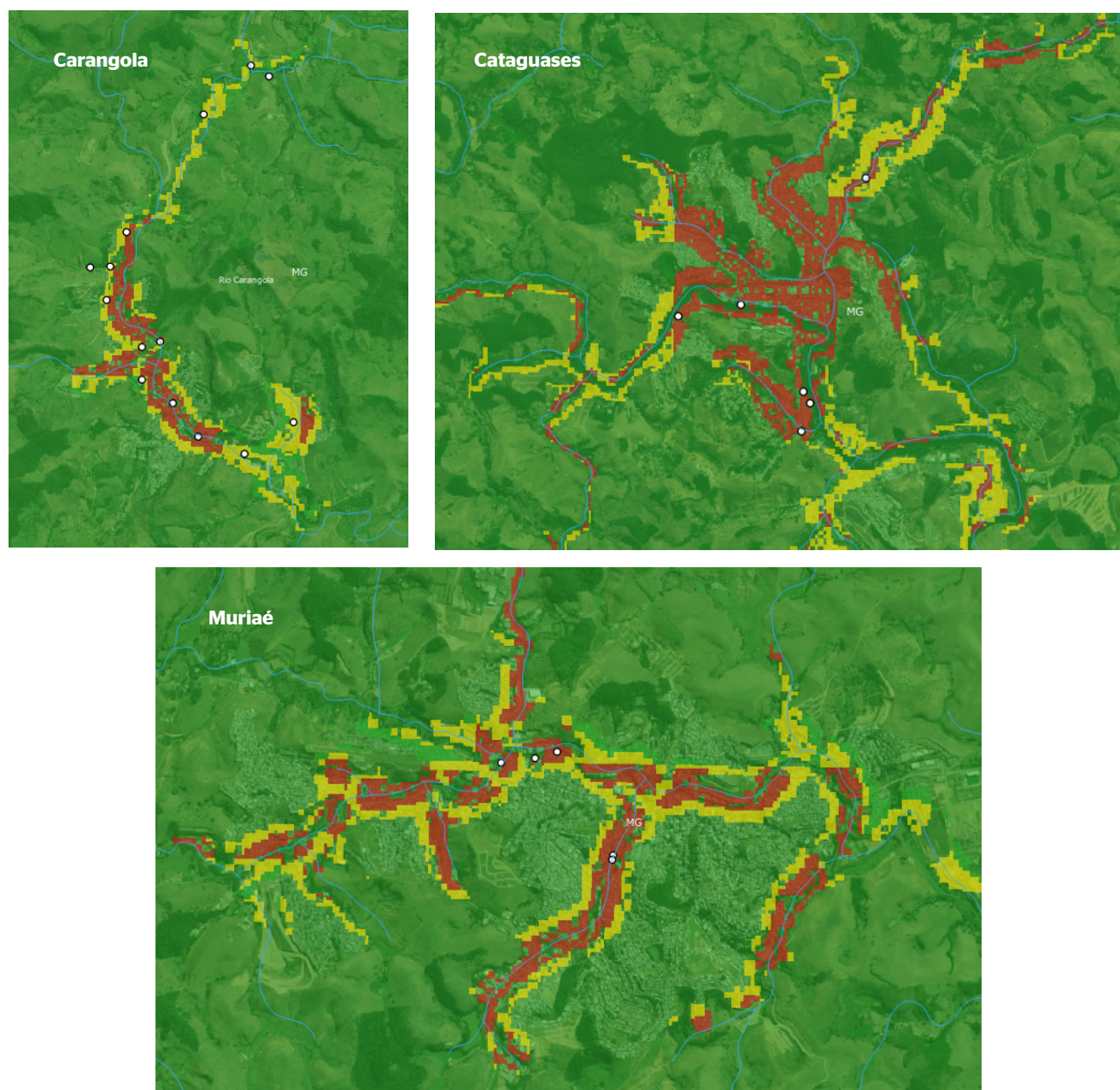


Figura 6 – Detalhes do mapa de vulnerabilidade à inundação e pontos de alagamento nos municípios de Carangola, Cataguases e Muriaé

Discussões

Os resultados evidenciam o potencial do índice de vulnerabilidade como instrumento técnico de apoio ao planejamento territorial e à gestão de riscos de inundações, ao permitir a identificação objetiva de áreas prioritárias para intervenção. O índice de vulnerabilidade pode ser incorporado a instrumentos de planejamento territorial e gestão de riscos, como planos diretores, planos municipais de redução de riscos, planos de drenagem urbana e planos de defesa civil, orientando o ordenamento do uso do solo, a priorização de investimentos em infraestrutura e a definição de ações preventivas.

Nesse sentido, a hierarquização espacial da vulnerabilidade também contribui para a alocação mais eficiente de recursos públicos, para o planejamento de ações preventivas e para a estruturação de estratégias de monitoramento e resposta a desastres. A correspondência entre áreas de alta vulnerabilidade e registros históricos de alagamentos reforça a consistência empírica do modelo e sua capacidade de representar padrões reais de exposição e suscetibilidade.

Cabe destacar que a extrapolação do método para outros municípios brasileiros é viável por se tratar de uma estrutura multicritério baseada em indicadores universalmente disponíveis no território nacional, obtidos em bases públicas padronizadas, e operacionalizada por técnicas SIG acessíveis. A lógica espacial dos critérios adotados (proximidade a cursos d'água, densidade populacional, densidade de vias e uso do solo) representa processos territoriais comuns à maioria dos contextos urbanos brasileiros, permitindo sua replicação. Além disso, o modelo apresenta caráter adaptativo, possibilitando ajustes por meio da inclusão de novos indicadores, redefinição de pesos e calibração das classes de vulnerabilidade conforme as especificidades locais. Assim, o método se configura como uma estrutura-base transferível, aplicável a diferentes municípios, desde que respeitadas as particularidades socioespaciais e as limitações associadas à disponibilidade e atualização dos dados.

Contudo, a aplicação prática dos resultados requer cuidados metodológicos e interpretativos. O índice representa

apenas a dimensão da vulnerabilidade, não o risco em sua totalidade, devendo ser integrado a análises de perigo, exposição e capacidade de resposta. Ademais, limitações relacionadas à utilização de dados secundários, à adoção de pesos iguais entre os indicadores e à ausência de variáveis socioeconômicas restringem a análise às dimensões física e estrutural do risco.

Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como uma base estruturante para sistemas integrados de gestão de risco de inundações, e não como um modelo fechado ou definitivo. O índice apresenta robustez como ferramenta de diagnóstico territorial e de priorização espacial, mas seu pleno potencial se concretiza quando integram perigo, exposição, vulnerabilidade social, capacidade de resposta e resiliência, contribuindo para a construção de políticas públicas mais eficazes, territorialmente orientadas e adaptativas frente ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos.

CONCLUSÕES

O uso de indicadores integrados constitui uma estratégia válida para se conhecer e analisar determinada realidade, sendo fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelo consequente aumento de eventos extremos. Nas bacias hidrográficas dos rios Pomba e Muriaé, a avaliação da vulnerabilidade a inundações consiste em um passo essencial para o planejamento territorial sustentável e para a mitigação de riscos.

Cabe ressaltar, contudo, que a presente pesquisa apresentou limitações inerentes à abordagem e à metodologia adotadas. Embora a aplicação dos quatro indicadores para a composição do índice de vulnerabilidade tenha se mostrado adequada — considerando que, de forma geral, os resultados observados são aderentes à realidade —, a ausência de indicadores socioeconômicos (como renda, faixa etária, estrutura/qualidade das habitações ou acesso à infraestrutura) pode limitar a compreensão da vulnerabilidade social, restringindo o resultado às dimensões física e estrutural do risco.

Outro aspecto limitante refere-se à adoção de pesos iguais entre os indicadores. Embora essa decisão simplifique a

análise e o processamento dos dados, ela pode não refletir necessariamente a influência diferenciada de cada variável na determinação da vulnerabilidade. Além disso, a utilização de dados secundários provenientes de fontes com diferentes períodos de atualização, ainda que correspondam às fontes mais recentes disponíveis, pode não contemplar transformações recentes no padrão de urbanização e impermeabilização do solo, e subestimar as condições atuais de exposição.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprimoramento do índice por meio da incorporação de novos indicadores socioeconômicos, ambientais e de infraestrutura, de modo a ampliar a multidimensionalidade da análise. Sugere-se, ainda, a utilização de métodos de ponderação diferenciada, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), o método Entropy ou Delphi, que permitem atribuir pesos com base na importância relativa de cada indicador, proporcionando maior robustez ao modelo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Estudos Auxiliares para Gestão do Risco de Inundações da Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://gripbsul.ana.gov.br/Sisprec.html>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **Plano de Gerenciamento de Risco (PGR) para a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. São Paulo, 2022.
- CALDAS, Anildo Monteiro; PISSARRA, Teresa Cristina Tarle; COSTA, Renata Cristina Araujo; ROLIM NETO, Fernando Cartaxo; ZANATA, Marcelo; PARAHYBA, Roberto da Boa Viagem; FERNANDES, Luis Filipe Sanches; PACHECO, Fernando Antonio Leal. Flood Vulnerability, Environmental Land Use Conflicts, and Conservation of Soil and Water: A Study in the Batatais SP Municipality, Brazil. *Water*, v. 10, n. 10, p. 1357, 2018.
- CHEN, Yiqing; WANG, Deyun; ZHANG, Ludan; GUO, Haixiang; MA, Junwei; GAO, Wei. Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 42, p. 96001-96018, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29066-8>
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS AFLUENTES MINEIROS DOS RIOS POMBA E MURIAÉ. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé - PDRH**. Rio de Janeiro, 2021.
- COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **SIGA-CEIVAP**. Sistema Integrado de Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Resende, RJ: CEIVAP; AGEVAP, [s. d.]. Disponível em: <https://sigaaguas.org.br/home/apps/repositorio/?group=Compe>. Acesso em: 3 maio 2025.
- DE BRITO, Mariana Madruga; EVERS, Mariele; ALMORADIE, Adrian Delos Santos. Participatory flood vulnerability assessment: a multi-criteria approach. *Hydrology Earth System Sciences*, v. 22, n. 1, p. 373-390, 2018. <https://doi.org/10.5194/hess-22-373-2018>
- DE BRITO, Mariana Madruga; ALMORADIE, Adrian Delos Santos; EVERS, Mariele. Spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis in a MCDA-based flood vulnerability model. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 33, n. 9, p. 1788-1806, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base de Faces de Logradouros do Brasil: 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/28971-base-de-faces-de-logradouros-do-brasil.html>. Acesso em: 3 maio 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**: Resultados do Universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR3**. 2001. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/front-1.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR4**. 2007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR5**, 2014. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Assessment Report - AR6**. 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation – SREX**. 2012. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf. Acesso em: 27 jun. 2025.

MEMBELE, Garikai M.; NAIDU, Maheshvari; MUTANGA, Onesimo. Examining flood vulnerability mapping approaches in developing countries: A scoping review. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 69, n. 3, p. 102766, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102766>

MIGUEZ Marcelo G.; VERÓL Aline P. A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design. **Environment and Planning B: Urban**, v. 44, n. 5, p. 925-946, 2017. <https://doi.org/10.1177/0265813516655799>

RASCH, Rebecca Joan. Assessing urban vulnerability to flood hazard in Brazilian municipalities. **Environment & Urbanization**, v. 28, n. 1, p. 145-168, 2015. <https://doi.org/10.1177/0956247815620961>

REZENDE, Osvaldo Moura; FRANCO, Anna Beatriz Ribeiro da Cruz de; OLIVEIRA, Antonio Krishnamurti Beleño de; MIRANDA,

Francis Martins; JACOB, Ana Caroline Pitzer; SOUSA, Matheus Martins de; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Mapping the flood risk to Socioeconomic Recovery Capacity through a multicriteria index. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, n. 2020, p. 120251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120251>

SAMUELS, Paul Graham; GOULDBY, Ben. **Language of Risk – Project Definitions**. 2nd ed. (Report No. T32-04-01). FLOODsite, 2009. 57 p. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:268e1ef4-7b45-4b4d-8504-13d2f252e4d9/datastream/OBJ/download>. Acesso em: 20 jun. 2025.

TEBASI, Nazgol; FERESHTEHPOUR, Mohammad; ROGHANI, Bardia. A review of flood risk assessment frameworks and the development of hierarchical structures for risk components. **Discover Water**, v. 5, n. 10, p. 1-20, 2025.

VOJTEK, Matej; VOJTEKOVÁ, Jana; DE LUCA, Davide Luciano; PETROSELLI, Andrea. Combined basin-scale and decentralized flood risk assessment: a methodological approach for preliminary flood risk assessment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 3, p. 355-378, 2023. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2157279>