

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Flávia Ciqueira

SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE RISCO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO

Belo Horizonte
2025

Flávia Ciqueira

SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE RISCO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Avaliação e gerenciamento de impactos e de riscos ambientais

Orientadora: Priscilla Macedo Moura

Coorientadora: Jussanã Milograna

Belo Horizonte
2025

C577s

Ciqueira, Flávia.

Sistemática para análise de risco de áreas suscetíveis à inundação
[recurso eletrônico] / Flávia Ciqueira. - 2025.

1 recurso online (169 f.: il., color.) : pdf.

Orientadora: Priscilla Macedo Moura.

Coorientadora: Jussanã Milograna.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos -
Desenvolvimento - Teses. 3. Avaliação de riscos ambientais - Teses.
4. Inundações - Teses. I. Moura, Priscilla Macedo. II. Milograna, Jussanã.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

"Sistemática para análise de risco de áreas suscetíveis a inundação."

FLÁVIA CIQUEIRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profª PRISCILLA MACEDO MOURA

Profª JUSSANÃ MILOGRANA - Coorientadora

Prof. NILO DE OLIVEIRA NASCIMENTO

Prof. RAVIEL EURICO BASSO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Eduardo Coutinho de Paula
Coordenador

Profª. Priscilla Macedo Moura
Orientadora

Belo Horizonte, 28 de abril de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Professora do Magistério Superior**, em 04/06/2025, às 19:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jussanã Milograna, Usuária Externa**, em 05/06/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raviel Eurico Basso, Usuário Externo**, em 09/06/2025, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilo de Oliveira Nascimento, Presidente de comissão**, em 28/08/2025, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 29/08/2025, às 12:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4151745** e o código CRC **6FF84569**.

Dedicatória

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Concluir este trabalho representa não apenas a realização de um projeto acadêmico, mas também o encerramento de uma jornada repleta de desafios, aprendizado e crescimento. Foi um privilégio vivenciar essa experiência na UFMG, especialmente no Departamento de Recursos Hídricos.

Em primeiro lugar, expresso minha mais profunda gratidão ao meu marido, Nathan, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo ao longo de toda essa trajetória. Seu suporte foi essencial para que eu pudesse superar os desafios e continuar em frente. Sua presença constante e compreensão foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha família e amigos, sem o carinho e a força de vocês, esta jornada teria sido muito mais difícil.

Às minhas orientadoras, Priscilla e Jussanã, expresso minha mais sincera gratidão pela dedicação, orientação e confiança ao longo desta jornada. O comprometimento, acolhimento e respeito de vocês foram essenciais para minha evolução como pesquisadora. Agradeço por acreditarem no meu trabalho e por me guiarem.

Agradeço, ainda, aos especialistas que gentilmente dedicaram seu tempo para contribuir com este estudo. Suas reflexões e discussões trouxeram contribuições valiosas que enriqueceram esta pesquisa. Meu reconhecimento especial a:

- Cezarina Maria Nobre Souza – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
- Alfredo Ribeiro Neto – Universidade Federal de Pernambuco
- Altino Rodrigues Neto – CBHSF, CBHSF4, CBHSF3, FNCBH, FMCBH
- Luiz Gustavo Fortes Westin – Neoenergia
- Débora Luisa Silva Teixeira – Universidade Federal de Itajubá

- Andre Luis Martinelli Real dos Santos – SGB
- Nívea Adriana Dias Pons – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
- Fernán Enrique Vergara Figueroa – Universidade Federal do Tocantins - UFT
- Cláudio Heitor Oliveira – Prefeitura de Itutinga
- Marcelo de Deus Melo – Companhia Energética de Minas Gerais
- Vladimir Caramori Borges de Souza – Universidade Federal de Alagoas - UFAL
- Valéria Camboim Góes – Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
- Ana Paula Camargo de Vicente – Universidade Federal de Goiás
- Alberto Assis dos Reis – Companhia Energética de Minas Gerais
- Walter Collischonn – UFRGS
- George Luiz Pereira Santos – Corpo de Bombeiros Militar do Acre, Coordenação Estadual de Proteção e Defesa Civil do Acre e Coordenação Municipal de Proteção e Defesa Civil (Rio Branco - AC)
- Leonardo Mitre Alvim de Castro – Engecorps Engenharia S.A.
- Daniele Feitoza Silva – RHAMA Analysis
- Daniela de Souza Kyrillos – CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- Daniele Pereira Batista Amaral – Instituto Estadual do Ambiente - RJ
- Alan Vaz Lopes – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)
- Guilherme Fernandes Marques – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH
- Silvia Saito – Cemaden

Por fim, ao SiDi e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL pelo suporte. Também agradeço a UFMG, CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo amparo

“Do rio que tudo arrasta se diz que é violento.
Mas ninguém diz violentas as margens que o comprimem. “

Bertolt Brecht

RESUMO

O conceito de risco de inundação tem evoluído ao longo do tempo, incorporando diferentes dimensões que o tornam mais abrangente e aplicável à gestão de desastres. Nessa perspectiva, este estudo adota a estrutura hierárquica proposta por Sayers et al. (2013), que define o risco como a combinação entre probabilidade de ocorrência, exposição e vulnerabilidade. Assim, o objetivo principal desta dissertação é desenvolver uma sistemática de análise de risco de inundações que auxilie gestores na tomada de decisão, considerando aspectos físicos e socioeconômicos em sub-bacias brasileiras. Para tanto, foram selecionados e ponderados critérios e indicadores para representar as três dimensões do risco. Os indicadores de perigo incluem variáveis como número de dias com precipitação acima de determinado valor, intensidade de precipitação, índice topográfico de umidade e fluxo acumulado. Os indicadores de exposição abrangem uso e ocupação do solo, densidade demográfica e infraestrutura essencial; já a vulnerabilidade foi representada por variáveis socioeconômicas, como distribuição etária, acesso a serviços e alfabetização. A ponderação dos indicadores foi realizada por meio de consulta a especialistas, utilizando técnica participativa para a hierarquização das variáveis. A sistemática foi aplicada à sub-bacia Nascentes, identificando áreas de maior risco em Cachoeira do Campo, Amarantina e a montante do reservatório de Rio de Pedras. A validação, realizada em comparação ao Atlas de Vulnerabilidade a Inundações da ANA, revelou divergência no trecho do Rio das Velhas, indicando que a metodologia captou nuances distintas da abordagem da ANA. Apesar dessa diferença, a sistemática se mostrou eficaz na identificação de áreas de risco. Por fim, recomenda-se para estudos futuros o refinamento da sensibilidade do modelo em zonas rurais.

Palavras-chave: risco; inundação; ponderação de indicadores; método multicritério; vulnerabilidade.

ABSTRACT

The concept of flood risk has evolved over time, incorporating different dimensions that make it more comprehensive and applicable to disaster management. In this context, this study adopts the hierarchical framework proposed by Sayers et al. (2013), which defines risk as a combination of probability of occurrence, exposure, and vulnerability. Thus, the main objective of this dissertation is to develop a systematic approach for flood risk analysis to support decision-making, considering physical and socioeconomic aspects in Brazilian sub-basins. To this end, criteria and indicators were selected and weighted to represent the three dimensions of risk. Hazard indicators include variables such as the number of days with precipitation above a certain threshold, precipitation intensity, topographic wetness index, and flow accumulation. Exposure indicators cover land use and occupation, population density, and critical infrastructure; whereas vulnerability was represented by socioeconomic variables, such as age distribution, access to services, and literacy. The weighting of indicators was performed through expert consultation, using a participatory technique for variable ranking. The methodology was applied to the Nascentes sub-basin, identifying higher-risk areas in Cachoeira do Campo, Amarantina, and upstream of the Rio de Pedras reservoir. The validation, performed in comparison to ANA's Flood Vulnerability Atlas, revealed a divergence in the Rio das Velhas section, indicating that the methodology captured nuances distinct from ANA's approach. Despite this difference, the systematic approach proved effective in identifying risk areas. Finally, refining the model's sensitivity in rural zones is recommended for future studies.

Keywords: risk; flooding; indicator weighting; multicriteria method; vulnerability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Etapas metodológicas para o desenvolvimento da sistemática de análise de risco para áreas suscetíveis à inundação	24
Figura 2- Estrutura hierárquica do risco e seus componentes	27
Figura 3- Estrutura hierárquica dos indicadores do risco	63
Figura 4- Visão inicial da tela da dinâmica. A) Esquema hierárquico dos indicadores, critérios e dimensões do risco. B) Grupo 1 - dimensões do risco C) Grupo 2 - Indicadores de Perigo D) Grupo 3 - Indicadores de Exposição.....	66
Figura 5- Tempo de experiência dos especialistas	69
Figura 6-Gráfico de frequência acumulativa das etapas do gerenciamento de inundações que os especialistas já atuaram	70
Figura 7- Boxplot pesos das dimensões do risco	76
Figura 8- Boxplot pesos dos indicadores de perigo.....	76
Figura 9- Boxplot pesos dos indicadores de exposição	77
Figura 10 – Diagrama com os processos para aplicação da ferramenta	81
Figura 11- Componentes da Vulnerabilidade	89
Figura 12-Localização da sub-bacia das Nascentes	91
Figura 13- Mapa pedológico da sub-bacia Nascentes	92
Figura 14- Chuva acumulada diária histórica da estação Fazenda Água Limpa Jusante (2043056).....	94
Figura 15- Boxplot com a distribuição dos máximos valores diários registrados para o mês mais chuvoso do histórico	95
Figura 16- Número de dias por ano com precipitação diária superior a 45 mm ao longo do período histórico analisado.....	95
Figura 17- Classificação a sub-bacia Nascentes quanto o indicador Distância do rio	96
Figura 18- Classificação a sub-bacia Nascentes quanto o indicador Hand.....	97
Figura 19- Classificação do solo da sub- bacia Nascentes quanto o indicador Grupo Hidrológico	98
Figura 20- Classificação da sub-bacia Nascentes quanto o indicador Cobertura do solo	99
Figura 21- Índice topográfico de umidade da sub-bacia Nascentes.....	100
Figura 22- Fluxo acumulado da sub-bacia Nascentes	100

Figura 23- Indicador de elementos vulneráveis, densidade demográfica.....	101
Figura 24- Indicador de elementos vulneráveis - Escolas na sub-bacia Nascentes	102
Figura 25- Indicador de elementos vulneráveis Infraestrutura rodoviária	102
Figura 26- Uso e ocupação da sub-bacia Nascentes.....	104
Figura 27- Taxa de alfabetização	104
Figura 28- Classe de renda por setor censitário na sub-bacia Nascentes	106
Figura 29- Taxa de moradias inadequadas	107
Figura 30- Imagem do google de comunidade em Cachoeira do Campo distrito de Ouro Preto.....	107
Figura 31- Taxa de moradores com mais de 70 anos ou menos de 5 anos.....	108
Figura 32- Taxa de domicílios sem acesso a esgotamento sanitário	109
Figura 33- Taxa de domicílios sem acesso a coleta de lixo	109
Figura 34- Taxa de domicílios sem acesso a abastecimento de água por rede geral	110
Figura 35 Mapa de Perigo da sub-bacia Nascentes.....	111
Figura 36-Comparação dos resultados com resultados obtidos com simulação hidrodinâmica.....	112
Figura 37-Mapa de perigo do Distrito de Cachoeira do Campo	113
Figura 38 – Mapa de exposição para a bacia Nascentes.....	114
Figura 39- Mapa de vulnerabilidade da sub-bacia Nascentes.....	116
Figura 40- Mapa de Risco	119
Figura 41- Comparação entre Indicadores de vulnerabilidade para a RMBH	161
Figura 42- Resultado do mapa de risco conforme variações nos pesos dos componentes do risco	162

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1- Classificação adotada pelo Atlas de vulnerabilidade de inundações53
- Quadro 2 - Estado onde estão alocados os especialistas e a sua área de atuação .68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pesos atribuídos aos indicadores de Perigo	77
Tabela 2- Pesos atribuídos aos indicadores de exposição	78
Tabela 3- Variáveis que serão usadas no novo indicador de vulnerabilidade disponíveis no Censo 2010	79
Tabela 4- Valores para reclassificação dos indicadores de perigo.....	85
Tabela 5- Valores para reclassificação dos indicadores de exposição.	86
Tabela 6- Classificação das faixas de renda segundo ABEP 2010.....	87
Tabela 7- Resumo dos elementos de macrodrenagem.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Cemaden – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IVS – Índice de Vulnerabilidade Social

MapBiomias – Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil

MDE – Modelo Digital de Elevação

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

ROC-AUC – Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve (métrica usada para avaliar modelos preditivos)

RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte

SCS – Soil Conservation Service (método de estimativa de escoamento superficial)

SEDEC – Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil

SGB – Serviço Geológico do Brasil

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (missão da NASA para obtenção de dados topográficos)

UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (Escritório das Nações Unidas para Redução do Risco de Desastres)

UTE – Unidades Territoriais Estratégicas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS	22
2.1	Objetivo Geral	22
2.2	Objetivos Específicos	22
2.3	Etapas metodológicas	22
3	REVISÃO DA LITERATURA	25
3.1	O conceito de risco para áreas suscetíveis a inundação	25
3.2	Levantamento de critérios e indicadores de risco na literatura	29
3.2.1	Critérios e indicadores do Perigo	30
3.2.2	Critérios e indicadores de Exposição	36
3.2.3	Critérios e indicadores de Vulnerabilidade	38
3.3	Escala adequada para a avaliação do risco de inundação	40
3.4	Mapeamento de risco no mundo	42
3.5	Mapeamento de risco no Brasil	45
4	ESCOLHA DOS CRITÉRIOS E INDICADORES	54
4.1	Fundamentos para escolha de critérios e indicadores para análise de risco 54	
4.2	Escolha dos critérios	55
4.3	Escolha dos indicadores	56
5	PONDERAÇÃO DAS DIMENSÕES DO RISCO E DOS INDICADORES	64
5.1	Metodologia para ponderação dos critérios e indicadores por especialistas 64	
5.2	Perfil dos Especialistas	67
5.3	Contribuições das entrevistas	70
5.4	Resultados da Ponderação dos critérios e indicadores por especialistas...75	
5.5	Resultados da ponderação dos indicadores referentes à dimensão vulnerabilidade.....78	
6	PROPOSTA DA SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE RISCO EM ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÃO	80
6.1	Reclassificação dos indicadores	82
6.2	Definição das dimensões de perigo, exposição e vulnerabilidade	88
6.3	Definição do índice de Risco	89
7	ESTUDO DE CASO	91
7.1	Área de Estudo	91
7.2	Levantamento dos Indicadores	93
7.2.1	Indicadores de Perigo	93

7.2.2	Indicadores de Exposição	101
7.2.3	Indicadores de Vulnerabilidade	104
7.3	Mapa de Perigo.....	110
7.4	Mapa de Exposição.....	113
7.5	Mapa de Vulnerabilidade	114
7.6	Mapa de Risco	116
8	CONCLUSÕES	120
9	RECOMENDAÇÕES.....	122
	REFERÊNCIAS.....	124
	APÊNDICE A– Indicadores de perigo	134
	APÊNDICE B – Indicadores de exposição	137
	APÊNDICE C – Indicadores de Vulnerabilidade	138
	APÊNDICE D – Lista de bases de dados.....	141
	APÊNDICE E – Informações Disponíveis por Setor Censitário no Censo 2010	144
	APÊNDICE F – Apresentação realizada para os especialistas	145
	APÊNDICE G – Validação do indicador de vulnerabilidade para RMBH	160
	APÊNDICE H – Análise de sensibilidade dos indicadores do risco.....	162
	ANEXO A – Classificação hidrológica do tipo de solo.....	163
	ANEXO B – Indicadores do indicador de vulnerabilidade IVS.....	167
	ANEXO C– Classificação das escalas dos tipos de avaliação de risco	168

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população urbana e o aumento da ocorrência de precipitações intensas têm contribuído para a ampliação do número de pessoas afetadas por eventos de inundação em todo o mundo. A inundação consiste no extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio (IBGE, 2025). Conforme o *Word meteorological organization* (2024) as inundações causam mais de 40 bilhões de dólares em danos a cada ano ao redor do mundo, além disso, esse número tem aumentado a cada ano, de 2000 a 2015 o número de pessoas vivendo em áreas propensas a inundações aumentou de, aproximadamente, 58 milhões para 86 milhões, um aumento de 24%.

Para lidar com o aumento dos danos gerados por inundações, diversas ações para sua redução têm sido criadas e aplicadas por órgãos governamentais e não governamentais que buscam ações cada vez mais eficientes, incentivando, dessa forma, novos estudos acerca do assunto. Além disso, o surgimento de novas tecnologias, a ampliação da capacidade computacional e a melhoria do sensoriamento remoto tem atraído a atenção de pesquisadores que veem nessas mudanças uma oportunidade de melhoria nas técnicas de análise de risco de inundação.

A Lei Federal n.º 12.608, de 10 de abril de 2012, instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) que dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC). O seu objetivo é estabelecer diretrizes para a redução de desastres no Brasil, incluindo medidas de prevenção, preparação, resposta e recuperação diante de eventos adversos, como inundações.

O marco de Sendai (2015) aponta a necessidade do mapeamento de risco de inundação, que é uma estratégia não estrutural, mas que beneficia a sociedade, visto que atua de forma direta na redução da vulnerabilidade e auxilia os tomadores de decisão a identificarem as regiões com maior necessidade de investimentos em obras preventivas ou ações mitigatórias (CHEN; ALEXANDER, 2022). Além disso, o mapeamento de risco reduz a suscetibilidade da comunidade, pois auxilia na aprimoração da preparação para responder a tais eventos (SAYERS et al., 2013).

No entanto, ainda há dificuldades em quantificar o risco. Um dos principais problemas é a escassa disponibilidade de bancos de dados qualificados. Outro desafio é a dificuldade de se encontrar um método para traduzir o caráter multidimensional do risco, tratando não apenas o perigo, mas também os danos potenciais e a vulnerabilidade tanto das pessoas quanto dos locais afetados (GRIGG, 2023).

Dessa forma, este trabalho se propõe a desenvolver uma sistemática baseada em análise multicritério para avaliação de risco de inundações em macrobacias brasileiras, tendo como principal finalidade a priorização de investimentos. No entanto, o seu uso pode se estender a outras aplicações, como apoio à gestão de risco de inundações, à definição de políticas públicas e à tomada de decisão por gestores e demais atores envolvidos na gestão de riscos.

Para minimizar os impactos negativos das inundações, é fundamental adotar medidas de mitigação do risco. No entanto, devido à limitação de recursos torna-se essencial priorizar as áreas de maior risco. Essa priorização permite uma alocação mais eficiente de investimentos, garantindo que os esforços sejam direcionados para onde os impactos potenciais são mais significativos.

Atualmente, a avaliação do risco ainda se concentra na análise das consequências sob um viés predominantemente econômico, por dois motivos principais, o primeiro é facilitar a compreensão da dimensão do dano ao associá-lo a prejuízos financeiros e o segundo é que avaliações de risco são amplamente utilizadas por seguradoras que precisam calcular o custo do seguro. No entanto, o nosso objetivo é adotar uma visão holística dos impactos das inundações, considerando não apenas as perdas econômicas, mas também os danos ambientais, culturais e sociais. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma sistemática que adote o conceito de risco multidimensional que inclua as componentes perigo, exposição e vulnerabilidade, conforme descrito por Sayers et al. (2013).

2 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente estudo consiste em desenvolver uma sistemática de análise de risco de inundações para auxiliar a tomada de decisões por gestores que contemple aspectos físicos e sócio-econômicos para sub-bacias brasileiras.

2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral foram definidos três objetivos específicos apresentados a seguir:

- Identificar e selecionar critérios e indicadores multidisciplinares para a análise de perigo, exposição e vulnerabilidade em áreas suscetíveis à inundação;
- Avaliar a importância relativa dos critérios e indicadores selecionados;
- Avaliar a aplicabilidade da metodologia por meio de um estudo de caso.

2.3 Etapas metodológicas

Esse trabalho se propõe ao desenvolvimento de uma sistemática para análise de risco em áreas suscetíveis à inundação, conforme apontado na seção 2.1. O processo de desenvolvimento é composto por 3 etapas principais: levantamento e escolha dos indicadores e critérios, ponderação dos indicadores e critérios e, por fim, aplicação da sistemática a um estudo de caso. A Figura 1 ilustra essas etapas metodológicas.

O levantamento dos indicadores e critérios foi realizado a partir de uma extensa revisão bibliográfica, que buscou trabalhos relevantes de diferentes países. A escolha dos critérios e indicadores contemplou diferentes aspectos da análise do risco. Dessa forma, foram selecionados critérios que englobam aspectos relevantes para as bacias hidrográficas brasileiras e que sejam amplamente utilizados para a caracterização do perigo, da vulnerabilidade e da exposição. Em complemento, a escolha dos indicadores também foi baseada na relevância regional do indicador e ainda na disponibilidade de bancos de dados.

Para a ponderação das dimensões do risco, assim como, os indicadores de perigo e exposição selecionados, foram realizadas entrevistas com especialistas utilizando a

técnica do jogo de cartas como instrumento para facilitar a comparação e ranqueamento dos indicadores. Os resultados foram analisados para a definição dos pesos. Além disso, algumas conclusões das discussões realizadas durante as entrevistas foram incorporadas à sistemática. Já para os critérios e indicadores de vulnerabilidade foi realizada a ponderação equitativa.

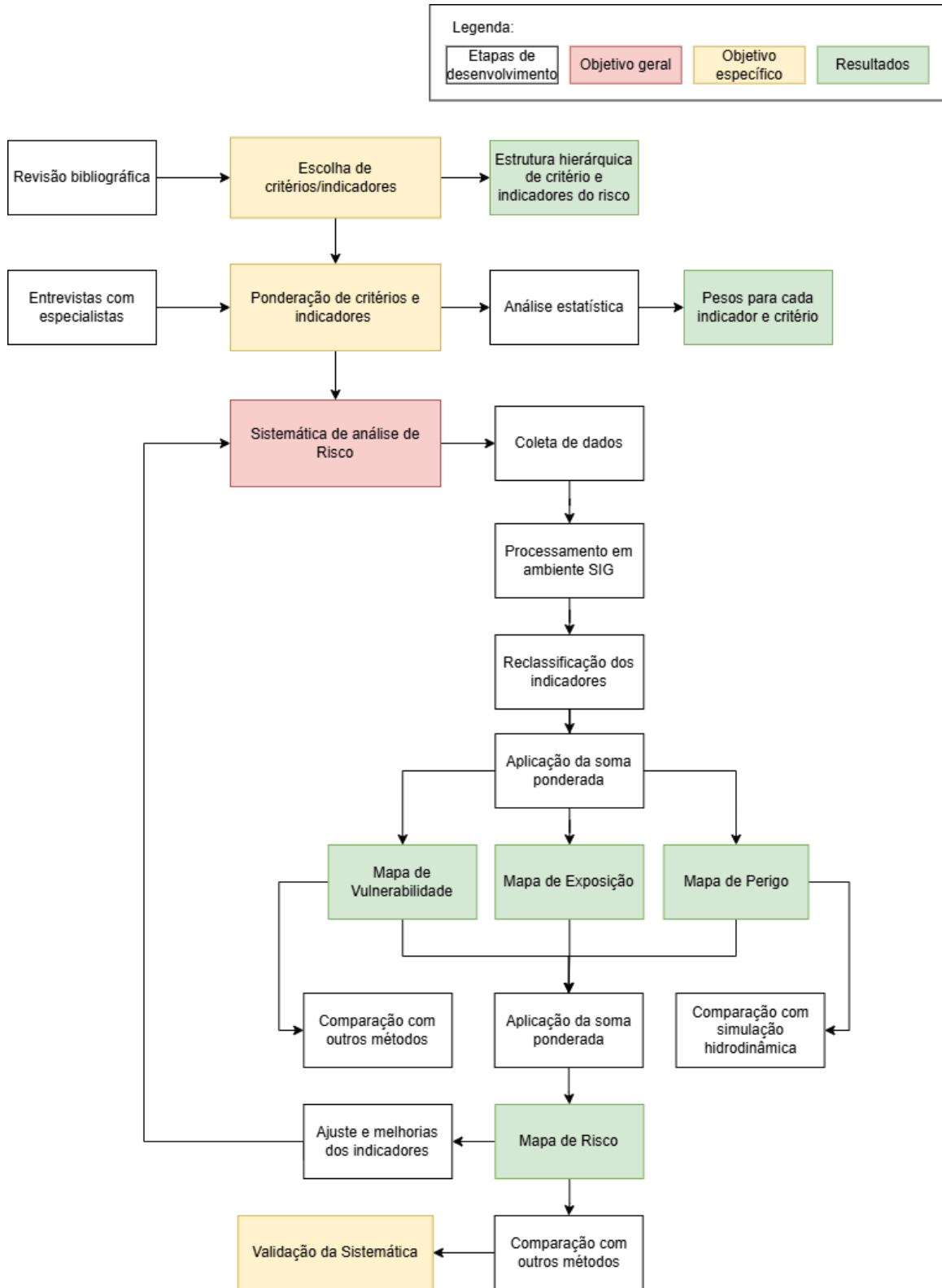
Todo o processamento necessário foi realizado em ambiente SIG, dessa forma os indicadores que não foram obtidos em forma de mapas foram transformados para que as informações estivessem espacializadas. Assim, todos os indicadores apresentam as informações espacializadas e cada célula do mapa apresenta um valor específico para o local.

Os indicadores de perigo, exposição e vulnerabilidade passaram então por uma reclassificação para que eles estivessem na mesma unidade e assim pudessem ser combinados, por meio de álgebra de mapas utilizando a soma ponderada para definir um mapa para cada uma das componentes do risco. Os mapas de perigo, vulnerabilidade e exposição obtidos passaram por uma nova soma ponderada para a obtenção do mapa final com o índice de risco.

O mapa de risco obtido apresenta duas possibilidades de utilização, a primeira é o resultado espacializado do risco em uma sub-bacia, o outro resultado é o valor do risco global da sub-bacia obtido pela soma ponderada do risco pela área associada ao valor. Essa informação geral da bacia pode ser utilizada para a comparação do risco entre diferentes sub-bacias e, dessa forma, auxiliar na análise de priorização de recursos destinados à redução do risco.

Por fim, a verificação da aplicabilidade da sistemática proposta foi realizada por meio de um estudo de caso aplicado a uma sub-bacia do rio das Velhas. Para validar os resultados obtidos, o mapa de perigo gerado pela metodologia foi comparado com o mapa temático de inundação disponível na plataforma PROX (2025), baseado em simulações hidrodinâmicas. Já o mapa de risco foi comparado com os dados do Atlas de Vulnerabilidade a Inundações (ANA, 2014), que classifica os trechos dos rios brasileiros com base na frequência de ocorrência de eventos de inundação e no grau de impacto associado. Essa análise permitiu uma avaliação qualitativa da coerência entre os produtos gerados e mapas disponíveis em bases de dados oficiais.

Figura 1- Etapas metodológicas para o desenvolvimento da sistemática de análise de risco para áreas suscetíveis à inundação



Fonte - Autor (2025)

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O conceito de risco para áreas suscetíveis a inundação

De acordo com a Política Nacional de Defesa Civil, o risco de desastres depende do grau de perigo, da quantidade de elementos expostos e da vulnerabilidade desses elementos, em função das condições naturais, sociais, econômicas e ambientais existentes (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2007).

Todavia, o termo risco pode receber diferentes significados como ameaça, perigo ou acidente. No contexto de desastres naturais, o risco foi, em um primeiro momento, associado apenas ao perigo, sem considerar aspectos relacionados à vulnerabilidade social das comunidades expostas (MONTE, 2022). Assim, o gerenciamento de inundações baseava-se principalmente em medidas estruturais, como a construção de diques e bacias de contenção, projetadas para minimizar o perigo. Contudo, eventos extremos ultrapassaram a capacidade dessas infraestruturas, resultando em grandes prejuízos econômicos, perdas de vidas e aumento do número de desabrigados. Isso evidenciou que apenas a redução do perigo não era suficiente para mitigar o risco de inundações (SAYERS *et al.*, 2013).

Diante disso, ações complementares, como o mapeamento de áreas de alta probabilidade de inundação, restrição do uso e ocupação dessas áreas, implantação de sistemas de alerta antecipado e projetos para a educação da população sobre o risco de inundação, começaram a ser adotadas. Essas medidas visavam minimizar tanto os danos econômicos como os impactos na segurança das pessoas (DE MOEL; VAN ALPHEN; AERTS, 2009).

Segundo Merz *et al.* (2010), o foco, que estava apenas no controle das enchentes por meio de grandes obras de defesa, migrou para o planejamento e preparação de emergências que consideram, também, ações não estruturais de mitigação de inundações. Conseqüentemente, ocorreu uma mudança no entendimento associado ao risco que passou a considerar não apenas a probabilidade e intensidade dos eventos, mas também os danos que podem ocorrer.

Suleiman (2021) corrobora como esse entendimento e aponta que a análise de desastres foi iniciada com o paradigma tecnocêntrico, no qual os desastres eram

vistos como fenômenos naturais que poderiam ser controlados por meio de monitoramento e soluções de engenharia. Em seguida, a análise evoluiu para o Paradigma Comportamental, que enfatiza a adaptação humana ao ambiente e a relação entre a ocupação territorial e os riscos. Posteriormente, surgiu o Paradigma da Vulnerabilidade, que ressalta como as desigualdades sociais amplificam os impactos dos desastres. Atualmente, a análise de risco fundamenta-se no Paradigma da Complexidade, que trata os desastres de forma sistêmica, considerando fatores físicos, sociais, econômicos e políticos.

Para o desenvolvimento de uma sistemática para a análise do risco de inundação é necessário entender o conceito do risco e utilizar definições adequadas ao contexto de inundações. Trata-se de uma atividade complexa devido à variedade de disciplinas envolvidas (GOERL; KOBIYAMA; PELLERIN, 2012). Além disso, observa-se a ausência de consenso na literatura especializada, mas Chen e Alexander (2022) afirmam que atualmente existem duas estruturas conceituais mais comuns, uma que combina perigo e vulnerabilidade, enquanto outra relaciona a probabilidade do evento com a expectativa de danos e cada uma é utilizada para um objetivo específico. Portanto, para definir qual conceito será utilizado é necessário identificar o objetivo desejado com o estudo (WANG *et al.*, 2011), como podemos observar nos trabalhos analisados a seguir.

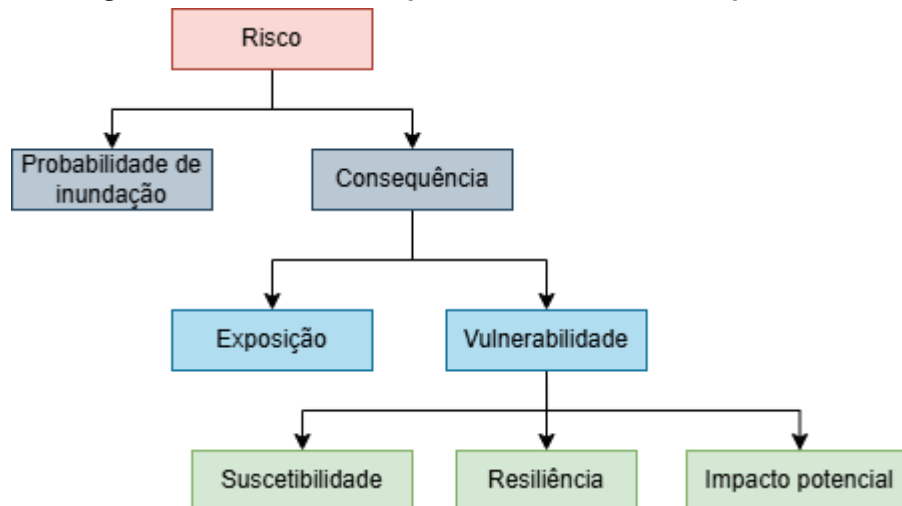
Para Merz *et al.* (2010) o risco é definido como o dano que ocorre ou que será excedido com uma certa probabilidade, a análise do risco nesse caso recebe um enfoque econômico, uma vez que o principal objetivo, nesse contexto, é realizar as avaliações de danos causados por inundações e identificar medidas financeiramente adequadas de redução de riscos, pois, segundo o autor, medidas de mitigação de enchentes devem considerar não apenas a eficácia, mas também o custo-benefício da implantação.

Já para De Moel, Van Alphen e Aerts, (2009), Sayers-*et al.* (2013) e Monte *et al.* (2021) o conceito de risco está ligado à incerteza e a possibilidade de perda de bens materiais ou imateriais. Essa definição é aplicada no contexto em que a abordagem busca reduzir o risco através da limitação da magnitude do evento ou pelo aumento da capacidade de resposta da comunidade.

Sob uma visão olistica, Wang et al.(2011) utilizam o conceito de risco baseado na teoria dos sistemas de desastres, onde os desastres são tratados como processos sistêmicos que resultam da interação entre perigo e vulnerabilidades sócio-econômicas, ambientais e institucionais. E em vez de focar apenas no fenômeno natural, a teoria considera aspectos sociais, econômicos e institucionais que aumentam ou reduzem o impacto e, por outro lado, consideram também como os desastres geram aprendizados e mudanças no sistema, podendo levar à criação de políticas de mitigação e aumento da resiliência da sociedade, ou seja, o risco não é estático; ele evolui ao longo do tempo e das ocorrências..

Sayers et al. (2013) define o risco através de uma estrutura hierárquica composta por diferentes dimensões, sendo elas: a probabilidade da ocorrência, a exposição e a vulnerabilidade, visto que segundo os autores, " para entender as consequências de uma inundação é necessário conhecer a natureza dos elementos expostos bem como a inundação que os impactará". A Figura 2 apresenta essa estrutura hierárquica, onde o risco é composto por múltiplas camadas.

Figura 2- Estrutura hierárquica do risco e seus componentes



Fonte: Adaptado de Sayers et al. (2013)

No nível mais alto, encontra-se a probabilidade de ocorrência da inundação e as suas consequências. Esses aspectos são influenciados por fatores como a frequência dos eventos desencadeadores e a eficácia dos sistemas de proteção no controle do fluxo da água. Dentro dessa estrutura, a exposição é definida como o número de elementos que podem ser afetados por um evento de inundação. Já a vulnerabilidade refere-se

ao potencial de danos que um receptor pode sofrer durante um evento de inundação, sendo composta por três dimensões:

- Suscetibilidade, que indica a propensão de um elemento vulnerável a sofrer danos;
- Impacto potencial, expresso pelo grau de prejuízo econômico, social ou ambiental que pode ser causado;
- Resiliência, que se refere à capacidade de recuperação do receptor sem necessidade de assistência externa.

Monte (2022) amplia a perspectiva de vulnerabilidade, a descrevendo como o grau de fragilidade de uma comunidade ou sistema, determinado por fatores físicos, sociais, culturais, econômicos, tecnológicos e políticos, que afetam a sua capacidade de resposta. Nesse sentido, a capacidade de resposta de uma sociedade representa a sua aptidão para reagir e absorver os impactos dos perigos, ou seja, a resiliência.

Em busca de padronização, a ONU instituiu, em 2017, um conjunto de terminologias orientada para o Marco de Sendai para a redução do risco de catástrofes onde promove uma compreensão e utilização de conceitos comuns. Nesse esforço, a UNDRR (2015), definem o risco como a probabilidade de um evento ocorrer e nas condições que determinam a sua gravidade. Essa definição considera que o risco é determinado pela interação entre perigo, exposição, vulnerabilidade e a capacidade de resposta ao impacto.

Sulaiman (2021) destaca a importância de compreender o risco de desastres como um fenômeno multifatorial, resultante da interação entre ameaça, vulnerabilidade e capacidade de resposta. Nessa publicação o risco é definido conforme a Equação (1) na qual o risco (R) é determinado pela probabilidade de ocorrência de uma ameaça ($P(fA)$) e as suas consequências ($C(fV)$), moduladas pela vulnerabilidade e pela capacidade de gerenciamento do problema (g). Essa abordagem permite uma avaliação mais completa do risco e pode considerar tanto eventos passados quanto a possibilidade de novas ocorrências. Além disso, reforça a necessidade de fortalecer a resiliência das comunidades e das instituições locais, uma vez que a capacidade de

enfrentamento pode mitigar significativamente os impactos negativos das ameaças identificadas.

$$R = \frac{P(fA) * C(fV)}{g} \quad (1)$$

Após a análise dos conceitos de risco e do objetivo desse trabalho, será adotado o conceito de risco apresentado por Sayers et al. (2013), visto que ele é amplamente utilizado na literatura e engloba os conceitos usados pelo UNDRR e o pela política Nacional de defesa Civil. Porém, essa abordagem será adaptada: A consequência será representada diretamente pela exposição e vulnerabilidade, como representado pela Equação (2).

$$R = f(P, E, V) \quad (2)$$

3.2 Levantamento de critérios e indicadores de risco na literatura

A análise de risco tem o objetivo de compreender a natureza e a magnitude dos desastres. Esse processo envolve a identificação de ameaças potenciais e a avaliação das condições de exposição e vulnerabilidade, cujos impactos podem afetar pessoas, bens, serviços, meios de subsistência e o ambiente dos quais dependem (UNDRR, 2025).

Os mapas de risco em áreas suscetíveis à inundação são criados quando são combinadas informações de exposição e vulnerabilidade com as informações de perigo (CHEN; ALEXANDER, 2022). Esses mapas são utilizados para fins de comunicação, apoio ao planejamento territorial, definição de valores seguráveis e priorização de investimentos.

De Moel et al. (2015) e Grigg (2023) apresentaram abordagem semelhante para obtenção de mapas de risco, em que o processo é iniciado com a avaliação do perigo da inundação, que determina a probabilidade e intensidade dos eventos. Em seguida, informações de infraestrutura e população são sobrepostas às informações de perigo para avaliar a exposição. E por fim, a vulnerabilidade também é considerada.

Para gerar esses mapas, são usados critérios e indicadores específicos que possuam alta correlação com a dimensão que se deseja retratar. Por exemplo, a dimensão da exposição pode ser estimada por meio de dados demográficos ou de mapeamento de

estruturas construídas, enquanto para os aspectos de perigo podem ser considerados dados de frequência de chuvas e a eficácia de estruturas de proteção existentes.

Conforme De Moel et al. (2015) a avaliação do risco de inundação pode considerar múltiplos critérios e indicadores, contudo a escolha desses deve ser realizada de acordo com a metodologia a ser utilizada, da escala do estudo, das características específicas do local, da proposta da avaliação e da disponibilidade de dados. Dung et al. (2022) destacam a diversidade de critérios na caracterização do risco de inundação, no entanto, os motivos para suas escolhas não são claros e a sua importância varia regionalmente.

A fim de identificar os critérios e indicadores utilizados na literatura, realizou-se um levantamento de estudos de risco em áreas suscetíveis a inundação considerando as diversas dimensões envolvidas: perigo, exposição e vulnerabilidade. Os resultados são apresentados nas seções a seguir.

3.2.1 Critérios e indicadores do Perigo

O perigo de inundação é definido como a ameaça representada por eventos de cheia, caracterizada pela probabilidade de ocorrência e pela magnitude desses eventos (MISHRA; SINHA, 2020). Para que sua avaliação seja eficaz, é necessário considerar os fatores que contribuem para a geração das enchentes, incluindo variáveis climáticas, características da superfície e a presença de estruturas de controle, como obras de contenção (DUNG et al., 2022; DE MOEL et al., 2015; TUCCI, 2005).

Nesse contexto, este capítulo apresenta os principais indicadores utilizados para a avaliação do perigo de inundação, organizados em seis categorias temáticas: características do solo, aspectos geomorfológicos, características topográficas, características hidráulico/hidrológico, precipitação e medidas estruturais de contenção.

As precipitações são um dos fatores que contribuem para a formação das enchentes e por isso é observado o seu uso na maioria dos trabalhos de análise de risco de inundações. Ogato et al. (2020), por exemplo, utilizam chuva total mensal, enquanto Gudiyangada et al. (2020) e Ahmed et al. (2024) utilizam informações de chuva média anual. Os autores citados utilizam valores médios para correlacionar a ocorrência de

precipitação com a formação de cheias, mas para outros autores apenas essa informação não é suficiente.

Tucci (2005), por exemplo, afirmou que o tipo de chuva influencia na formação das enchentes, por exemplo, as precipitações mais intensas do tipo convectivo e orográfico, são normalmente localizadas e geram em pequenas bacias inundações rápidas. Chuvas frontais, por sua vez, afetam grandes áreas, ocasionando inundações em rios de maior porte. Dessa forma, utilizar a classificação da chuva podem melhorar os resultados, no entanto, ainda é uma prática não usual em análise de risco.

Chen e Alexander (2022) utilizam a premissa que a magnitude das inundações depende da intensidade e duração das chuvas. Dessa forma, esses autores utilizam os indicadores de chuva proposto pela equipe de especialistas em Detecção, Monitoramento e Índices de Mudanças Climáticas ligado à Organização Meteorológica Mundial (WMO) e ao Programa Mundial de Pesquisas Climáticas (WCRP). Dentre os indicadores usados estão a precipitação máxima de 5 dias, que representa valores máximos de um ano, o R20, gerado pela contagem anual de dias com precipitação diária acima de 20 mm e a precipitação diária extrema, R99, que descreve a fração de precipitação total anual acima do percentil 99.

Outros autores utilizam informações sobre chuvas intensas para identificar regiões mais propensas a inundações. Kittipongvises et al. (2020) propõe o uso da máxima chuva diária como indicador. Já De Almeida (2023) considera o impacto de três dias consecutivos de chuva, pois, segundo o autor, enchentes frequentemente ocorrem quando chuvas intensas se prolongam por vários dias. Nesses casos, o solo pode atingir o seu limite de saturação, e os canais de drenagem não conseguem absorver ou escoar toda a água acumulada, resultando em transbordamentos.

Por fim, a literatura evidencia a relevância das precipitações como indicador que deve ser considerado na análise de risco para inundações, mas existe variabilidade nos indicadores utilizados. Abordagens que utilizam mais de uma informação, são mais eficientes, pois retratam melhor as condições locais. E apesar de informações de intensidade e duração ser um indicador mais eficiente do que o uso de valores de chuvas médias, eles ainda são pouco utilizados.

Conforme Dung et al. (2022b), existem ainda outros fatores que influenciam a geração das enchentes. Dentre eles estão as características da superfície que foi subdividida, arbitrariamente nesse trabalho, em critérios topográficos, geomorfológicos, características do solos, que abrange a cobertura do solo e os tipos de solo, e características hidráulico/hidrológicas da bacia.

Existe uma grande diversidade de critérios topográficos na literatura, mas de forma geral eles caracterizam as variações da superfície, mapeando a elevação e inclinação do terreno. A elevação e a declividade são os indicadores mais comuns por serem de simples obtenção e interpretação. Eles foram observados nos trabalhos de Fernández e Lutz (2010), Wang et al. (2011), Tehrany; Pradhan; Jebur (2014), Marques; Silva; de Camargo (2017), Carlos et al. (2018), Ogato et al. (2020), Kittipongvises et al. (2020), Gudiyangada et al. (2020), Tang et al. (2021), Ahmed et al. (2024), Chen e Alexander (2022), De Lima; Faccioli; Medeiros (2024). Já a direção da inclinação, distância horizontal de escoamento superficial e distância vertical de escoamento superficial também foram identificados, mas em um número menor de trabalhos (GUDIYANGADA et al., 2020; PAPAIOANNOU; VASILIADES; LOUKAS, 2015):

Observa-se a existência de outros indicadores topográficos mais completos como o índice de posição topográfica, que classifica a posição de um ponto como topo, fundo de vale, encosta ou área plana, com base na comparação da sua elevação com a média das elevações vizinhas (PAPAIOANNOU; VASILIADES; LOUKAS, 2015); o índice topográfico de umidade que quantifica a influência da topografia no escoamento superficial e acúmulo de água no solo (AHMED et al., 2024; GUDIYANGADA et al., 2020; PAPAIOANNOU; VASILIADES; LOUKAS, 2015; TEHRANY; PRADHAN; JEBUR, 2013, 2014), o índice de potência do fluxo utilizado para identificar áreas suscetíveis à erosão e ao transporte de sedimentos (GUDIYANGADA et al., 2020; TEHRANY; PRADHAN; JEBUR, 2013, 2014); e o fluxo acumulado consiste na quantidade total de água que flui por uma área (AHMED et al., 2024; PAPAIOANNOU; VASILIADES; LOUKAS, 2015). Embora ofereçam informações mais detalhadas sobre o escoamento superficial, tais indicadores exigem conhecimentos avançados em ferramentas de SIG, o que pode limitar sua aplicação.

De acordo com Tucci (2005) a cobertura do solo auxilia na interceptação de parte da chuva e protegem o solo contra a erosão, dessa forma, a perda da cobertura natural do solo aumenta a frequência das inundações devido à falta de interceptação e aumento do assoreamento de rios. As coberturas artificiais, como as presentes em áreas urbanas, tornam a superfícies impermeáveis aumentando o escoamento superficial e por consequência a frequência de cheias rápidas. O critério cobertura do solo foi representado na maior parte dos estudos, pela análise de uso e ocupação do solo. Os indicadores observados foram: tipo de cobertura do solo (BRITO e BASTOS, 2021; FERNÁNDEZ e LUTZ, 2010b); Índice de vegetação por diferença normalizada (CHEN e ALEXANDER, 2022; GUDIYANGADA et al., 2020); cobertura vegetal fracionada (TANG *et al.*, 2021); e cobertura vegetal (WANG *et al.*, 2011).

Informações sobre o tipo de solo é um fator determinante no nível de infiltração. Esse critério foi adotado por (Ahmed et al., 2024; De Lima; Faccioli; Medeiros, 2024; Marques; Silva; De Camargo, 2017; Ogato et al., 2020; Tehrany; Pradhan; Jebur, 2013, 2014). Para sua aplicação, considerou-se um único indicador: a classificação do solo com base no grau de infiltração.

O aspecto da geomorfologia é amplamente explorado, observa-se que o seu principal objetivo é analisar os processos dinâmicos de erosão, transporte e deposição de sedimentos que ocorrem dentro das bacias hidrográficas, resultando em formas de relevo como canais fluviais, planícies de inundação, meandros e deltas (CHRISTOFOLETTI, 1971). Dentre os indicadores catalogados nesse trabalho estão: área de deposição do canal, geologia, geomorfologia, profundidade do lençol freático e tipo de canal do rio. Vários desses indicadores possuem uma aplicação regionalizada, por exemplo, Mishra e Sinha (2020) utilizaram a presença de canais ativos, canais abandonados, corpos de areais, bancos de areia, superfície de leque aluvial no seu trabalho. Esses indicadores, não se aplicam a realidade brasileira, mas nos aponta a possibilidade de incluir outros indicadores que possam nos informar condições específicas ao nosso contexto social ou ambiental.

Além disso, foram catalogados nessa revisão bibliográfica uma grande variedade de indicadores hidráulico/hidrológicos. Esses indicadores abrangem desde características

como área e densidade de drenagem à aspectos relacionados ao escoamento superficial como coeficiente de rugosidade de Manning.

Dentre os indicadores catalogados estão a evaporação do tanque (ZHANG *et al.*, 2022), rede de drenagem (KITIPONGVISES *et al.*, 2020; OGATO *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2011), tempo de retardo (BRITO; BASTOS, 2021; LÜDTKE *et al.*, 2019; SCHOPPA *et al.*, 2020) e tempo de concentração (ARAUJO *et al.*, 2019; BRITO; BASTOS, 2021). Tais indicadores contribuem significativamente para a compreensão da dinâmica hidrológica regional. No entanto, sua aplicação em análises simplificadas é limitada, pois geralmente requerem modelagem hidrodinâmica.

Araújo *et al.* (2019) explorou indicadores hidrológicos em seu trabalho ao avaliar o coeficiente de compacidade, índice de conformação e o tempo de concentração. Esses indicadores podem informar à propensão de uma bacia a inundações, no entanto, pelo fato de serem altamente influenciados por outros fatores, como umidade prévia da bacia, a sua análise carece de avaliações complementares.

Outro indicador observado na literatura foi a presença de cheias a montante. Segundo De Melo, Almeida e De Almeida (2023), embora sejam necessárias mais estações para melhorar a precisão, os dados atuais indicam que as áreas com precipitação mais intensa cobrem menos de 3% das regiões analisadas, sugerindo que as cidades estudadas não estão nas zonas de maior precipitação. No entanto, as chuvas nessas áreas menores podem impactar significativamente, já que a água acumulada em áreas de captação ou regiões elevadas flui para áreas mais baixas, elevando o nível dos rios e podendo causar inundações. Assim, a chuva em áreas de montante é um importante indicador de risco de enchentes.

A distância até a rede de drenagem foi abordada em diversos estudos, como os de Fernández e Lutz (2010b), Gudiyangada *et al.* (2020) Tang *et al.* (2021), Ahmed *et al.* (2024), Tehrany, Pradhan e Jebur (2014), MISHRA e SINHA (2020) e De Melo; Almeida; De Almeida (2023). Nesses estudos a hipótese adotada é que quanto mais próximo do rio maior a possibilidade de ser atingido por uma inundação. Outros autores (KITIPONGVISES *et al.*, 2020; OGATO *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2011) adotam o indicador densidade de drenagem em que quanto maior o indicador maior a possibilidade de inundações.

A retenção de água no solo caracteriza a capacidade do solo de armazenar água e esse é um fator importante para a formação do escoamento superficial. Áreas com solos saturados, solos compactados ou com baixa capacidade de retenção tendem a ter taxas de escoamento muito maiores, resultando em um rápido acúmulo de água na superfície, o que pode levar a geração de enchente. Um indicador dessa condição é o *curve number* (CN) que consiste em um parâmetro adimensional associado ao tipo de solo, ao uso do solo e as condições antecedentes da bacia hidrográfica e foi desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS) para a análise de chuva-vazão. Nessa análise, quanto maior o CN, menor a infiltração e maior a vazão gerada.

Tucci (2005) adaptou a tabela original para a realidade brasileira permitindo o uso de classes mais coerentes com as nossas paisagens. Papaioannou; Vasiliades; Loukas (2015) utilizaram o CN em um método multicritério, já Brito e Bastos (2021) utilizam essa informação em uma simulação hidrológica. Um outro indicador que também pode caracterizar a resposta hidrológica da bacia é a retenção de água no solo usado por Tang et al. (2021).

A área da bacia hidrográfica também foi empregada como indicador, conforme proposto por Kittipongvises et al. (2020), em que quanto maior a área da bacia maior o escoamento superficial e conseqüentemente maior a possibilidade de ocorrência de inundações.

Para mapeamento de perigo baseado em simulações hidrodinâmicas como realizado por Brito e Bastos (2021) e Zhang et al. (2022) fatores como coeficiente de rugosidade de Manning e tempo de retorno são necessários. O período de retorno é uma informação relevante para a análise de perigo, uma vez que ele nos auxilia na verificação da probabilidade de ocorrência de certa magnitude do evento. Para obtenção desse indicador é necessário realizar estudos baseados em dados históricos de chuva. Já o coeficiente de Manning é uma característica local que define a velocidade do fluxo na área de inundação, a sua determinação pode não ser simples uma vez que os valores tabelados possuem grande dispersão e dessa forma, é necessário ajustar o valor através da calibração de modelos com informações de inundações passadas.

As implantações de medidas de prevenção de cheias ao longo da bacia, influenciam o comportamento da formação da vazão superficial, por exemplo, as barragens podem ter um efeito de regularização e dessa forma, reduzem os picos das cheias, já obras de retificação de canais tendem a aumentar a velocidade do escoamento aumentando a possibilidade da ocorrência de inundações. Observa-se que na literatura já foram considerados indicadores para esse fim como projeto de controle de enchentes por Wang et al. (2011). Nesse trabalho os autores tratam a densidade de diques como uma ação que contribui para a atenuação das cheias.

Por fim, alguns autores utilizam indicadores compostos é o caso de Mattedi et al., (2024), Ahmed et al. (2024), Tang et al. (2021), Tehrany, Pradhan e Jebur, (2013, 2014) que utilizam a classificação de suscetibilidade e não os indicadores que podem informar a suscetibilidade.

Em resumo, o perigo de inundação é caracterizado pela probabilidade de ocorrência e magnitude de eventos de inundação e deve considerar tanto fatores naturais, como clima e relevo, quanto elementos estruturais que influenciam o comportamento das enchentes, como obras de contenção. O Apêndice A consolida os indicadores identificados nesta revisão, acompanhados de suas respectivas fontes, fornecendo uma base sistematizada para análises futuras.

3.2.2 Critérios e indicadores de Exposição

Concluída a etapa de avaliação do perigo, o mapa de inundação pode ser integrado à análise de exposição, definida como o mapeamento de elementos potencialmente sujeitos a perdas (DE MOEL et al., 2015). Observa-se, na revisão bibliográfica, que a maioria dos elementos considerados é direta e tangível, sendo ainda incipiente a inclusão de análises relacionadas a perdas culturais ou ambientais, pois, de acordo com De Moel, Van Alphen e Aerts (2009) esses elementos são difíceis de quantificar e quando são considerados, é geralmente de maneira qualitativa.

Identificam-se, em termos gerais, dois tipos principais de critérios de exposição, aqueles que buscam quantificar o número de afetados e os que tentam identificar como as áreas analisadas são utilizadas. Para a quantificação da população afetada, foram usados indicadores de densidade demográfica (CHEN e ALEXANDER, 2022;

MARQUES; DA SILVA; DE CAMARGO, 2017; MATTEDI et al., 2024; MISHRA e SINHA, 2020; OGATO et al., 2020; WANG et al., 2011; ZHANG et al., 2022), média de moradores por domicílio, número de moradores no setor censitário (MARQUES; DA SILVA; DE CAMARGO, 2017), número de residências no setor censitário (MATTEDI et al., 2024) e densidade domiciliar (MISHRA e SINHA, 2020). Além disso, o mapeamento de elementos vulneráveis pode ser realizado por meio de sensoriamento remoto. Alabbad, Yildirim e Demir (2022), por exemplo, utilizam o software Microsoft footprint para o levantamento de áreas construídas e sites governamentais para acesso a informações populacionais.

A caracterização da estrutura produtiva da região analisada constitui um fator relevante na avaliação do risco de inundação, uma vez que essa informação vai contribuir para uma análise mais completa do impacto econômico em uma comunidade. O principal indicador empregado para classificar a função territorial das áreas analisadas é o uso e ocupação do solo (AHMED et al., 2024; CAVALCANTE DE LIMA; FACCIOLI; MEDEIROS, 2024; KITTIPONGVISES et al., 2020; MARQUES; DA SILVA; DE CAMARGO, 2017; MISHRA; SINHA, 2020; OGATO et al., 2020; TEHRANY; PRADHAN; JEBUR, 2013, 2014; ZHANG et al., 2022).

Zhang et al. (2022) e Schoppa et al. (2020) utilizam informações como número de pessoas em serviços na indústria, número de pessoas em trabalho agrícola, número de pessoas em trabalho doméstico, setor do negócio e área de arrozal para identificar setores afetados.

Embora ocorra o predomínio de elementos diretos e tangíveis, é possível incorporar outras informações de exposição de efeitos indiretos, como a exposição de redes de infraestrutura. Mattedi et al. (2024), Mishra e Sinha (2020) e Gudiyangada et al. (2020) utilizaram em seus trabalhos esse indicador. De Moel et al. (2015) destacam ainda a importância de considerar a variabilidade temporal e espacial dos elementos expostos, uma vez que suas características possam mudar conforme o período do ano, condições climáticas ou luminosidade (SAYERS et al., 2013).

No contexto brasileiro, embora não haja uma lista específica de elementos vulneráveis a serem mapeados a Lei nº 12.608/2012, de 10 de abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e normas complementares, como o Plano

Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais e diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, orienta que hospitais, escolas, rodovias, redes elétricas e outras infraestruturas críticas sejam consideradas na avaliação do risco. Entretanto, observa-se uma limitada aplicação desses indicadores nos estudos revisados.

Conclui-se que a análise de exposição, em geral, recorre a indicadores semelhantes entre os estudos, conforme sistematizado no Apêndice B. Ainda assim, há oportunidades de aprimoramento, especialmente pela incorporação dos indicadores recomendados pelas diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil.

3.2.3 Critérios e indicadores de Vulnerabilidade

A intensidade com que diferentes comunidades são afetadas por eventos de inundação varia significativamente. Segundo Suleiman (2021), a vulnerabilidade pode ser agravada por fatores sociais, políticos, econômicos e técnicos, como baixa renda, falta de organização social, infraestrutura inadequada, falta de percepção de risco e ausência de políticas públicas eficazes.

Além disso, a vulnerabilidade é representada por uma ampla variedade de indicadores, o que pode refletir tanto a diversidade de desafios enfrentados em diferentes regiões quanto a dificuldade de consolidá-los devido à ausência de bases de dados que possuam todas as informações necessárias. Ademais, existe ainda divergência quanto à escolha dos indicadores mais adequados para representá-los. (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Entre os indicadores observados na literatura, destaca-se o uso de informações do Produto Interno Bruto (PIB) (CHEN; ALEXANDER, 2022; WANG et al., 2011), geralmente aplicadas em análises de caráter regional. No entanto, sua adequação pode ser limitada dependendo da escala geográfica adotada.

Outros indicadores utilizados podem ser obtidos através do Censo, como renda familiar (MATTEDI et al., 2024), porcentagem de responsáveis com rendimento de até 1 salário mínimo e porcentagem de responsáveis sem rendimento, como visto no trabalho de Marques; Da Silva; De Camargo (2017).

Já, para compreender como diferentes grupos dentro da comunidade são afetados pelos impactos das inundações. Mishra e Sinha (2020), por exemplo, consideram a densidade populacional feminina como um fator que deve ser incluído na análise de vulnerabilidade, visto que mulheres, segundo este trabalho, são consideradas menos preparadas a resposta ao risco, o que pode influenciar nas estratégias de evacuação e recuperação. Esse mesmo indicador foi utilizado por outros autores, como Mattedi et al. (2024), Marques, Da Silva e De Camargo (2017) e Zhang et al. (2022).

A educação também é considerada como um fator relevante na avaliação da resiliência comunitária (MONTE, 2022). Nesse contexto, foram observados, em diversos estudos, o uso de indicadores relacionados à taxa de alfabetização (MARQUES; DA SILVA; DE CAMARGO, 2017; ZHANG et al., 2022; MISHRA; SINHA, 2020).

De acordo com Mishra e Sinha (2020) indicadores que tratam da experiência, ainda são pouco explorados, no entanto, vivenciar inundações é um fator que pode fortalecer a capacidade de resposta da comunidade diante de eventos de cheias. Autores como Kittipongvises et al. (2020) e Lüdtkke et al. (2019) abordaram esse indicador em seus estudos, porém, permanecem questionamentos acerca da extensão em que a experiência pode efetivamente contribuir para aprimorar a resiliência de uma comunidade ao longo do tempo.

As características dos domicílios e das empresas podem contribuir significativamente para a avaliação de danos em eventos de inundação. Entre os indicadores utilizados destacam-se a área construída, mencionada por Lüdtkke et al. (2019), e o porte das empresas, adotado por Schoppa et al. (2020). Além disso, o tipo de construção, também analisado por Lüdtkke et al. (2019), pode indicar o grau de suscetibilidade das edificações aos impactos das inundações.

Podemos citar ainda, indicadores associados a disponibilidade de infraestrutura como o acesso a esgotamento sanitário adequado, a vias pavimentadas e a densidade de infraestrutura urbana como visto no trabalho de Mattedi et al. (2024). Esses indicadores refletem a falta de acesso a serviços básicos e infraestrutura adequada tornando as comunidades mais vulneráveis as inundações.

Além disso, outro tipo de infraestrutura adotada como indicador consiste na presença de intervenções de controle de cheias utilizado por autores como Schoppa et al. (2020), Lüdtke et al. (2019) e Chen e Alexander (2022). Na análise de risco, esses indicadores apresentam efeitos ambíguos: embora intervenções estruturais possam reduzir a ocorrência de inundações, elas também podem aumentar a vulnerabilidade da população ao promover uma falsa sensação de segurança (SAYERS et al., 2013).

Conclui-se, que a seleção de indicadores de vulnerabilidade social deve considerar o contexto local e o nível de bem-estar da população. Além disso, com a evolução das técnicas de mapeamento, recomenda-se a incorporação de variáveis relacionadas à resiliência, capacidade adaptativa e capacidade de suporte, a fim de aprimorar a análise do risco de inundação. A lista com os indicadores de vulnerabilidade, verificados na revisão bibliográfica, encontra-se no apêndice C.

3.3 Escala adequada para a avaliação do risco de inundação

A definição da escala de trabalho, seja temporal ou espacial, é uma etapa essencial na elaboração de uma sistemática de análise de risco. Essa escolha deve considerar os objetivos da avaliação, pois o nível de detalhamento dos resultados está diretamente relacionado à escala adotada. Por exemplo, análises em microescala avaliam individualmente cada elemento exposto, enquanto abordagens em mesoescala trabalham com agregações espaciais para a estimativa de danos.

Além disso, um dano considerado significativo em escala local pode ser relativizado quando analisado em âmbito regional. Da mesma forma, análises de curto prazo podem não capturar todos os custos envolvidos no processo de recuperação e retorno à normalidade. Por esse motivo, é necessário compreender o propósito da análise de risco em termos de formulação de políticas públicas, bem como o nível de detalhamento exigido (Merz et al., 2010).

Contudo, não existe uma definição quantitativa sobre o nível de detalhes necessário para cada tipo de avaliação de risco, mas Sieg et al. (2023) propõem uma análise qualitativa a fim de orientar o nível de detalhe necessário baseadas em três questões orientadoras: (i) quais processos são relevantes no contexto analisado? (ii) quais

dinâmicas temporais devem ser consideradas? e (iii) qual é a resolução espacial e temporal necessária? Embora útil, essa abordagem é subjetiva e não cria um padrão.

Assim, para aplicações que exigem uma definição mais objetiva, De Moel et al. (2015) propuseram uma classificação das escalas espaciais da análise de risco em quatro categorias: supranacional, macro, meso e micro. Cada escala tem as suas próprias especificidades, como a resolução dos dados de entrada, como realizar a estimativa de perigo, como fazer a estimativa de consequência, as incertezas associadas, generalizações na etapa de validação, a aplicação acadêmica e o uso social. O Anexo C apresenta a classificação.

Ao utilizar a classificação de DE MOEL *et al.* (2015), podemos dizer que este estudo será desenvolvido em mesoescala, uma vez que seu objetivo é realizar a análise de risco voltada à priorização de investimentos. No entanto, a área que vamos adotar não possui abrangência estadual como pressuposto pelos autores para análises de mesoescala. Apesar das diferenças em relação à área de abrangência, é possível utilizar as demais características da mesoescala para contextualizar as limitações do presente estudo, como, por exemplo, para essa escala é possível o uso de modelagem hidráulica, mas é permissível utilizar estratégias mais simplificadas como abordagens baseadas em dados topográficos.

No contexto da mesoescala, tanto a vulnerabilidade quanto a exposição são representadas por informações agregadas. Essa abordagem, embora viável, pode introduzir incertezas ao modelo analítico, exigindo cautela na interpretação dos resultados e na formulação das conclusões.

3.4 Mapeamento de risco no mundo

O volume de publicações acadêmicas voltadas à análise de risco de inundações tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos. Segundo Grigg (2023), o estado da arte evidencia uma heterogeneidade metodológica na comunidade científica, com ampla diversidade de abordagens aplicadas em diferentes regiões do mundo.

Diaconu; Costache; Popa (2021) realizaram um trabalho de revisão bibliográfica que analisou 1326 artigos publicados entre 1979 e 2020. A seleção dos artigos buscou refletir o contexto mundial de publicações e apontou o interesse dessas publicações em propor, testar e avaliar novas metodologias.

A diversidade metodológica na análise de risco pode ser explicada pelo maior acesso a tecnologias avançadas e pela crescente disponibilidade de dados confiáveis e em alta resolução. Observa-se uma distinção entre os métodos predominantes em países europeus, em detrimento dos adotados em nações da Ásia, América do Sul e África. Por exemplo, países localizados no continente europeu possuem bancos de dados históricos mais extensos e com bom nível de detalhamento permitindo o uso de simulações hidrodinâmicas, conseqüentemente, há maior interesse em métodos de simulação hidrodinâmica capazes de estimar a profundidade das inundações, sendo modelos como o FLEMO explorados com frequência.

Ao contrário dos países do continente europeu, países como Índia, Indonésia e China enfrentam escassez de dados qualificados e, dessa forma, o mapeamento de risco de inundação explora outros tipos de metodologias. Nesses países, a utilização da análise de decisão multicritério (ADMC) emerge como uma alternativa viável, uma vez que tais técnicas são adequadas para contextos decisórios de natureza multidisciplinar (Milograna, 2009).

Além disso, foi observado o aumento do uso de informações geoespaciais nos estudos (DIACONU; COSTACHE; POPA, 2021). Esse evento pode ser atribuído ao aumento da resolução do sensoriamento remoto, que permitiu a criação de novos bancos de dados com informações de exposição (AERTS, 2020). A democratização

dos modelos digitais de terreno com melhor acurácia foi fundamental para o mapeamento de inundações para as regiões com escassez de dados (GRIGG, 2023).

Nesse contexto, observa-se o uso intenso de técnicas de análise multicritério junto ao sistema de informação geográfica (SIG) para o mapeamento de áreas de risco de inundação em função da flexibilidade na escolha dos critérios, conforme discutido por Dung et al. (2022) e Diaconu; Costache e Popa, (2021). Abdullah, Siraj e Hodgett (2021) complementam que tais técnicas permitem que os objetivos da análise sejam representados por um conjunto de critérios personalizáveis, o que favorece a consideração das especificidades regionais.

Existem inúmeras soluções denominadas ADMC, cuja aplicabilidade depende do tipo de problema, dos objetivos da análise, da quantidade e natureza dos dados disponíveis, do número de critérios considerados, da facilidade de uso da técnica e da consistência dos resultados obtidos. Os métodos de análise de decisão multicritério pode ser de diferentes tipos, como, por exemplo, métodos baseados em Comparação par-a-par, métodos de ponderação direta, métodos baseados em participação de especialistas e métodos híbridos que utilizam mais de uma técnica.

Mishra e Sinha (2020), por exemplo, aplicaram na bacia do rio Kosi, para regiões localizadas na Índia e Nepal, um método que utiliza ferramenta SIG para a extração de dados que formaram os indicadores tanto para a análise de perigo, quanto para a análise de vulnerabilidade socioeconômica. A ferramenta AHP foi utilizada para a atribuição de pesos a cada um dos indicadores escolhidos. Os autores concluíram que a metodologia constitui uma alternativa válida à modelagem hidrodinâmica, especialmente em contextos de escassez de dados.

Kittipongvises et al. (2020) realizaram o mapeamento de áreas de risco de inundação na ilha de Ayutthaya, na Tailândia, empregando as ferramentas AHP e SIG. Ahmed et al. (2024) aplicaram metodologia semelhante no zoneamento da bacia do rio Dhalai, na Índia, enquanto Chen e Alexander (2022) conduziram uma análise de risco no nível de bacia hidrográfica do rio Dadu, na China. Tais estudos demonstram que a integração das técnicas AHP e SIG é eficaz para o mapeamento de risco em contextos com escassez de dados, sendo aplicável em diferentes escalas e útil para subsidiar decisões em planos de gestão de inundações.

No entanto, Hammami et al. (2019) apontam como fragilidades na técnica AHP, a avaliação subjetiva dos critérios. Outro ponto de atenção é que apesar da facilidade do uso de ferramentas SIG, há preocupação, conforme abordado por Diaconu; Costache e Popa (2021) no seu uso sem o devido conhecimento técnico, o que pode levar a resultados incoerentes com as informações de campo.

Outros métodos baseados em julgamento de especialistas, mas que podem oferecer vantagens, são os métodos Delphi e jogo de cartas. Esses são métodos qualitativos e flexíveis que dependem diretamente das opiniões dos especialistas e não exigem cálculos matemáticos rigorosos, apenas atribuição direta de pesos ou priorização baseados na percepção dos especialistas.

Moura (2008) explica o método do jogo de cartas. Nesse processo, o especialista classifica as cartas, que contêm uma solução específica, conforme a sua importância, atribuindo notas de 1 ou mais, conforme a sua importância. Alternativas com níveis semelhantes de dificuldade recebem a mesma nota. É possível ainda fazer o uso de cartas em branco que permite destacar diferenças entre os indicadores com importância variada. Esse método visa garantir que as decisões sobre a escolha de soluções considerem de forma clara cada uma das alternativas.

Apesar dos bons resultados apontados pelas técnicas multicritério, abordagens mais recentes têm buscado o emprego de métodos que utilizam aprendizagem de máquina sendo uma alternativa para o mapeamento de áreas de risco de inundação e para a criação de curvas de danos (AERTS, 2020). No trabalho de Gudiyangada et al. (2020), foi realizado o mapeamento de áreas de risco em uma mesma região utilizando métodos multicritério e métodos de aprendizagem de máquina ou *Machine Learning* (ML). Os resultados para ML apresentaram melhor acurácia em comparação ao uso do método AHP. Segundo os autores, esses resultados ocorrem em função da alta subjetividade inerente aos métodos multicritério. A disponibilidade de bases de dados qualificadas para treino, ainda é um fator limitante para o uso dessas técnicas.

Outros aspectos têm ganhado a atenção dos pesquisadores nos últimos anos, como, por exemplo, o comportamento dinâmico da análise de risco. Aerts (2020) aponta a demanda por modelos que possam simular a relação humano-hidrológico representando o comportamento adaptativo das comunidades na ocorrência de uma

cheia. Os modelos baseados em agentes envolvem uma análise complexa das interações os indivíduos e o ambiente e como essas interações direcionam as decisões. Várias teorias podem ser usadas para descrever e quantificar as regras comportamentais de resposta as cheias, mas ainda há carência em se conseguir dados.

Por fim, apesar da proposição de muitas ferramentas de análise de risco de inundação pela academia, várias não são adotadas por falta de validação com dados reais. Ahmed et al. (2024) conduziram uma validação da metodologia proposta, comparando dados históricos com os resultados gerados pela ferramenta por meio da análise da curva ROC-AUC. Essa validação rigorosa confirma a eficácia e a adequação do método proposto para aplicação em cenários reais de gestão de riscos de inundação. Além disso, destaca-se que a eficiência da curva ROC-AUC como uma alternativa de validação para outras metodologias de análise de risco de inundação.

3.5 Mapeamento de risco no Brasil

No Brasil, os trabalhos de mapeamento do risco, na sua maioria, buscam subsidiar o planejamento de políticas públicas (ARAÚJO JÚNIOR e TAVARES JÚNIOR, 2018; SILVA et al., 2017; MATTEDI et al., 2024). Verifica-se uma grande variedade de métodos empregados, evidenciando a ausência de padronização metodológica, o que dificulta a comparação dos resultados. Por outro lado, essa diversidade reflete as distintas necessidades das análises e a variabilidade na disponibilidade de dados. Entre esses métodos estão a utilização de análise multicritério, geoprocessamento e a modelagem hidrodinâmica.

Os métodos de avaliação do risco de inundação com o uso de métodos de análise multicritério no Brasil, de forma geral, buscam integração de aspectos físicos, socioeconômicos e ambientais. Lima et al. (2021) desenvolveram e aplicaram uma metodologia para o mapeamento de áreas de risco de inundação no município de Curitiba. A análise envolveu a avaliação da vulnerabilidade e do perigo. Os autores realizaram a ponderação dos indicadores escolhidos, dentre eles geologia, declividade, histórico de inundações, além de aspectos socioeconômicos, e então realizaram uma soma ponderada.

Marques, Silva e Camargo (2017) realizaram o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental em áreas suscetíveis à inundação no município de Campinas, interior de São Paulo. Nesse trabalho, o objetivo era obter índice de vulnerabilidade socioambiental através da ponderação entre os índices de vulnerabilidade social e o risco potencial de inundação. O trabalho utilizou o método AHP para comparar 4 parâmetros que influenciam o escoamento direto e 8 indicadores selecionados para compor o índice de vulnerabilidade social. Os resultados obtidos foram validados com os mapas de risco da prefeitura da cidade, apresentando 68% de assertividade entre áreas consideradas de médio e médio-alto risco.

Cavalcante de Lima, Faccioli e Medeiros (2024) propuseram um modelo de risco de inundação para a bacia do rio Jacuípe (AL/PE). Nesse trabalho foram levados em consideração 4 indicadores de perigo. Os resultados foram sobrepostos ao mapa de uso e ocupação da bacia.

Portela et al. (2023b) aplicaram o método AHP para a análise de vulnerabilidade de inundações na Bacia do rio Sirinhaém. Foram selecionados 9 indicadores de suscetibilidade e exposição. Os resultados obtidos foram comparados com os dados do Atlas de Vulnerabilidade a Inundações da ANA e considerados satisfatórios, embora, os autores recomendem a inclusão de indicadores sociais.

De Melo, Almeida e De Almeida (2023) desenvolveram um trabalho de mapeamento de risco de inundação utilizando AHP para 3 áreas com raio de 20 km que estão em um mesmo bioma nas cidades de: União da Vitória–PR, Blumenau–SC e Governador Valadares–MG. Os autores afirmam que todos os indicadores usados para o método influenciaram os resultados obtidos, mas alguns indicadores se destacaram e foram considerados mais relevantes como altitude, proximidade dos canais e áreas urbanas localizadas nas margens dos rios.

Araujo et al. (2019) desenvolveram um trabalho para analisar a suscetibilidade de ocorrência de enxurradas no município de Arroio do Padre–RS. Nesse trabalho o mapa de risco de inundação gerado com o uso de ferramenta SIG e do método AHP foi utilizado para validar as características morfométricas, através do coeficiente de compacidade (KC), Índice de Conformação (IC) e Tempo de Concentração da bacia (TC). O método revelou que o IC tem grande correlação com a tendência de

inundações e os resultados foram confirmados com a comparação com o mapa de risco.

Rezende, Marques e Oliveira (2017) realizaram o mapeamento de risco de inundação para a área urbana de Paracatu em Minas Gerais utilizando AHP. Nesse trabalho foram selecionados 4 indicadores, a saber: tipo de solo, uso do solo, altitude e declividade. O estudo identificou as áreas de risco de inundação, sendo considerado como apto a oferecer subsídios para a tomada de decisão de gestores, profissionais e pesquisadores.

De maneira geral, esses trabalhos compartilham a utilização de métodos multicritério e o uso de ferramenta SIG. No entanto, divergem quanto à escala de análise, escolha de indicadores e abordagem metodológica específica, o que reflete a falta de padronização da avaliação do risco de inundações no Brasil.

A simulação hidrodinâmica é utilizada, na sua maioria, para a modelagem detalhada do comportamento das inundações em pequenas bacias, apesar de ser possível o uso para análises de áreas maiores. No trabalho de Brito e Bastos (2021), observa-se a utilização da modelagem hidrológica, onde o principal objetivo é o mapeamento de manchas de inundação associadas ao conceito de período de retorno (TR).

Silva, Junior e Noronha (2016) mapearam áreas de risco de inundação na zona urbana de Quebrangulo, Alagoas, utilizando dados populacionais do IBGE (2010) e modelagem hidrodinâmica com o *software* IBER. Foram gerados mapas de inundação para períodos de retorno de 5 a 100 anos, destacando que as áreas mais vulneráveis estão próximas ao rio Paraíba, onde há ocupação desordenada. O modelo digital de elevação atendeu a análise, apesar da falta de dados mais precisos. O uso de imagens de alta resolução auxiliou na identificação do uso do solo, mas a validação em campo é recomendada. O trabalho realizou a modelagem hidrodinâmica com e sem barramentos e concluiu que a presença dessas intervenções reduziu significativamente as áreas de risco e o número de pessoas afetadas.

Apesar de ser possível gerar mapas de inundação com maior acurácia com o uso de simulações hidrodinâmicas, existe uma limitação de dados hidrológicos para muitas regiões do Brasil, sendo esse um desafio significativo que limita o seu uso. Outro ponto

importante é a carência em dados históricos suficientes para calibração dos modelos, o que compromete a acurácia dos resultados. Além disso, a modelagem hidrodinâmica não abrange os aspectos socioeconômicos e de vulnerabilidade das populações afetadas, o que exige a integração com outras ferramentas complementares para proporcionar uma visão mais detalhada do risco.

Vários trabalhos citados anteriormente utilizam ferramentas de geoprocessamento em conjunto com outras técnicas para alcançar os objetivos do mapeamento. Isso ocorre, pois, por meio da integração de dados georreferenciados, o geoprocessamento permite uma abordagem mais abrangente na identificação de áreas suscetíveis a inundações, mas o uso único de geoprocessamento já nos permite gerar mapas mais simplificados para análise de risco. Andrade, Danna e Silva (2013) e Guimarães e Penha (2009) utilizaram o geoprocessamento para a realização do mapeamento do risco de inundação. Ambos os trabalhos obtiveram resultados satisfatórios, o primeiro trabalho criou um mapa de perigo que permitiu identificar as áreas com alta probabilidade de inundações, servindo como ferramenta para orientar o planejamento do uso do solo urbano no Plano Diretor Municipal. Contudo o segundo trabalho aponta a necessidade do uso de um MDE confiável para obter sucesso no uso da metodologia proposta.

Carlos et al. (2018) utilizaram o geoprocessamento para mapear variáveis físicas, como altimetria, declividade e proximidade de cursos d'água, por meio de dados do SRTM para avaliar e gerir os riscos de inundação em Boa Vista, Roraima. Esses autores relacionaram dados históricos de inundação para avaliar políticas públicas, considerando essas variáveis e a sua relação com o uso do solo. O estudo reforça a importância de integrar variáveis ambientais e sociais no planejamento urbano para mitigar riscos de inundações recorrentes na Amazônia.

Por sua vez, o uso de dados históricos com SIG, abordado por Souza et al. (2017), permitiram mapear suscetibilidades baseadas em eventos passados. Embora a sua precisão seja limitada, essa abordagem pode ser útil para regiões com escassez de dados atualizados.

Frutuoso, Grigio e Barros (2022) realizam pesquisa sobre inundações em Assú-RN. Os autores utilizaram análise cartográfica, levantamento histórico de inundações e

geoprocessamento, para identificar áreas de risco e os impactos sobre a ocupação urbana.

Furlan e Trentin (2021) realizaram estudo na bacia hidrográfica do Rio Suzana, em Erechim–RS. Os autores utilizam SIG para mapear áreas de risco de inundação a partir de dados coletados sobre os domicílios. Foram coletados dados históricos de inundações em órgãos oficiais e jornais locais, complementados por levantamentos de campo, permitindo a identificação de áreas vulneráveis. A análise considerou variáveis como nível do domicílio com relação à rua, posição na bacia hidrográfica e número de andares, além de critérios socioeconômicos. O cruzamento desses dados resultou na classificação do risco em três níveis (alto, médio e baixo). Os resultados reforçam a importância de um cadastro de domicílios detalhado para subsidiar o gerenciamento ambiental e a prevenção de desastres.

A metodologia adotada por Peričato, Silva e Marcatto (2016) envolveu a utilização de diversas ferramentas e fontes de dados para a análise de inundações e o mapeamento do risco na cidade de Itajaí–SC. Inicialmente, foram coletados dados de mapeamento e identificação das inundações, fornecidos pela Defesa Civil do estado de Santa Catarina. A partir desses dados, foram elaborados produtos cartográficos, incluindo mapas de localização e hipsométricos, utilizando bases digitais do IBGE e informações adicionais de aerolevanteamento a *laser*. Imagens de satélite *Landsat*, obtidas através do catálogo do INPE, foram empregadas para mapear o crescimento urbano da cidade nos anos de 1985, 2000 e 2015. Para a construção do mapa de inundação, os pontos coletados pela Defesa Civil foram processados e as áreas inundadas foram classificadas conforme a altura da lâmina d'água. Por fim, o mapa de risco foi combinado com a ameaça e com a vulnerabilidade para determinar a intensidade do risco, que foi categorizado em três níveis: alto, médio e baixo. Esse processo permitiu uma análise abrangente das áreas mais vulneráveis a inundações, considerando tanto os aspectos físicos quanto os sociais do município.

A escolha do método mais adequado depende dos objetivos específicos de cada estudo. Ciqueira et al. (2024) realizaram um levantamento de métodos utilizados para análises de risco, destacando as suas vantagens e limitações. Nesse trabalho, foi observado que a análise multicritério combinada com SIG pode ser aplicada para

diferentes escalas e permite realizar uma análise considerando grande número de variáveis, no entanto, a sua acurácia é moderada e a atribuição de pesos aos critérios são subjetiva. Já métodos baseados em dados históricos de inundações, obtidos por meio de levantamento local de marcas de cheia e registros de jornais, e geoprocessamento são úteis em áreas com escassez de dados, embora, também, tenham baixa acurácia. As simulações hidrodinâmicas oferecem alta precisão e detalhamento, mas requer muitos dados e não permite análises de vulnerabilidade.

Quanto a escolha da escala, observa-se uma diversidade entre as escalas adotadas nos trabalhos brasileiros, os estudos mencionam tanto análises em nível municipal, como os de Araujo et al. (2019) e Furlan e Trentin (2021) quanto em bacias hidrográficas inteiras, como o de De Lima, Faccioli e Medeiros (2024). No entanto, de acordo com Silva, Junior e Noronha (2016) é necessário desenvolver estudos regionalizados, abrangendo toda a bacia hidrográfica, visto que as ações preventivas e corretivas devem ser aplicadas sistemicamente e não devem ser restringidas por limites territoriais. Contudo, conforme citado na seção 3.3, a escala de análise pode afetar a precisão dos resultados, já que os indicadores de risco podem variar consideravelmente conforme a área de estudo.

A inclusão de critérios socioeconômicos que auxiliem na correta avaliação da vulnerabilidade ainda é uma lacuna no contexto brasileiro (PORTELA *et al.*, 2023), mas observa-se uma preocupação crescente quanto a avaliação da capacidade das comunidades de resistir e se recuperar de desastres. Dessa forma, foram desenvolvidos índices para o diagnóstico de vulnerabilidade.

No Brasil, existe o Índice de Vulnerabilidade Social – IVS que foi desenvolvido pelo IPEA. Ele é obtido a partir da média aritmética de três subíndices: Infraestrutura Urbana, Capital Humano e Renda e Trabalho, todos com o mesmo peso. Esses subíndices são construídos com indicadores extraídos de pesquisas do IBGE, como os Censos Demográficos e a PNAD, ou estimados por meio de registros administrativos. Cada indicador é normalizado em uma escala de 0 a 1, onde 0 representa a ausência de vulnerabilidade e 1 a pior condição possível. O IVS é classificado em cinco níveis qualitativos, de muito baixa ($\leq 0,200$) a muito alta vulnerabilidade ($> 0,500$), permitindo uma análise detalhada das desigualdades

socioeconômicas (IPEA, 2015). Apesar de existir a possibilidade de visualizar as informações por município e Unidades de Desenvolvimento Humano (UDHs), estão disponíveis apenas para algumas cidades e a base de dados é do Censo de 2010.

Além disso, o IVS é composto por inúmeras variáveis, conforme anexo 2, oriundas da correlação de diferentes informações como, por exemplo, o capital humano a obtenção do indicador percentual de pessoas em domicílios vulneráveis à pobreza e dependentes de idosos não é obtido diretamente das tabelas do Censo, é necessário realizar algumas operações entre informações de diferentes tabelas. Dessa forma, o IVS demonstrou-se complexo para a sua reprodução.

O IBGE e Cemaden também desenvolveram uma metodologia de análise de vulnerabilidade denominada Base Territorial Estatística de Risco (BATER), baseada na interseção entre áreas de risco e feições censitárias, ele padroniza a identificação de grupos populacionais expostos a deslizamentos, inundações e outros eventos extremos. Utilizando dados do Censo demográfico, essa abordagem permite uma análise detalhada por meio da unidade censitária denominada "face de quadra", proporcionando um nível de desagregação mais próximo à realidade territorial das áreas vulneráveis. Essa metodologia foi criada para o monitoramento, auxiliando na emissão de alerta e no planejamento de políticas públicas voltadas à redução do risco de desastres. Além disso, esse indicador deve ser atualizado nos censos futuros, permitindo um acompanhamento temporal da evolução da vulnerabilidade. No entanto, hoje o método é aplicado para apenas 872 municípios monitorados pelo Cemaden, inviabilizando, dessa forma, o seu uso de forma generalizada (IBGE e CEMADEN, 2018).

Outros autores propuseram índices mais simplificados, como Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012) que propuseram uma metodologia para o mapeamento de risco de inundações no município de Rio Negrinho, Santa Catarina, integrando a análise de vulnerabilidade, medida por um Índice baseado em aspectos socioeconômicos e o perigo, determinado pela legislação municipal que define a cota máxima de inundação. No entanto, os resultados obtidos mostraram que o risco de inundação tem maior correlação com o perigo do que com a vulnerabilidade, indicando que setores com alta vulnerabilidade podem apresentar baixo risco caso não estejam em

áreas de inundação e vice-versa. Uma consideração relevante desse trabalho é que assume que a vulnerabilidade é inversamente proporcional à capacidade de suporte, resposta ou preparo do município, dado informado pelo IDHM. Assim, através da soma dos indicadores de densidade demográfica, número de moradores no setor, média de moradores por residência, taxa de dependentes, educação, renda, dividido pelo IDHM é obtido o IV (índice de vulnerabilidade).

Monte (2022), também, desenvolveu um índice de vulnerabilidade baseado na composição de quatro categorias de indicadores: exposição, suscetibilidade, falta de resiliência e falta de capacidade adaptativa. Diferentemente de abordagens anteriores, o autor incluiu variáveis como leitos hospitalares por 10.000 habitantes, falta de acesso ao saneamento e percentual de pessoas na linha da pobreza para representar a suscetibilidade. Já a falta de resiliência foi avaliada por fatores como rede de comunicação, taxa de analfabetismo, ausência de instituições de gestão de riscos de desastres, limitações em rotas de evacuação e abrigos, falta de moradia própria e população dependente de assistência social. A falta de capacidade adaptativa foi medida por indicadores como percentual da população sem ensino superior, envolvimento da sociedade, políticas ambientais e existência de sistemas de alerta.

O Atlas de Vulnerabilidade a Inundações classifica os trechos de rios segundo a recorrência dos eventos de inundação e do grau de impacto associado a eles (ANA, 2014). Para classificar a recorrência de inundações graduais, foram estabelecidos 3 intervalos específicos: alto, cuja ocorrência observada é inferior a 5 anos, médios, em que os eventos foram observados entre 5 e 10 anos, e baixo, onde a mais de 10 anos não são observados eventos de inundações. Após definir a frequência dos eventos, avaliou-se o impacto associado a cada ocorrência que também foram categorizados em 3 classes: alto, médio e baixo. Em seguida, os dados de frequência e impacto foram integrados para elaborar a matriz de vulnerabilidade a inundações, que resulta em uma classificação entre alto, médio e baixo conforme o Quadro 1.

Quadro 1- Classificação adotada pelo Atlas de vulnerabilidade de inundações

Classificação	Características associadas
Alta	Alto risco de dano à vida humana e danos significativos a serviços essenciais, instalações e obras de infraestrutura públicas e residências
Média	Danos razoáveis a serviços essenciais, instalações e obras de infraestruturas públicas e residenciais
Baixa	Danos Localizados

Fonte- Adaptado de - ANA (2014)

Apesar da denominação do Atlas, que diverge da nomenclatura adotada nesse trabalho, ele trata de aspectos relativos ao perigo e vulnerabilidade social, utilizando informações históricas da ocorrência de inundações e de danos, ambos declarados pelo estado, em regiões onde não há registros é adotado o valor baixo, sendo essa uma fragilidade do método, uma vez que carece de dados históricos e da memória de cada trecho do rio.

A diversidade de métodos e técnicas apresentadas oferece um panorama das estratégias para contornar a escassez de dados, destacando a necessidade de se criar abordagens adaptadas às especificidades de cada região. No entanto, a falta de padronização metodológica e de fontes de dados dificulta a comparação entre estudos. Para uma análise de risco mais eficiente, seria fundamental adotar padrões metodológicos mais consistentes, integrando tanto os aspectos físicos quanto os sociais. Em resumo, os trabalhos sobre mapeamento de risco de inundações no Brasil têm avançado na incorporação de aspectos socioeconômicos, mas ainda há lacunas relacionadas à padronização das metodologias e à utilização de dados atualizados que reflitam a realidade das populações mais vulneráveis.

4 ESCOLHA DOS CRITÉRIOS E INDICADORES

4.1 Fundamentos para escolha de critérios e indicadores para análise de risco

A seção 3.2 apresentou uma grande diversidade de critérios e indicadores identificados na revisão bibliográfica. Para as etapas subsequentes do estudo, foi necessário definir um conjunto de critérios e indicadores que representasse adequadamente cada uma das dimensões do risco.

De acordo com Monte (2022), os indicadores devem apresentar propriedades essenciais para garantir um bom desempenho. Eles devem representar adequadamente o fenômeno que se deseja medir, permitir a mensuração do objeto de interesse, ser reproduzíveis, possibilitar a organização em grupos específicos conforme o interesse do pesquisador, permitir comparações ao longo do tempo e possibilitar seu recálculo periódico.

Para a escolha dos critérios e indicadores, procurou-se uma metodologia que garantisse coerência e robustez ao conjunto selecionado. Abdullah, Siraj e Hodgett (2021) apontaram como alternativas a aplicação de modelos de análise, como SWOT (forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) e PESTEL (político, econômico, social, tecnológico, ambiental e legal). Outra possibilidade, consiste na utilização de métodos baseados em consulta a especialistas.

A disponibilidade de dados é um aspecto relevante no contexto brasileiro em que a escassez ou a dificuldade de acesso a determinadas bases de dados pode limitar a seleção de indicadores e exigir adaptações metodológicas. Nesse sentido, realizou-se um levantamento das principais fontes de dados utilizadas em estudos sobre mapeamento de risco de inundação no Brasil, cujo resultado pode ser consultado no Apêndice D.

Além disso, dada a grande quantidade de indicadores disponíveis, é fundamental limitar o número de critérios selecionados. De acordo com Dung et al. (2022b) existe limitação do número de elementos que um especialista é capaz de comparar simultaneamente.

Com base nas orientações de Pereira et al. (2016) e Abdullah, Siraj e Hodgett (2021), foram estabelecidos requisitos para a seleção dos critérios, incluindo: ampla validação na literatura, adequação às especificidades das bacias hidrográficas brasileiras, disponibilidade de dados e capacidade de representar as dimensões do risco (exposição, perigo e vulnerabilidade). A consideração desses aspectos permitiu que fosse definido o conjunto final, após avaliar a adequabilidade de cada critério e indicador extraído da literatura para os objetivos deste estudo.

4.2 Escolha dos critérios

A escolha dos critérios baseou-se nas premissas definidas na Seção 4.1. Para garantir que todas as dimensões do risco fossem contempladas, os critérios relativos a perigo, exposição e vulnerabilidade foram selecionados separadamente. A adequação às especificidades das bacias hidrográficas brasileiras foi assegurada pelo conhecimento técnico da autora e de suas orientadoras. Por fim, a relevância dos critérios foi validada por meio de uma extensiva revisão bibliográfica, considerando tanto o conjunto de indicadores já consolidados quanto as orientações de outros autores.

Dessa forma, para a dimensão de perigo os critérios encontrados na bibliografia consultada, seção 3.2.1, foram: tipo de solo, topografia, geomorfologia, cobertura do solo, precipitação, hidráulico/hidrológico suscetibilidade e medidas de contenção. Dentre eles observou-se o uso recorrente na literatura dos critérios de precipitação, junto aos critérios topográficos e hidrológicos, considerados fundamentais para identificar áreas propensas a inundações.

Além disso, a identificação da permeabilidade da superfície e da capacidade de infiltração do solo foi incluído por serem relevantes e influenciarem a formação das cheias de acordo com Tucci (2005). Por fim as medidas de contenção, como barragens, também foram selecionadas, uma vez que, influenciam o comportamento das inundações, alterando o escoamento superficial e os picos de cheias conforme Dung et al. (2022b).

Dessa forma, os critérios que demonstraram ser promissores para a análise de perigo foram: tipo de solo, topografia, cobertura do solo, precipitação, hidrológico/hidráulica e infraestrutura existente. Apenas geomorfologia e suscetibilidade foram descartados,

pois apesar de De Moel, Van Alphen e Aerts (2009) apontarem a necessidade de critérios geomorfológicos, foi concluído que a análise necessita de acompanhamento de longo prazo, o que não é compatível com o escopo desse trabalho.

Para a análise de exposição, não foi observada grande diversidade de critérios na revisão bibliográfica. Os dois tipos de critérios explorados pela literatura, como apontado na seção 3.2.2, são relacionados à população e ao uso e ocupação do solo. Ambos são adotados em toda literatura analisada e, dessa forma, serão mantidos. Além disso, o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais e diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, aponta a necessidade de mapear as infraestruturas críticas, o que foi considerado relevante para o contexto brasileiro e dessa maneira foi agregado o critério, infraestrutura.

A dimensão da vulnerabilidade, por sua vez, apresentou uma ampla variedade de critérios na literatura (Seção 3.2.3). Dentre os mais frequentes, destacam-se os de natureza econômica e educacional, que representam a capacidade de resiliência das comunidades (Monte, 2022). De forma complementar, a composição etária e as características dos domicílios são indicadores importantes para identificar áreas de maior vulnerabilidade, sobretudo em contextos de precariedade no acesso ao saneamento básico (Mattedi et al., 2024). Com base nessas evidências, foram selecionados os seguintes indicadores: nível de escolaridade, composição etária, necessidades específicas, características de domicílios e empresas, condição econômica e acesso a serviços de saneamento. Para fins de modelagem, estes indicadores foram agrupados e tratados como um único critério, denominado 'socioeconômico'.

4.3 Escolha dos indicadores

Com base nos critérios estabelecidos na seção 4.2, e nas diretrizes metodológicas discutidas na seção 4.1 (ampla validação na literatura, adequação às especificidades das bacias hidrográficas brasileiras, facilidade de acesso aos dados e capacidade de representar as diferentes dimensões do risco), procedeu-se à seleção dos indicadores utilizados nesta análise.

A escolha dos indicadores de precipitação levou em consideração que a magnitude da inundação está relacionada à intensidade e duração das chuvas (CHEN; ALEXANDER, 2022). Dessa forma, foram utilizados os indicadores R20 e a Intensidade de Precipitação, proposta como novo indicador.

O R20 foi selecionado, para identificar regiões com maior histórico chuvas intensas dado que quanto maior esse indicador, mais propensa é a região às inundações. O valor é medido através do número de dias por ano com precipitação superior ou igual a 20mm. Essa informação deve ser extraída de uma base histórica, de no mínimo 15 anos. Para esse indicador foi utilizada a base de dados da ANA. Contudo o indicador foi renomeado como máxima precipitação média do mês chuvoso (PPMAX,MED), por se tratar de uma nomenclatura mais generalista.

Para a Intensidade de Precipitação foi considerada a IDF do SGB de 2018 cuja duração seja igual ao tempo de concentração da bacia e o período de retorno de 50 anos (TR50), expresso em mm/h. Esse indicador permite avaliar o risco de inundação ao considerar eventos extremos de chuva que maximizam o escoamento superficial na bacia. Para as cidades que não possuem a relação IDF definida, recomenda-se adotar IDF da localidade mais próxima

Para o critério hidráulico/hidrológico, foi inicialmente selecionada a distância do rio, pois é um indicador bastante explorado na literatura. As faixas de distância em torno do rio podem ser interpretadas como zonas de risco progressivo, onde a proximidade com o rio indica potencial perigo de inundações. No entanto, apesar da possibilidade de utilizar esse indicador, foi destacado por especialistas durante as entrevistas, seção 5.3, com a sugestão da possibilidade de substituí-lo por um indicador mais eficiente, denominado Hand. Esse indicador é citado por GOERL et al. (2017) e consiste em um indicador que é derivado do MDE, cujo objetivo é apresentar a altura de cada ponto em relação ao canal de drenagem mais próximo. Por esse motivo, após alguns testes, foi realizada a troca da distância do rio pelo Hand.

Para o critério topográfico foram selecionados dois indicadores: o índice topográfico de umidade (ITU) e o fluxo acumulado, ambos os indicadores, derivados do processamento do MDE em ambiente SIG. ITU é uma medida relativa à disponibilidade em longo prazo de umidade do solo de um determinado local na

paisagem, definido pela Equação (3). Esse indicador é amplamente adotado e, segundo Pons et al. (2024), apresenta alto grau de correlação com a formação de cheias.

$$ITU = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right) \quad (3)$$

Em que,

α = área de contribuição da bacia, este valor será o número de células em um ponto alto que fluem para uma célula em um ponto mais baixo
 β = declividade

Já o fluxo acumulado consiste na soma da água que desce a encosta nas células do raster de saída (AHMED et al., 2024). Esse indicador foi selecionado por sua capacidade de identificar áreas com maior potencial de acúmulo de volume de água durante eventos de chuva intensa, o que está diretamente associado ao risco de inundação.

Com relação ao tipo de solo, foi adotado o indicador grupo hidrológico, semelhante ao utilizado por Lima et al. (2021). Esse indicador foi escolhido por refletir a capacidade do solo de gerar escoamento superficial durante eventos de chuva. A caracterização do tipo de solo empregada nesta análise foi obtida a partir do Mapa Pedológico do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), na escala 1:250.000. Esse mapa possibilitou a identificação das diferentes classes de solo presentes no território nacional. No entanto, essa informação, isoladamente, não foi suficiente para a análise proposta. Assim, para a construção do indicador, adotou-se a classificação de grupos hidrológicos proposta por Sartori, Neto e Genovez (2005), que consiste em uma adaptação do modelo desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos da América à realidade brasileira. A classificação utilizada, apresentada no Anexo A, agrupa os solos em quatro categorias, conforme sua capacidade de infiltração e escoamento superficial. Além disso, inclui duas categorias adicionais: áreas urbanas e corpos d'água, conforme mapeados no Mapa Pedológico Brasileiro.

Para o critério cobertura do solo o indicador é a própria cobertura do solo utilizado por Fernández e Lutz (2010b). Ele foi selecionado, pois afeta a formação do escoamento superficial e conseqüentemente a geração de inundações. Os dados para o indicador foram obtidos através do mapa de uso e ocupação do solo desenvolvido pelo MapBiomias (2023).

Com relação ao critério infraestrutura existente, o único indicador apresentado no levantamento bibliográfico foi o projeto de controle de cheias adotado por Wang et al. (2011). Apesar de poucos trabalhos utilizarem esse indicador, obras de contenção de cheias são itens relevantes e atenuantes à inundação e por isso são utilizadas nesse trabalho. Dessa forma, o indicador deve identificar se existem obras que garantem a proteção de uma região, atenuando, dessa forma, a dimensão do perigo. A proteção pode ser informada através do período de retorno atendido pela obra.

Para identificar como esse indicador pode ser formado, foi realizada uma análise exploratória em alguns bancos de dados potenciais. Para a identificação de estruturas de controle de cheias, foi inicialmente analisado o banco de dados do IGAM onde estão cadastradas todas as outorgas e consideradas apenas aquelas para exploração superficial, classificação que possui a construção de barragens e diques. No entanto, ao analisar os dados, não foi possível identificar qual a finalidade de cada uma dessas obras das outorgas, inviabilizando o uso desse banco de dados, ou seja, dados de outorgas não são adequados para a análise de estruturas de controle de enchentes.

Para sanar essa demanda buscaram-se os dados do SNIS que possui um inventário específico de drenagem e manejo das Águas Pluviais Urbanas, mas não há informações do período de retorno que cada uma dessas estruturas é capaz de atender. Dessa forma, essa informação deve ser combinada com os relatórios que apresentam os registros de danos e prejuízos, reconhecimento federal de emergência, ações de resposta e obras de reconstrução realizadas pela SEDEC (2024). No entanto, nesse banco de dados também não há registro do período de retorno do evento em questão, ademais as informações estão registradas à nível de cidade e como elementos como bacias de contenção ou retenção e diques possuem uma ação local, a informação não possui discretização suficiente para proceder com outras análises complementares.

Dessa forma, o uso desse indicador foi reformulado, pois não há informações suficientes para todos os tipos de infraestruturas de controle de cheias. O único tipo de estrutura que será utilizado para essa análise será reservatórios de grande porte despachados pelo ONS que possuem capacidade de amortecimento de cheias. Essa informação pode ser obtida no Manual de Procedimentos da Operação Módulo 5 - Submódulo 5.12 (ONS, 2025), que é atualizado anualmente para cada bacia federal e fornece a informação de período de retorno associado à proteção oferecida pelo reservatório.

Em resumo, os indicadores selecionados para representar o perigo de inundações abrangem o número de dias com total precipitado acima de 20mm, a intensidade de precipitação, a distância do rio, o índice topográfico de umidade, o fluxo acumulado, o grupo hidrológico, a cobertura do solo e as estruturas de controle de cheias.

De forma geral, os indicadores selecionados para o mapeamento da exposição foram selecionados para identificar os elementos mais críticos, que demandam maior proteção contra enchentes, dentre eles densidade demográfica, presença de escolas e hospitais ou aqueles que estão associados a elevados prejuízos socioeconômicos, como o uso e ocupação do solo, infraestrutura rodoviária e macrodrenagem.

Para o critério uso e ocupação do solo, o indicador é o próprio uso e ocupação do solo que identifica o tipo de atividade realizada na área. Essa informação também foi obtida através do MapBiomas.

Já para o critério elementos vulneráveis, foram adotados 3 indicadores. O primeiro trata da densidade demográfica, usada por Marques, Da Silva e Camargo (2017), que utilizam informações do número de moradores no setor censitário, menor discretização espacial de dados disponível publicamente pelo IBGE, pela área do setor censitário. Os outros indicadores não foram usados nos trabalhos analisados, mas conforme a orientação apresentada em normas complementares à Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, foram adotados indicadores que representem a presença de hospitais e escolas. Esses dados foram buscados nos bancos do Progeo e INEP.

Em complemento, o critério infraestrutura possui os indicadores infraestrutura rodoviária e macrodrenagem. Para macrodrenagem foi considerado o somatório do comprimento total dos cursos d'água naturais perenes, total dos cursos de água natural perene canalizados abertos e total dos cursos de água natural perenes canalizados fechados divididos pela área urbana total, incluindo áreas urbanas isoladas, disponibilizados pelo SNIS. Lembrando que as informações são municipais, autodeclaradas, e relacionadas a áreas urbanas e em função dessas características, as análises associadas a esse indicador podem distorcer os resultados uma vez que há heterogeneidade na implantação dessas obras ao longo do território municipal sendo diferentes entre as áreas urbanas e rurais, por exemplo.

Para avaliar o nível de exposição associado à infraestrutura rodoviária, foi considerada a quantidade linear de estradas, mas a distância transversal ao eixo das rodovias federais e estaduais. Para isso, foram geradas quatro faixas consecutivas, cada uma com 30 metros de largura, ao longo do contorno das rodovias. Quanto mais próxima à área estiver da rodovia, maior será o nível de exposição. Para a geração dessa informação foram utilizados os mapas do MapBiomias.

Em resumo, os indicadores de exposição selecionados foram o uso e ocupação do solo, densidade demográfica, presença de hospitais e escolas, distância da infraestrutura rodoviária e densidade de macrodrenagem, com dados obtidos do MapBiomias, IBGE, Progeo, INEP e SNIS.

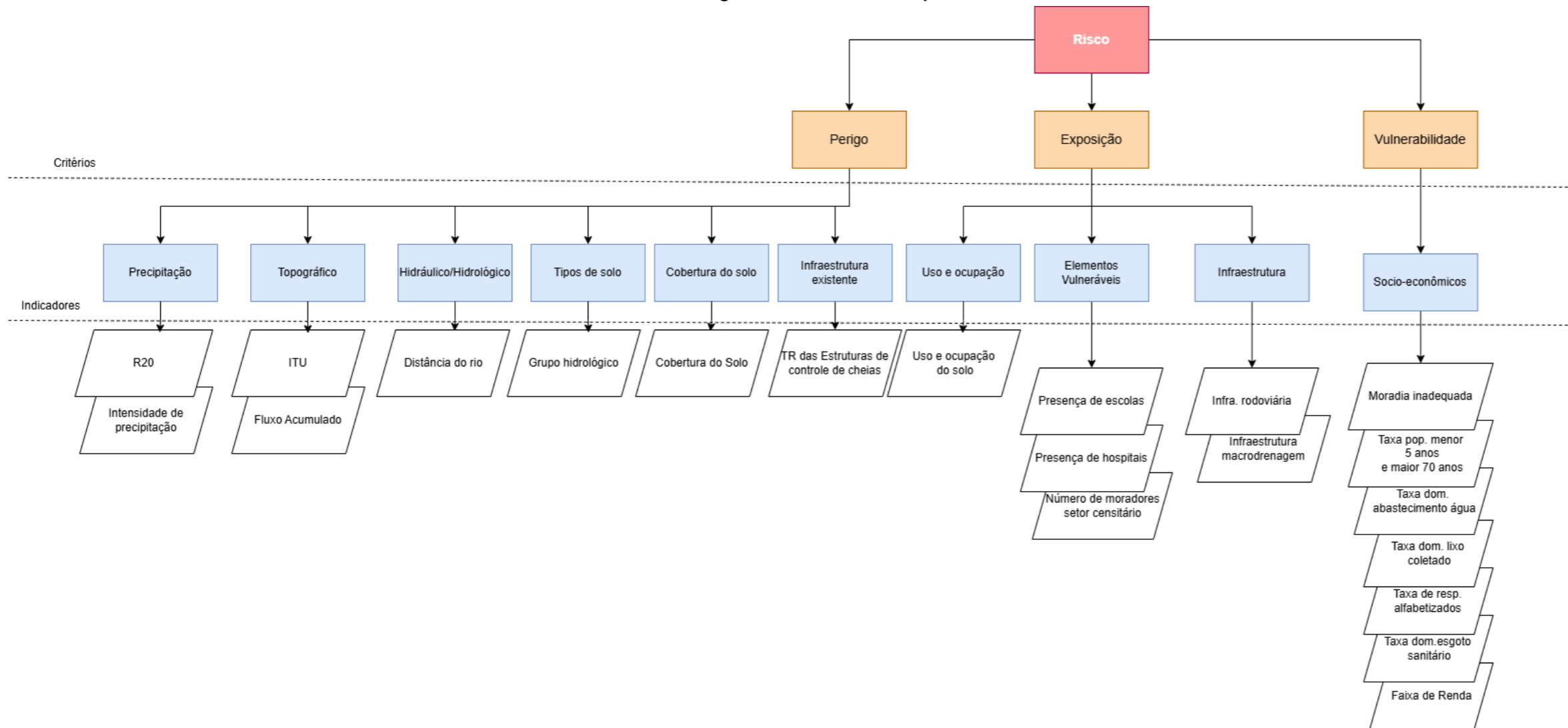
Para a construção do indicador de vulnerabilidade, foram selecionadas variáveis relacionadas aos critérios identificados na seção 4.2. Um requisito essencial foi a disponibilidade dessas informações no Censo por setor censitário. Dessa forma, a partir das informações obtidas no Censo 2010, foram criados os indicadores específicos desejados para atender aos critérios. O apêndice E possui a relação de tabelas consultadas no IBGE para a construção dos indicadores.

A distribuição etária foi calculada somando a população menor de 5 anos e maior de 70 anos, a taxa foi obtida em relação à população total. O acesso a serviços foi medido pela razão entre domicílios com acesso à água, esgoto e coleta de lixo e o total de domicílios no setor. Para a alfabetização, considerou-se a proporção de responsáveis alfabetizados por domicílio em relação ao número total de domicílios particulares.

Esses indicadores foram selecionados, pois a combinação dessas variáveis permitiu uma avaliação abrangente da vulnerabilidade da população, refletindo as condições socioeconômicas e a capacidade de resposta a inundações.

Cada indicador selecionado desempenha um papel fundamental na determinação do risco, permitindo uma análise integrada dos fatores que contribuem para a exposição, perigo e vulnerabilidade. A Figura 3 apresenta a estrutura hierárquica dos indicadores. O capítulo 5, apresenta a metodologia usada para a ponderação e os resultados obtidos para os indicadores de perigo, vulnerabilidade e exposição.

Figura 3- Estrutura hierárquica dos indicadores do risco



Fonte- Autor (2025)

5 PONDERAÇÃO DAS DIMENSÕES DO RISCO E DOS INDICADORES

Para a análise do risco, é necessário considerar que as dimensões de perigo, exposição e vulnerabilidade, assim como seus respectivos indicadores, podem exercer influências distintas sobre o impacto resultante. No entanto, o grau de influência de cada dimensão ou indicador na definição do risco ainda não está claramente estabelecido, o que torna necessária a atribuição de pesos que reflitam sua importância relativa. Assim, a ponderação dos critérios e indicadores foi realizada por meio de duas metodologias: a ponderação equitativa, aplicada aos indicadores de vulnerabilidade, e a consulta a especialistas, utilizada para os demais.

Para os indicadores de vulnerabilidade, adotou-se a distribuição igualitária de pesos, considerando a complexidade envolvida na análise de variáveis socioeconômicas, que demanda a expertise de profissionais das ciências humanas. Assim, todas as variáveis foram consideradas igualmente relevantes na composição do indicador, dada a ausência de critérios objetivos para hierarquização de sua importância. Para os demais indicadores, foi utilizada a técnica do jogo de cartas durante entrevistas com especialistas, com o objetivo de auxiliar na extração e estruturação de seu conhecimento tácito, como descrito na seção 5.1.

5.1 Metodologia para ponderação dos critérios e indicadores por especialistas

A consulta a especialistas foi realizada por meio de entrevistas individuais online. A estrutura da entrevista foi composta por três fases. A primeira envolveu o nivelamento conceitual e a apresentação dos indicadores. A segunda correspondeu à etapa de ponderação dos indicadores por meio do jogo de cartas, conforme a metodologia proposta por Moura (2008). Por fim, a terceira fase foi dedicada à coleta da opinião dos especialistas sobre a metodologia empregada, bem como à identificação de eventuais indicadores ausentes.

Os convidados a participar consistiam em um grupo de especialistas com experiência na área de estudo. A lista, inicialmente composta por aproximadamente 20 nomes, foi expandida por meio de indicações feitas pelos próprios participantes ao longo das entrevistas, os quais sugeriram outros profissionais com experiência relevante. As novas indicações foram consideradas desde que atendessem aos critérios de

experiência profissional e afinidade com o escopo do estudo. Além disso, buscou-se garantir a diversidade dos especialistas, incluindo representantes dos setores público e privado, bem como de todas as regiões do país.

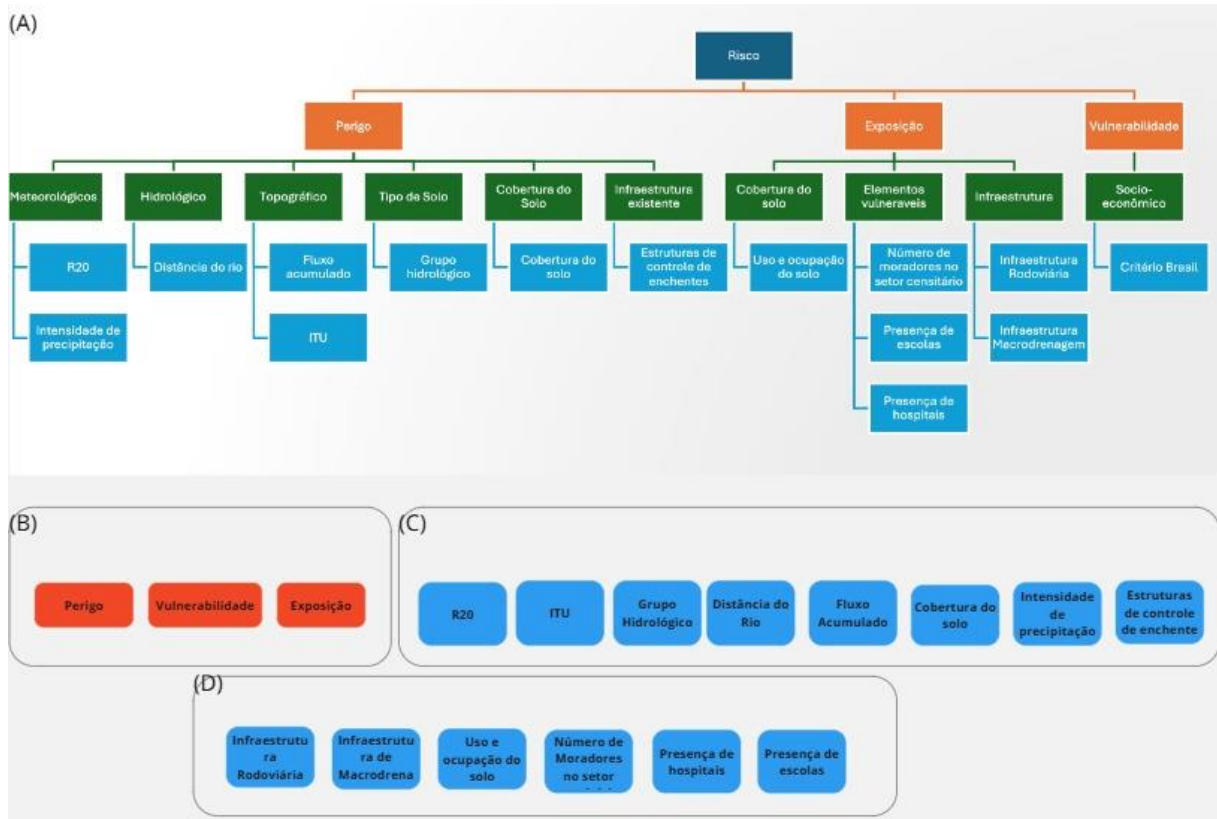
Os convites foram enviados por e-mail, com a descrição do objetivo da pesquisa e da metodologia adotada. Após a confirmação da participação, foram agendadas reuniões por meio das plataformas Microsoft Teams ou Google Meet, conforme a disponibilidade de cada especialista. Ao todo, foram convidados 45 profissionais, dos quais 25 participaram durante os quatro meses dedicados às entrevistas, que foram realizadas entre novembro de 2024 e fevereiro de 2025.

No início de cada entrevista, foi realizada uma apresentação por meio de slides, disponíveis no Apêndice F, com o objetivo de alinhar os principais conceitos utilizados no estudo. Também foram apresentados os indicadores selecionados, a justificativa para o uso e as métricas propostas para sua mensuração. Essa etapa teve como propósito assegurar que todos os especialistas compartilhassem um entendimento comum antes do processo de ponderação.

A etapa de ponderação foi conduzida por meio de uma adaptação do jogo de cartas, realizada em um ambiente interativo na plataforma online e gratuita Miro. O objetivo era permitir que os especialistas classificassem os indicadores e atribuíssem a importância relativa a eles de forma qualitativa.

No ambiente virtual, cada especialista teve acesso a três grupos de cartas: dimensões do risco, indicadores de perigo e indicadores de exposição. A Figura 4 ilustra a interface inicial do ambiente virtual no qual a dinâmica foi conduzida.

Figura 4- Visão inicial da tela da dinâmica. A) Esquema hierárquico dos indicadores, critérios e dimensões do risco. B) Grupo 1 - dimensões do risco C) Grupo 2 - Indicadores de Perigo D) Grupo 3 - Indicadores de Exposição



Fonte – Autor (2025)

Para o jogo de cartas o especialista organizava as cartas pela ordem de importância, onde a carta no topo representava o indicador de maior importância, enquanto a base representava o de menor relevância. Também era possível posicionar cartas lado a lado, indicando importâncias equivalentes. A ponderação era definida pela quantidade de cartas empilhadas. Nesse modelo, a carta na base correspondia ao peso 1, enquanto cartas empilhadas recebiam um peso proporcional ao número de cartas acumuladas.

Ao final da entrevista, eram feitas duas perguntas aos especialistas. Se algum indicador essencial estava ausente e se havia sugestões ou considerações adicionais. Após a entrevista cada entrevistado recebia um formulário que solicitava informações sobre área de atuação, tempo de experiência, instituição vinculada e experiência com gerenciamento de inundações.

Após as entrevistas, para determinar os pesos atribuídos às dimensões do risco (perigo, exposição e vulnerabilidade) e os indicadores de perigo e exposição, foi realizada uma análise estatística das respostas fornecidas pelos especialistas. Foram construídos gráficos boxplot para visualizar a distribuição dos pesos e identificar a tendência central das respostas. A mediana foi adotada como referência para a definição dos pesos, por ser menos sensível a valores extremos.

5.2 Perfil dos Especialistas

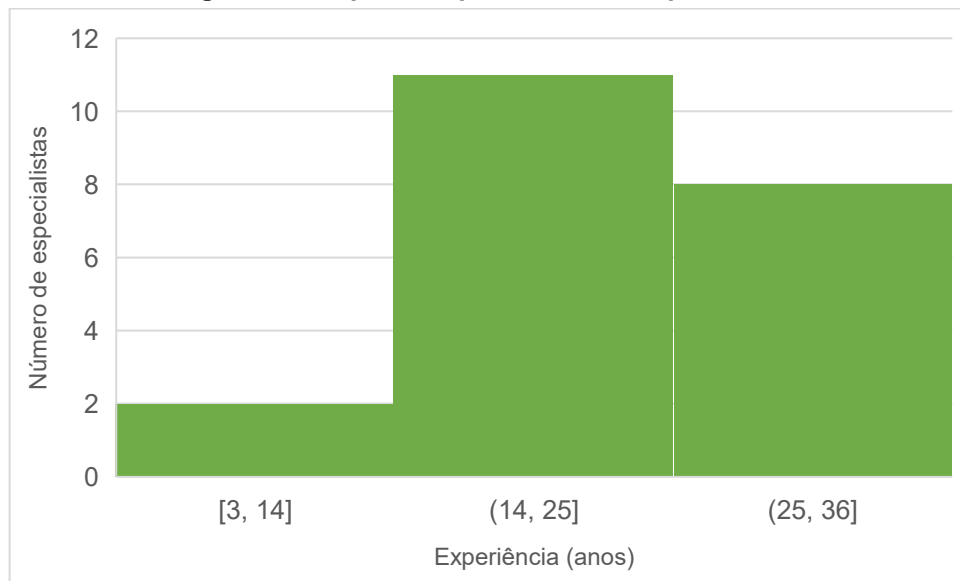
Foram conduzidas 25 entrevistas com especialistas de todas as regiões do Brasil, conforme apresentado no Quadro 2. Dentre os entrevistados, 22 responderam ao questionário, o que permitiu a construção do perfil dos profissionais que colaboraram com essa pesquisa. Os especialistas entrevistados atuam em diversas instituições, como órgãos governamentais, universidades, empresas do setor elétrico, consultorias e órgãos de defesa civil, o que garante uma abordagem multidisciplinar sobre o tema.

Quadro 2 - Estado onde estão alocados os especialistas e a sua área de atuação

Estado	Área de atuação
AC	Proteção e Defesa Civil (PDC)
AL	Drenagem Urbana
DF	Gestão de recursos hídricos
GO	Ciências Ambientais e Gestão de Recursos Hídricos
MG	Engenharia de recursos hídricos
MG	Comitê de Bacia
MG	Defesa civil
MG	Geoprocessamento e Planejamento Territorial
MG	Hidrologia
MG	Hidrologia e Gerenciamento de Recursos Hídricos
MG	Meio Ambiente e Recursos Hídricos
MG	Engenharia/ Hidrologia Operacional
PA	Interface saneamento-saúde-ambiente
PB	Hidrologia, meio ambiente e geoprocessamento
PE	Engenharia de recursos hídricos
RJ	Engenharia de recursos hídricos
RJ	Hidrologia
RJ	Prevenção de enchentes, Operação de reservatórios, Planejamento/Operação de sistemas hidrotérmicos/eólicos
RR	Hidrologia e Gestão Territorial
RS	Hidrologia
SP	Geração de energia hidrelétrica
TO	Gestão de Recursos Hídricos - Docente/pesquisador

Fonte: Autor (2025)

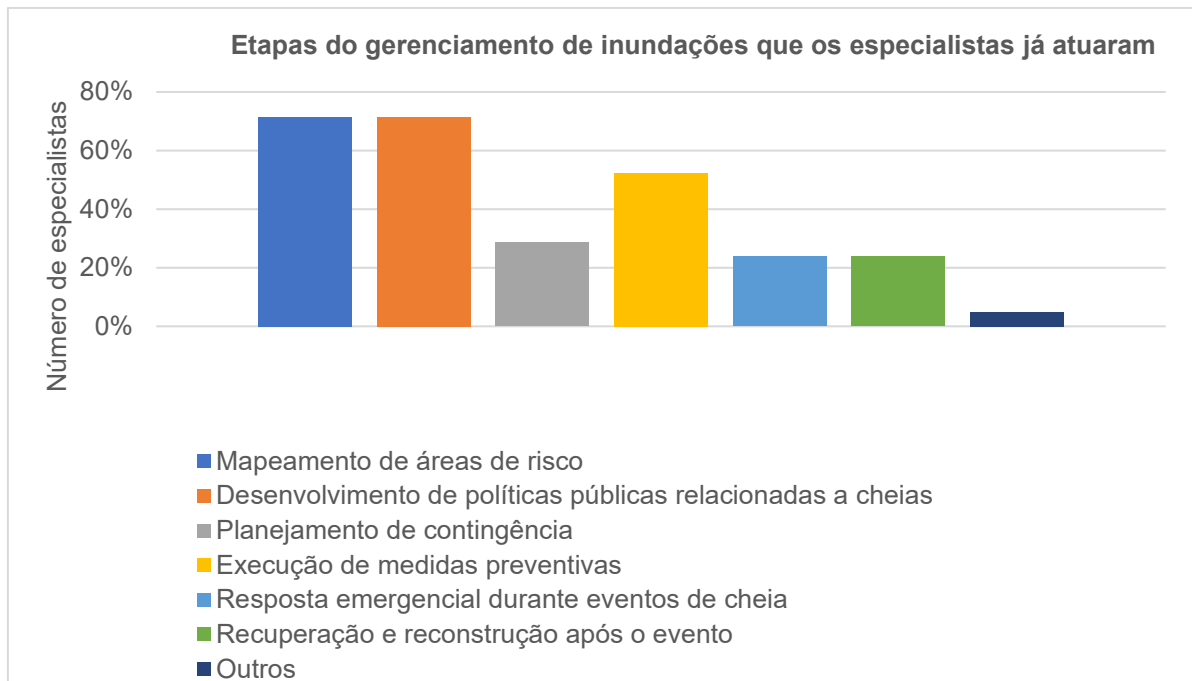
Cerca de 90% dos entrevistados possuem mais de 15 anos de experiência profissional, conforme apresentado na Figura 5, e todos possuem, no mínimo, formação em nível de graduação.

Figura 5- Tempo de experiência dos especialistas

Fonte - Autor (2025)

As etapas no gerenciamento de inundações em que os especialistas atuaram variam, conforme ilustrado na Figura 6, que apresenta a frequência acumulada de especialistas que atuaram em uma das etapas. De modo geral, a participação no mapeamento de áreas de risco e na formulação de políticas públicas relacionadas a cheias é bastante recorrente e mais de 60% dos especialistas declararam ter participado dessas atividades. Além disso, diversos participantes relataram envolvimento em ações como a implementação de medidas preventivas, resposta emergencial, recuperação pós-evento e planejamento de contingência. Dos que responderam ao questionário, apenas um não declarou ter atuado em nenhuma dessas etapas, apesar de trabalhar com a gestão de recursos hídricos.

Figura 6-Gráfico de frequência acumulativa das etapas do gerenciamento de inundações que os especialistas já atuaram



Fonte– Autor (2025)

Essas informações demonstram que o perfil geral dos entrevistados é formado por especialistas com experiência profissional e com engajamento no gerenciamento de inundações, ou seja, o grupo de especialistas selecionados está apto a contribuir com conhecimento técnico relevante a este trabalho.

5.3 Contribuições das entrevistas

Esta seção apresenta contribuições e discussões realizadas durante as entrevistas feitas com os especialistas, incluindo sugestões e melhorias baseadas em suas experiências. Esses *insights* complementam a revisão bibliográfica ao trazer diferentes perspectivas sobre o tema, enriquecendo a discussão com visões práticas.

Inicialmente é destacado que a percepção do risco e suas componentes – exposição, vulnerabilidade e perigo – varia de acordo com a formação, experiência e contexto de atuação dos especialistas entrevistados. Apesar disso, um ponto recorrente entre os entrevistados foi a interdependência entre exposição, vulnerabilidade e perigo, sendo essencial considerar os três elementos em qualquer análise de risco. Segundo um dos especialistas:

"A vulnerabilidade pode anular a importância da exposição e do perigo. Se alguém está exposto ao risco, mas não é vulnerável, o perigo perde relevância. Da mesma forma, se o perigo for zero, a exposição e a vulnerabilidade deixam de importar."

As entrevistas também trouxeram críticas relevantes à metodologia de avaliação de risco de inundação desse trabalho, apontando limitações e sugerindo melhorias. Alguns entrevistados defenderam o uso de métodos mais simples, que permitam a fácil compreensão dos resultados pelos gestores. Por exemplo, o uso de médias ponderadas foi visto como uma solução viável para transformar múltiplos fatores em uma escala única e interpretável.

A condução de entrevistas individuais, também foi destacada como uma escolha acertada, pois permitiu captar diferentes perspectivas, "pois um engenheiro da prefeitura, por exemplo, tem uma abordagem geograficamente mais localizada enquanto um especialista do setor elétrico opera com uma visão macro do problema".

Já em outra entrevista foi reconhecida a importância de técnicas expeditas, mas enfatizado que o uso de modelos mais sofisticados está se tornando cada vez mais viável e que o principal obstáculo é ainda a falta de dados de alta resolução, mas que isso pode ser superado com investimentos. Assim, no futuro próximo, será possível modelar áreas cada vez maiores com precisão, reduzindo a necessidade de métodos aproximados.

Foi apontada, também, a importância do uso de indicadores socioeconômicos e que devido à complexidade dos eventos de inundação e suas consequências, esses não podem ser explicados apenas por variáveis físicas, como a distância do rio ou o tipo de solo. Foi reconhecido que para grandes bacias hidrográficas é essencial considerar múltiplos fatores, hidráulico/hidrológicos e sociais, para obter um diagnóstico mais realista.

Outro ponto debatido foi a necessidade de gerenciar a subjetividade nas respostas. De acordo com um dos especialistas:

"Se houver grande variabilidade nas percepções dos entrevistados, é importante definir estratégias para interpretar e tratar essas divergências."

O mesmo especialista sugeriu ampliar a amostra para garantir maior representatividade e testar a robustez dos indicadores. Uma possibilidade seria adotar uma abordagem com dois valores de referência: um máximo e um mínimo, representando o grau de discordância entre os participantes.

Quanto aos indicadores de perigo, os especialistas entrevistados destacaram que a intensidade da precipitação, por si só, não é um bom indicador e que o fator determinante é a relação entre o evento extremo e as condições climáticas típicas da região. Um volume de chuva considerado extremo em uma localidade pode ser comum em outra, evidenciando a necessidade de indicadores mais contextualizados para avaliar o perigo.

Além disso, foi questionado o uso do T50 para a intensidade de precipitações, segundo um dos especialistas, a percepção humana do risco costuma se basear em períodos menores, na prática, eventos com TR de apenas 10 anos já causam grandes transtornos.

As estruturas de controle de enchentes, como diques e barragens, também foram discutidas. Embora projetadas para conter cheias, elas podem falhar diante de eventos extremos, criando uma falsa sensação de segurança que leva ao aumento da vulnerabilidade ao risco. Dessa forma, questionou se elas devem ser consideradas na definição do risco.

Por fim, a distância até o rio também foi questionada como um indicador do risco de inundação. Especialistas apontam que a planície de inundação pode se estender por centenas de metros além da margem, dependendo das características da bacia hidrográfica. Foi relatado que no caso do rio Acre, por exemplo, inundações já atingiram áreas a mais de 500 metros do leito devido ao transbordamento. A declividade da bacia também influencia o tempo de resposta das cheias: rios mais inclinados tendem a gerar inundações mais abruptas, afetando áreas extensas em um curto período. Logo, recomenda-se que a análise da distância deve ser realizada de forma conjunta com a elevação. O histórico de ocorrências de inundações também pode ajudar a identificar as áreas com maior probabilidade de serem atingidas.

Para os indicadores de exposição foram realizadas diversas discussões, dentre elas, foi apontado que o uso e ocupação do solo está sobreposto a presença de escolas e hospitais. Além disso, as entrevistas revelaram divergências entre os especialistas, no que diz respeito à categorização de elementos estruturais. Uma questão central foi se a infraestrutura deve ser considerada como um fator de exposição ou de vulnerabilidade. Alguns especialistas argumentaram que estruturas hidráulicas utilizadas para o controle de cheias estão mais relacionadas à vulnerabilidade, pois aumentam a capacidade de enfrentamento e resiliência das comunidades. Sob essa perspectiva, investimentos em infraestrutura reduzem os impactos das inundações ao melhorar a adaptação e a resposta a eventos extremos.

Por outro lado, houve posicionamentos que consideram certas infraestruturas como elementos de vulnerabilidade, principalmente quando falham ou quando induzem uma falsa sensação de segurança. Esse cenário destaca a necessidade de considerar não apenas a presença da infraestrutura, mas também sua eficácia e os riscos associados à sua dependência.

Os especialistas entrevistados identificaram uma série de indicadores ausentes ou pouco explorados nas análises de risco de inundação, apontando áreas importantes que poderiam aprimorar a compreensão e a gestão desses riscos.

No que diz respeito ao impacto ambiental, foi destacada a falta de indicadores que avaliassem a presença de indústrias e lagoas de rejeitos, que podem ser especialmente críticos durante eventos de cheias. O impacto de estações de tratamento de efluentes (ETEs) também deve ser considerado, especialmente quando localizadas próximas a áreas de risco, uma vez que o nível de contaminação das águas nessas situações pode ser significativo. Além disso, a presença de áreas de preservação permanente (APP) é relevante, já que proíbe a ocupação de planícies de inundação afetando dessa forma, o uso e ocupação do solo.

Outros aspectos mencionados envolvem a necessidade de incluir indicadores relacionados à presença de infraestruturas críticas, como hospitais, presídios e subestações de energia. “A infraestrutura de bombeamento de água também é crucial, pois o fornecimento de água pode ser comprometido em situações de cheias”. Um dos especialistas sugere que a infraestrutura de transporte, incluindo estradas e

aeroportos, devem ser consideradas. O entrevistado destacou o impacto significativo das inundações nos sistemas de transporte, os quais podem dificultar o acesso às áreas afetadas e dificultar a logística de socorro.

Outro indicador, apontado como importante e não utilizado, é a taxa de elevação do rio. A rapidez com que o nível do rio pode subir pode dificultar a resposta das equipes de resgate, e incorporar esse dado nas análises ajudaria a melhorar o entendimento sobre o tempo de resposta às inundações.

Outro especialista apontou que a inclusão de características fisiográficas podem ser um importante indicador a ser considerado, pois uma bacia arredondada, por exemplo, tem maior propensão a inundações do que uma bacia alongada. Além disso, a inclusão do tempo de concentração da bacia (TC) também foi destacado como um indicador faltante, pois quanto menor o TC, maior o nível de perigo. Um ponto de atenção destacado a esse indicador foi sua variação com a faixa de vazão, sendo uma importante consideração para prever a dinâmica das cheias. Outra sugestão foi incluir o risco geológico, como o deslizamento de massa uma vez que pode agravar as consequências das inundações, especialmente em áreas de encostas.

A vulnerabilidade das populações, incluindo a caracterização do tipo de residência, também foi uma preocupação dos especialistas. As áreas de risco, como favelas e residências precárias, sofrem um impacto maior durante as cheias, e um indicador que relacione essas questões pode melhorar a avaliação do risco.

Além disso, a consideração de fatores econômicos, como o impacto das inundações nas comunidades ribeirinhas, foi vista como uma lacuna significativa. A falta de indicadores que abordem essa dimensão de vulnerabilidade limita a análise, usar indicadores como o IDH pode sanar essa carência. A inclusão de fatores como escolaridade, acesso à internet e faixa etária também pode fornecer uma visão mais detalhada da vulnerabilidade social e econômica.

A falta de um critério específico para avaliar a governança diante das enchentes foi mencionada por diversos entrevistados. A estruturação da defesa civil e a articulação eficiente entre as autoridades e as comunidades são cruciais para a gestão de desastres.

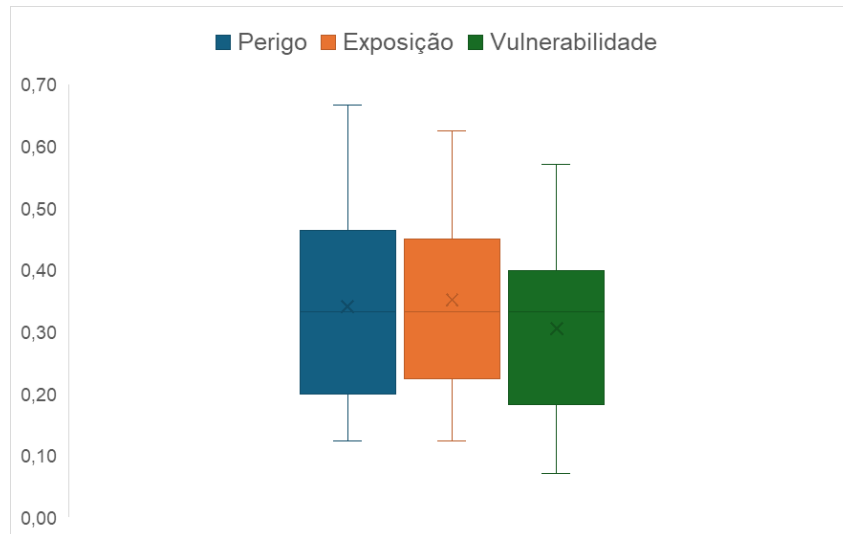
Por fim, a inclusão das mudanças climáticas na modelagem foi um tema recorrente nas entrevistas e uma preocupação destacada por vários especialistas, que consideram essencial sua incorporação nas análises de risco em projetos de definição de uso e ocupação territorial.

5.4 Resultados da Ponderação dos critérios e indicadores por especialistas

Para determinar os pesos atribuídos às dimensões do risco, bem como aos indicadores de perigo e exposição, foi realizada uma análise estatística descritiva dos pesos fornecidos pelos especialistas às variáveis em estudo. Para esse fim, foram elaborados gráficos boxplot com as respostas, conforme ilustrado nas Figuras 7,8 e 9.

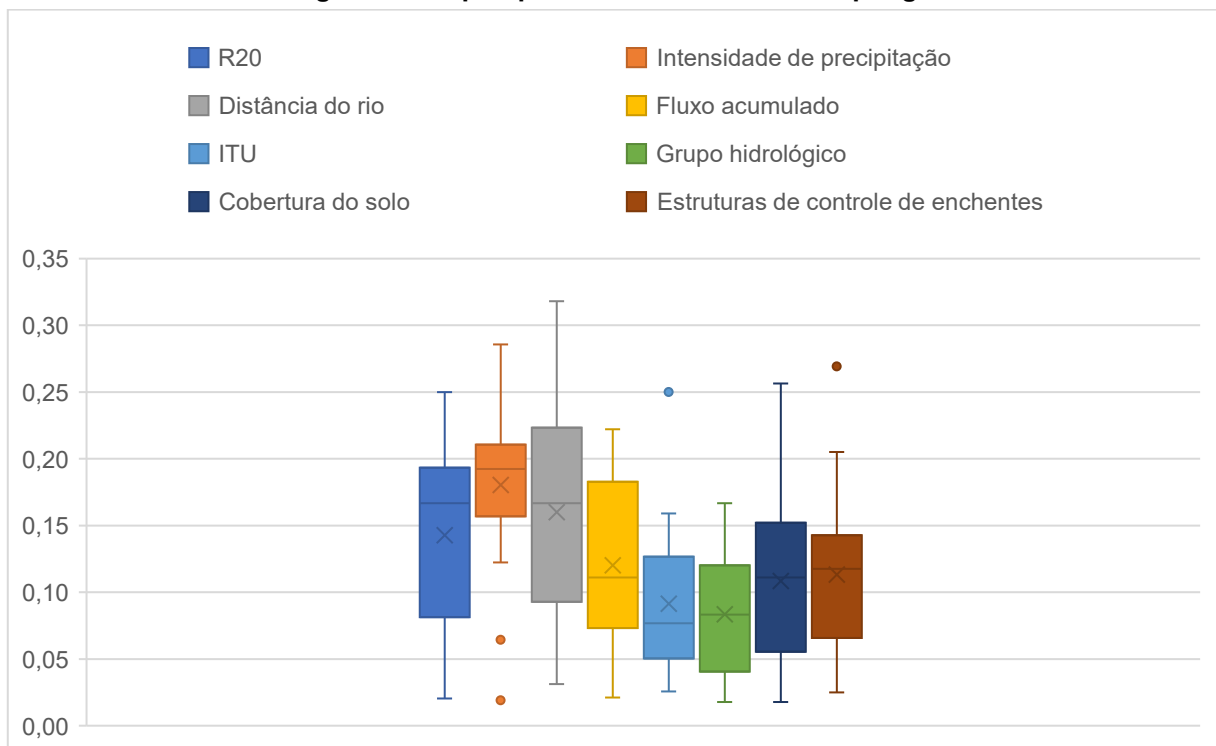
Na Figura 7, foi possível observar que os critérios perigo, exposição e vulnerabilidade apresentaram uma tendência central bem definida, com a média, mediana e moda com valores semelhantes. Apesar da semelhança entre os valores de tendência central, a dispersão dos pesos é grande dentre os diversos especialistas, demonstrando que não há consenso sobre a importância relativa dentre os três critérios. Para embasar a decisão dos valores a serem utilizados realizou-se um teste de sensibilidade a esses pesos, como pode ser observado no Apêndice H - sensibilidade dos pesos. Assim, concluiu-se que a adoção da mediana para o peso dos critérios é adequada.,.

Os pesos obtidos foram de 0,33 para as 3 dimensões do risco. Este valor pode estar associado à ausência de consenso na comunidade sobre qual desses critérios possui maior relevância na análise do risco. Enquanto alguns especialistas enfatizam a importância da exposição e vulnerabilidade como fatores determinantes, outros argumentam que o perigo deve ser priorizado, pois define a propensão de uma região a sofrer eventos extremos.

Figura 7- Boxplot pesos das dimensões do risco

Fonte - Autor (2025)

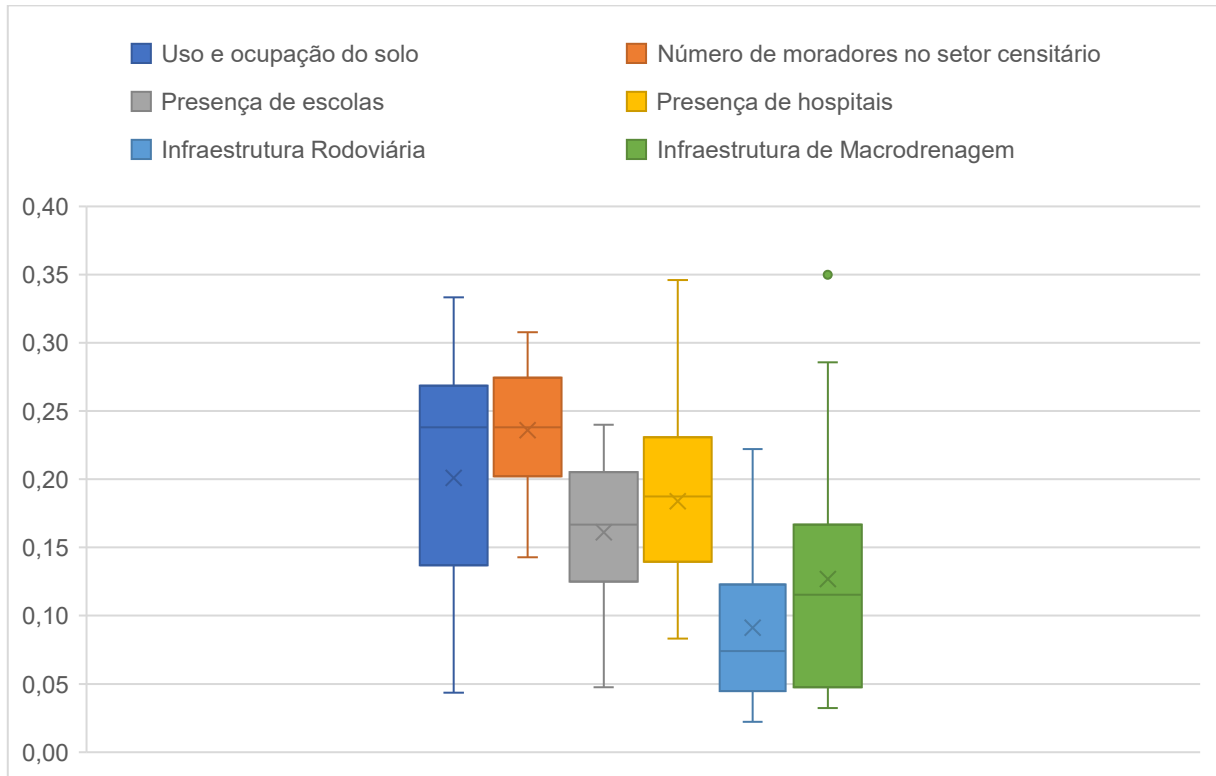
Para os indicadores de perigo, observa-se na Figura 8, que para a maioria das variáveis a média e a mediana estão relativamente próximas, mas há mais assimetria entre as variáveis. Além disso, há outliers para os indicadores de intensidade de precipitação, índice topográfico de umidade e estruturas de controle de enchente.

Figura 8- Boxplot pesos dos indicadores de perigo

Fonte – Autor (2025)

Os indicadores de exposição, também apresentaram o comportamento descrito para os indicadores de perigo. A média e a mediana estão relativamente próximas, mas é verificada certa assimetria na distribuição.

Figura 9- Boxplot pesos dos indicadores de exposição



Fonte – Autor (2025)

Os outros resultados para os indicadores de perigo e indicadores de exposição estão representados nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1- Pesos atribuídos aos indicadores de Perigo

Indicador de Perigo	Peso
Intensidade de precipitação	0,19
PPMAX,MED	0,16
Distância do rio	0,17
Fluxo acumulado	0,11
Cobertura do solo	0,11
Estruturas de controle de enchentes	0,11
Grupo hidrológico	0,08
ITU	0,07

Fonte – Autor (2025)

A intensidade de precipitação foi considerada o fator mais relevante, recebendo o maior peso na análise. Em seguida, a distância do rio e o PPMAX,MED foram classificados com pesos intermediários. Por outro lado, o índice topográfico de umidade e o grupo hidrológico receberam os menores pesos. Isso reflete a percepção dos especialistas de que a precipitação tem o impacto mais direto sobre o perigo, enquanto fatores como topografia e características hidrológicas podem ter um papel secundário no cenário analisado.

Tabela 2- Pesos atribuídos aos indicadores de exposição

Indicador de Exposição	Peso
Número de moradores no setor censitário	0,24
Uso e ocupação do solo	0,24
Presença de hospitais	0,18
Presença de escolas	0,16
Infraestrutura de Macrodrenagem	0,11
Infraestrutura Rodoviária	0,07

Fonte – Autor (2025)

Os indicadores de exposição revelaram uma priorização dos fatores que afetam a população. O indicador número de moradores no setor censitário assim como o uso e ocupação do solo receberam o maior peso, seguida pela presença de escolas e hospitais. A infraestrutura de macrodrenagem, assim como infraestrutura rodoviária foram consideradas menos importantes.

5.5 Resultados da ponderação dos indicadores referentes à dimensão vulnerabilidade

São apresentados na Tabela 3 os resultados da ponderação dos indicadores referentes à dimensão vulnerabilidade. Os pesos foram distribuídos proporcionalmente entre os indicadores de cada critério, de forma a garantir que a soma total de cada critério seja igual. Essa metodologia assegura que cada indicador contribua de maneira equilibrada para a avaliação global da vulnerabilidade.

Tabela 3 - Variáveis que serão usadas no novo indicador de vulnerabilidade disponíveis no Censo 2010

Indicador	Peso	
Taxa de Moradia inadequada (MI)	0,34	
Taxa da população menor que 5 anos ou maior de 70 anos (FE)	0,33	
Taxa de moradias sem acesso a serviços de saneamento	Taxa de Domicílios sem lixo coletado (LX)	0,11
	Taxa de Domicílios sem esgotamento sanitário (ES)	0,11
	Taxa de Domicílios sem abastecimento de água (AG)	0,11
Taxa de Responsáveis não alfabetizados(as) (AF)	0,5	
Faixa de renda (RE)	0,5	

Fonte – Autor (2025)

6 PROPOSTA DA SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE RISCO EM ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÃO

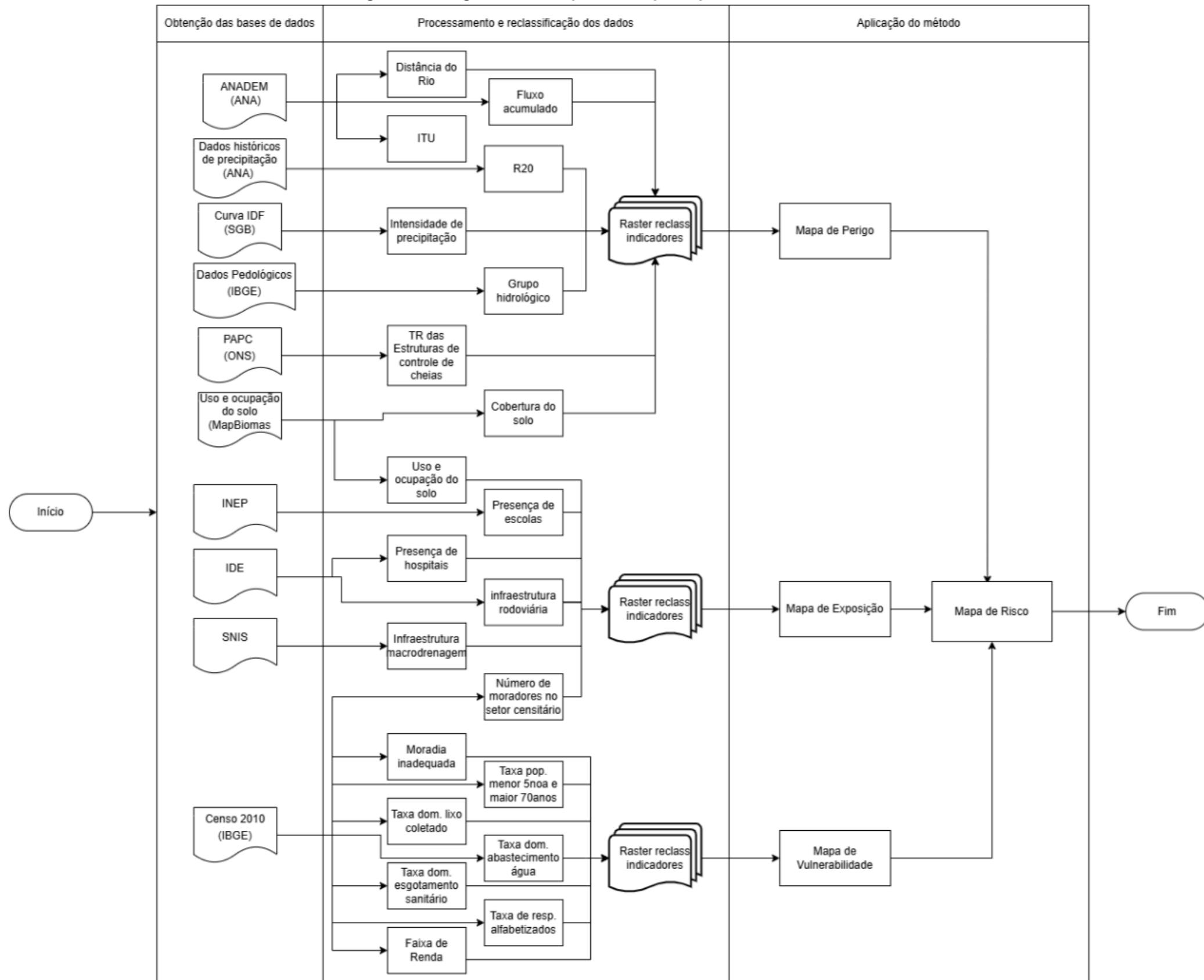
A sistemática desenvolvida é composta por seis etapas distintas, a saber: (1) coleta de dados, (2) processamento para extração dos indicadores, (3) reclassificação de cada indicador, (4) atribuição de pesos, (5) criação dos mapas das dimensões do risco, (6) criação do mapa de risco.

Para a etapa (1), foram coletados os dados socioeconômicos, hidrológicos e físicos da sub-bacia a partir de bases de dados públicas, conforme descrito na Seção 4. Esses dados foram processados, etapa (2), para a obtenção dos indicadores definidos previamente, o que exigiu a manipulação e transformação das informações brutas para o uso em mapas. Para os dados georreferenciados, manipulados em ambiente SIG, foi adotado o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) SIRGAS 2000 / UTM 22S como padrão. Além disso, para otimizar o processamento, as análises foram restritas à área de estudo.

Em seguida, esses indicadores foram reclassificados, etapa (3), com base nos critérios estabelecidos na Seção 6.1. Na etapa (4) foi empregada a análise multicritério para integrar os indicadores por meio da atribuição de pesos. A partir da álgebra de mapas foram obtidos os mapas de perigo, exposição e vulnerabilidade conforme detalhado na seção 6.2 (etapa 5). Esses mapas foram combinados por meio da soma ponderada para a obtenção do mapa de risco final, etapa (6), como descrito na seção 6.3.

A Figura 10 representa o processo da sistemática, apontando desde os bancos de dados usados até o mapa de risco final.

Figura 10 – Diagrama com os processos para aplicação da ferramenta



Fonte - Autor (2025)

6.1 Reclassificação dos indicadores

A normalização dos indicadores, definida como etapa (3), é uma atividade necessária, uma vez que cada indicador considerado neste trabalho opera com sua própria unidade de medida. Dessa forma, para que fosse possível realizar a agregação desses indicadores, foi necessário que todos estivessem em uma mesma escala e no mesmo sentido de preferência.

Para realizar a normalização, foram definidas cinco categorias que variam de muito baixo a muito alto, no entanto, para uso em ambiente SIG, essa classificação é traduzida em valores que estão entre 0 e 1. Quanto mais próximos de um, maior a contribuição daquele indicador para o risco. A criação das categorias foi realizada para cada indicador, conforme descrito nos parágrafos a seguir. As categorias resultantes apresentadas a seguir, na Tabela 4.

Para o indicador de intensidade de chuva, a classificação foi realizada segundo o valor da IDF dado em mm/h para o TR50 e tempo de duração igual ao tempo de concentração da bacia. Para gerar cada categoria, foi arbitrado como valor mínimo 60mm/h e uma variação de 20mm/h até a formação das 5 categorias.

Para o indicador PPMAX,MED a classificação foi realizada de acordo com o número de dias que possuem chuva acumulada diária maior que a média dos máximos do mês mais chuvoso da série histórica. Inicialmente, adotou-se o valor de 5 dias como representativo da categoria "muito alto", porém essa definição ainda pode ser revista por meio de uma análise de sensibilidade, a fim de verificar sua adequação às diferentes bacias.

Para a distância do rio, a classificação foi baseada na precisão do MDE, que é de 30 metros. Assim, os primeiros 30 metros apresentam o maior potencial de perigo, enquanto a partir dos 120 metros o perigo é considerado muito baixo. Já para o indicador Hand, locais com até 5 metros do rio são muito suscetíveis a inundação e por isso recebem um valor muito alto, enquanto locais com mais de 20m são menos suscetíveis e por isso recebem valor menor para o indicador.

Para a classificação do grupo hidrológico, foi atribuído um peso a cada grupo, representando sua contribuição para a geração de escoamento superficial. Nesse critério, solos com maior capacidade de infiltração receberam pesos menores, indicando uma menor contribuição para o escoamento, enquanto área urbana e corpos d'água receberam maior peso.

Para a utilização do ITU e do fluxo acumulado em uma metodologia de análise multicritério, foi realizada a reclassificação desses dados utilizando 5 classes criadas com auxílio do método de *natural breaks* que estabelece os limites das classes ao identificar agrupamentos e descontinuidades naturais na distribuição dos dados, buscando maximizar a semelhança dentro de cada classe e a diferença entre elas (Jenks, 1967).

Por ser uma abordagem intrinsecamente dependente dos dados, seus resultados são únicos para cada área de estudo. Dessa forma, a resolução espacial é um fator crítico, pois ao ser alterada, modifica-se o número de pixels e, conseqüentemente, a distribuição estatística dos valores analisados. Isso faz com que o algoritmo identifique novos "pontos de quebra" ideais. Portanto, as classes geradas para uma resolução específica não são transferíveis. ou seja, para aplicação dessa classificação em outros trabalhos é necessário realizar um estudo específico para avaliar se as classes adotadas se aplicam a outras regiões.

Para a cobertura do solo, foi utilizada a classificação definida pelo mapa de uso e ocupação do solo do MapBiomas. Apesar de ele possuir outras subclassificações, foram adotadas apenas as coberturas: floresta, vegetação herbácea ou arbustiva, pastagem, agricultura, áreas não vegetadas, área urbanizada, mineração e corpo d'água. Essa escolha foi fundamentada no fato de que diferentes tipos de cobertura do solo têm efeitos distintos sobre a infiltração da água, o escoamento e a retenção de água no solo. Cada classe recebeu um peso de acordo com sua contribuição na formação das cheias. As florestas, por exemplo, receberam um peso muito baixo, enquanto áreas urbanizadas recebem um peso alto.

Por fim, as estruturas de controle de cheias foram reclassificadas de acordo com o nível de proteção oferecido por elas. Assim, estruturas com período de retorno menor que 10 anos, possuem nível de perigo alto, já para locais com estruturas que atendem

a um TR maior que 10.000 anos, a contribuição para o risco é muito baixa e, por fim, para regiões sem a presença de reservatórios de regularização o valor do perigo é muito alto. Visto que a ação dos reservatórios é atenuadora os valores atribuídos a esse indicador é negativo, ou seja, ele reduz o valor do perigo.

Para a reclassificação dos indicadores de exposição (mostrados na TABELA 5), adotou-se o princípio de que a maior exposição está relacionada à maior presença de pessoas e infraestruturas e à relevância econômica de determinadas áreas. Dessa forma, as classes de uso e ocupação do solo referentes às áreas urbanas e agrícolas receberam maior peso devido à sua relevância econômica e capacidade de adaptação a inundações. Enquanto as classes floresta, vegetação herbácea ou arbustiva e áreas não vegetadas receberam menor peso.

A classificação da densidade demográfica foi estabelecida atribuindo-se pesos mais elevados às regiões com maior número de habitantes por área, considerando o potencial de exposição proporcional à população residente. A análise não incluiu variações temporárias na permanência dos moradores, contemplou apenas os residentes permanentes.

Para os elementos considerados vulneráveis, foi identificada a necessidade de incluir locais com grande circulação de pessoas e essenciais para atendimento emergencial, como escolas e hospitais. Desse modo, analisou-se tanto a quantidade desses locais quanto sua distância do rio, considerando-se a distância entre escolas e hospitais como um fator relevante de exposição. Para a reclassificação, foram utilizadas cinco classes de distância, com valor inicial de 30 metros cada; assim, áreas situadas até 30 metros de uma escola são classificadas como de exposição muito alta, enquanto distâncias superiores a 120 metros são consideradas de exposição muito baixa.

Além disso, para infraestrutura rodoviária, o indicador é calculado de forma espacializada, ou seja, levando em consideração a localização geográfica de cada célula da área estudada em relação ao traçado das rodovias, foi considerado que quanto mais próximo às rodovias maior a exposição desses elementos. Para a classificação, foram criadas 4 faixas paralelas ao traçado das rodovias com 30 metros de largura, classificando como maior exposição as células localizadas nas faixas mais

próximas ao traçado da estrada e menor exposição às células localizadas nas faixas mais distantes do traçado.

Por fim, para a infraestrutura de macrodrenagem, as categorias para normalização foram definidas com base na densidade de macrodrenagem, tomando o município de Belo Horizonte como referência, onde foi considerada densidade de drenagem muito alta, e as categorias subsequentes foram uma abstração desse valor. Dessa forma, áreas com maior densidade de infraestrutura de macrodrenagem receberam maior valor na normalização.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os pesos atribuídos para a reclassificação dos indicadores de perigo e exposição, respectivamente.

Tabela 4- Valores para reclassificação dos indicadores de perigo.

Indicador	Reclassificação	Reclassificação	Perigo
Intensidade de precipitação (mm/h)	<60mm/h	0,2	Muito baixo
	60mm/h>=x<80mm/h	0,4	Baixo
	80mm/h<=x<100mm/h	0,6	Moderado
	100mm/h<=x<120mm/h	0,8	Alto
	>120mm/h	1	Muito alto
PPMAX,MED (dias)	<1	0,2	Muito baixo
	1>=x<2	0,4	Baixo
	3<=x<4	0,6	Moderado
	4<=x<5	0,8	Alto
	>5	1	Muito alto
Distância do rio (m)	>120	0,2	Muito baixo
	>90	0,4	Baixo
	60<x<=90	0,6	Moderado
	30<x<=60	0,8	Alto
	<=30	1	Muito alto
Hand (m)	0<x<=5	1	Muito alto
	5<x<=10	0,8	Alto
	10<x<=15	0,6	Moderado
	15<x<=20	0,4	Baixo
	>20	0,2	Muito baixo
Fluxo acumulado (número de pixels)	0<x<=23069	0,2	Muito baixo
	23069<x<=97463	0,4	Baixo
	97463<x<=234756	0,6	Moderado
	234756<x<=374640	0,8	Alto
	>374640	1	Muito alto
Cobertura do solo	Floresta	0,2	Muito baixo

Indicador	Reclassificação	Reclassificação	Perigo
	Vegetação herbácea ou arbustiva	0,4	Baixo
	Pastagem	0,5	Baixo
	Agricultura	0,6	Moderado
	Áreas não vegetadas	0,7	Moderado
	Área urbanizada	0,8	Alto
	Mineração	0,9	Muito alto
	Corpo d'água	1	Extremos
Estruturas de controle cheias	>TR1000	-1	Muito Baixo
	TR 100>x>=TR1000	-0,8	Baixo
	TR 10>x>=TR100	-0,6	Moderado
	x<=TR10	-0,4	Alto
	Inexistente	0	Muito alto
Grupo hidrológico	Grupo A	0,2	Muito baixo
	Grupo B	0,4	Baixo
	Grupo C	0,6	Moderado
	Grupo D	0,8	Alto
	Área urbana	0,9	Muito alto
ITU (adimensional)	Corpo d'água continental	1	Extremo
	15517<x<=72982	0,4	Baixo
	72982<x<=210078	0,6	Moderado
	210078<x<=378552	0,8	Alto
	>378552	1	Muito alto

'Fonte – Autor (2025)

Tabela 5- Valores para reclassificação dos indicadores de exposição.

Indicador	Elemento	Reclassificação	Exposição
Densidade demográfica (número de moradores por km ²)	<100	0,2	Muito baixa
	100<=x<500	0,4	Baixa
	500<=x<1000	0,6	Moderada
	1000<=x<2000	0,8	Alta
	>2000	1	Muito alta
Uso e ocupação do solo	Corpo d'água	0	Indiferente
	Floresta, Vegetação herbácea ou arbustiva, Áreas não vegetadas	0,2	Muito baixa
	Mineração	0,4	Baixa
	Pastagem	0,6	Moderada
	Agricultura	0,8	Alta
	Área urbanizada	1	Muito alta
Distância hospitalar (m)	0-30	1	Muito alta
	30-60	0,8	Alta
	60-90	0,6	Moderada
	90-120	0,4	Baixa
	>120m	0,2	Muito baixa
	0-30	1	Muito alta

Indicador	Elemento	Reclassificação	Exposição
Distância de escolas (m)	30-60	0,8	Alta
	60-90	0,6	Moderada
	90-120	0,4	Baixa
	>120m	0,2	Muito baixa
Densidade de Infraestrutura de Macrodrenagem (km/km ²)	>2	1	Muito alta
	1<x<=2	0,8	Alta
	0,5<x<=1	0,6	Moderada
	0,2<x<=0,5	0,4	Baixa
	<=0,2	0,2	Muito baixa
Distância de Rodovias (m)	0-30	1	Muito alta
	30-60	0,8	Alta
	60-90	0,6	Moderada
	90-120	0,4	Baixa
	>120	0,2	Muito baixa

Fonte – Autor (2025)

Para os indicadores de vulnerabilidade, apenas para renda, foi necessária uma reclassificação, visto que os outros indicadores são taxas que representam a porcentagem da população total que possui certas características. As faixas de rendimento adotadas foram retiradas da classificação da ABEP de 2010, conforme apresentado na Tabela 06, onde quanto maior a renda, menor a vulnerabilidade.

Tabela 6- Classificação das faixas de renda segundo ABEP 2010

Faixa de renda	Classe	Reclassificação
Maior que R\$8418	A1	0,2
Entre R\$4418,00 e R\$8418,00	A2	0,4
Entre R\$2565,00 e R\$4418,00	B1	0,5
Entre R\$1541,00 e R\$2565,00	B2	0,6
Entre R\$1024,00 e R\$1541,00	C1	0,7
Entre R\$714,00 e R\$1024,00	C2	0,8
Entre R\$477,00 e R\$714,00	D	0,9
Menor que R\$477,00	E	1

Fonte: Adaptado ABEP (2010)

Na seção 6.2 e 6.3 serão apresentados os equacionamentos utilizados para a formação das dimensões de risco e da ferramenta para análise de risco.

6.2 Definição das dimensões de perigo, exposição e vulnerabilidade

Como apresentado anteriormente, o risco é composto por diferentes dimensões, cada uma representada por um conjunto de indicadores descritos na seção 4.3. Para calcular o valor de cada dimensão, também será aplicada a álgebra de mapas em ambiente SIG. Os indicadores utilizados neste trabalho são espacializados, ou seja, os cálculos são feitos considerando a localização geográfica de cada ponto do território. Para os dados em formato de imagem (raster), como mapas de chuva ou relevo, cada píxel (célula) representa uma pequena área do terreno e recebe um valor individual de acordo com o indicador avaliado. Já para dados em formato vetorial, como escolas, hospitais ou rodovias, os indicadores são calculados para cada elemento geográfico específico (como um ponto ou uma *polyline* no mapa).

Para o perigo, foram considerados 8 camadas raster que representam os indicadores normalizados, a saber: intensidade de precipitação (IP), Máxima Precipitação Média do Mês Chuvoso (PPMAX,MED), distância do rio (DR), fluxo acumulado (FA), cobertura do solo (CSO), estruturas de controle de enchentes (EC), grupo hidrológico (GH) e índice topográfico de umidade (ITU). Cada indicador recebeu o peso relativo definido na seção 5.4. Foi então aplicada a função aditiva ponderada em cada píxel, conforme a Equação (4):

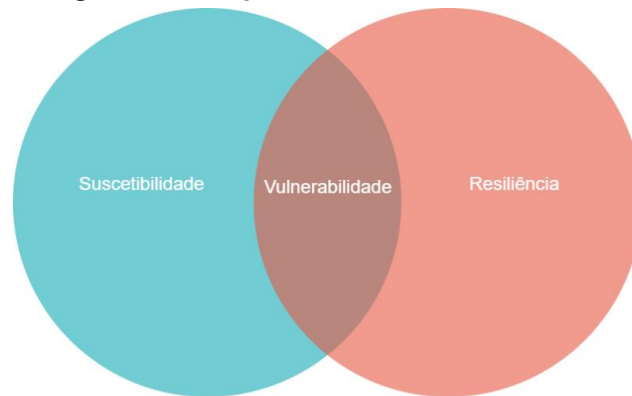
$$P = 0,19 * IP + 0,17 * PPMAX, MED + 0,16 * DR + 0,11 * FA + 0,11 * CSO + 0,11 * EC + 0,08 * GH + 0,07 * ITU \quad (4)$$

No caso da dimensão exposição, foram utilizadas seis camadas raster correspondentes aos indicadores normalizados: número de moradores por setor censitário (MS), presença de escolas (ES), presença de hospitais (HO), infraestrutura de macrodrenagem (IM), infraestrutura rodoviária (IR) e uso e ocupação do solo (US). A cada indicador foi atribuído o peso relativo estabelecido na seção 5.4. Em seguida, aplicou-se a função aditiva ponderada píxel a píxel, conforme descrito na Equação (5)

$$E = 0,24 * MS + 0,24 * US + 0,18 * HO + 0,16 * ES + 0,11 * IM + 0,07 * IR \quad (5)$$

O indicador de vulnerabilidade também foi baseado no conceito de Sayers et al. (2013) em que dentre as parcelas da vulnerabilidade estão a resiliência e a suscetibilidade, conforme Figura 11.

Figura 11- Componentes da Vulnerabilidade



Fonte – Autor (2025)

Para a consolidação da dimensão vulnerabilidade também foi aplicada a álgebra de mapas em ambiente SIG, às suas componentes, suscetibilidade e resiliência, foi atribuído o peso (0,5) e as componentes que os forma taxa de responsáveis não alfabetizados (AF), faixa de renda (RE), taxa de moradia inadequada (MI), taxa da população menor que 5 anos ou maior de 70 anos (FE), taxa de domicílios sem lixo coletado (LX), taxa de domicílios sem esgotamento sanitário (ES), taxa de domicílios sem abastecimento de água (AG) também recebem pesos iguais entre elas conforme apresentado na seção 5.5. Dessa forma, obtemos a equação de vulnerabilidade que consiste na soma ponderada das componentes conforme a Equação (6).

$$V = 0,5 * (0,5*AF+0,5*RE) + 0,5*(0,34*MI+0,33*FE+0,11*LX+0,11*ES+0,11*AG) \quad (6)$$

Para avaliar a coerência do uso indicador de vulnerabilidade, foi realizada validação do índice como pode ser observado no Apêndice G.

6.3 Definição do índice de Risco

Após a definição das dimensões que compõe o risco, propõe-se a sistemática para a análise de risco em áreas suscetíveis à inundação, fundamentado em abordagem multicritério. A estrutura conceitual da proposta baseia-se no conceito de risco definido por Sayers et al. (2013), conforme apresentado na seção 3.1.

A combinação das dimensões do risco foi operacionalizada por meio da álgebra de mapas temáticos, em ambiente SIG. No software adotado neste projeto, o QGIS, essa abordagem foi implementada por meio da calculadora raster, que permite aplicar expressões matemáticas diretamente aos valores dos pixels de cada mapa. Para a

obtenção do resultado, utilizou-se a função aditiva, representada na Equação 7, na qual R representa o risco, P o perigo, V a vulnerabilidade, E a exposição, e 0,33 corresponde ao peso atribuído a cada dimensão, conforme discutido na seção 5.4.

$$R=0,33*P+0,33*E+0,33*V \quad (7)$$

Cada dimensão é representada por uma camada raster composta por uma matriz regular de pixels, onde cada célula armazena um valor numérico georreferenciado. A álgebra de mapas permite a aplicação de operações célula a célula; nesse caso, a Equação 7 é aplicada simultaneamente a todas as células correspondentes nas camadas de perigo, exposição e vulnerabilidade (GUDIYANGADA et al., 2020).

Uma limitação dessa função é que ela não representa adequadamente os casos em que uma das dimensões possui valor nulo. Idealmente, se qualquer uma das parcelas for igual a zero, o risco total também deveria ser nulo. No entanto, isso não ocorre com a função aditiva adotada.

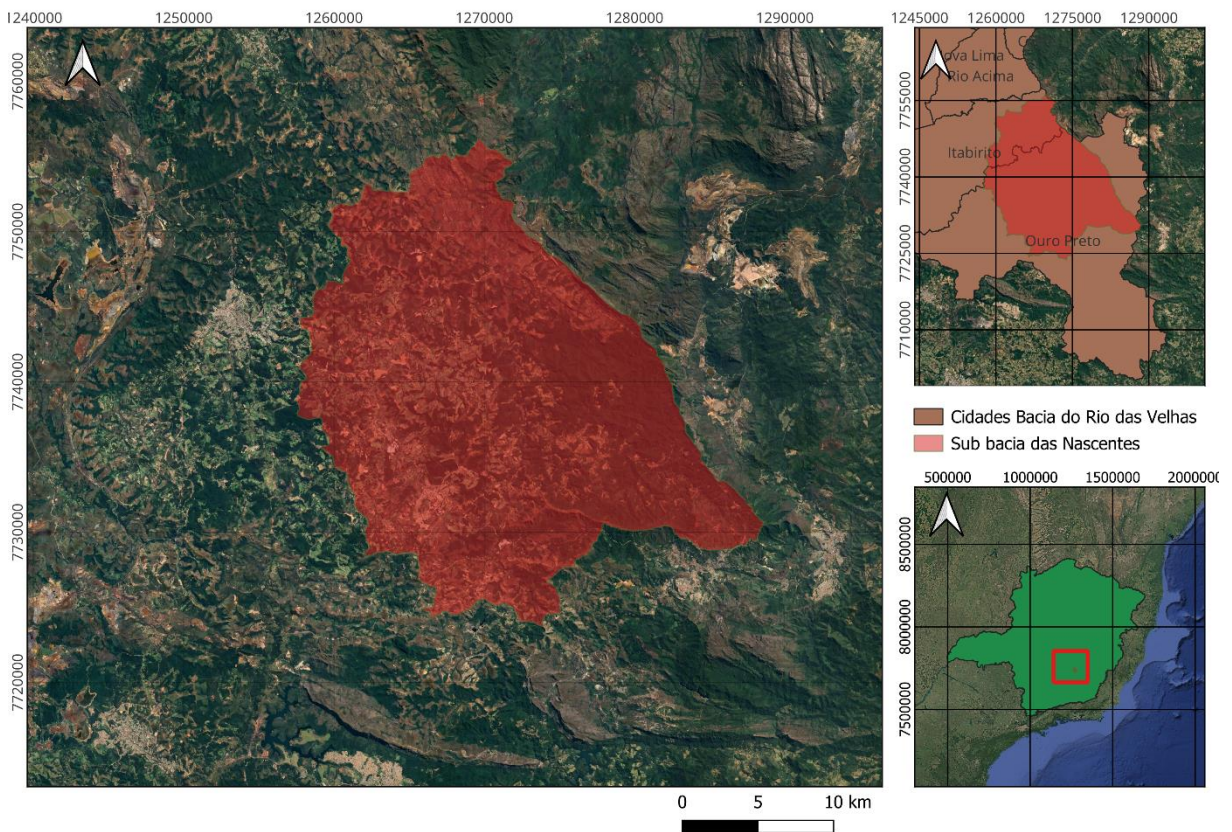
Por fim, obteve-se o mapa de risco como resultado da aplicação da metodologia proposta. Esse produto permite dois tipos de análise. A primeira, de caráter intra-bacia, possibilita identificar variações espaciais no nível de risco dentro de uma mesma bacia hidrográfica, destacando as regiões mais críticas. A segunda refere-se à comparação entre diferentes bacias, desde que tenham sido analisadas sob os mesmos critérios metodológicos. Nessa abordagem, os valores podem ser agregados para gerar um indicador único de risco por bacia, o que viabiliza uma avaliação comparativa do risco relativo e, conseqüentemente, a definição de prioridades para investimentos em diferentes regiões.

7 ESTUDO DE CASO

7.1 Área de Estudo

Para a validação inicial, foi escolhida uma unidade territorial estratégica (UTE) no alto rio das Velhas, denominada sub-bacia das Nascentes. A escolha dessa bacia foi definida em função da região estar em área com recorrência de cheias. A sub-bacia possui 541,58 km² e está ilustrada na Figura 12.

Figura 12-Localização da sub-bacia das Nascentes

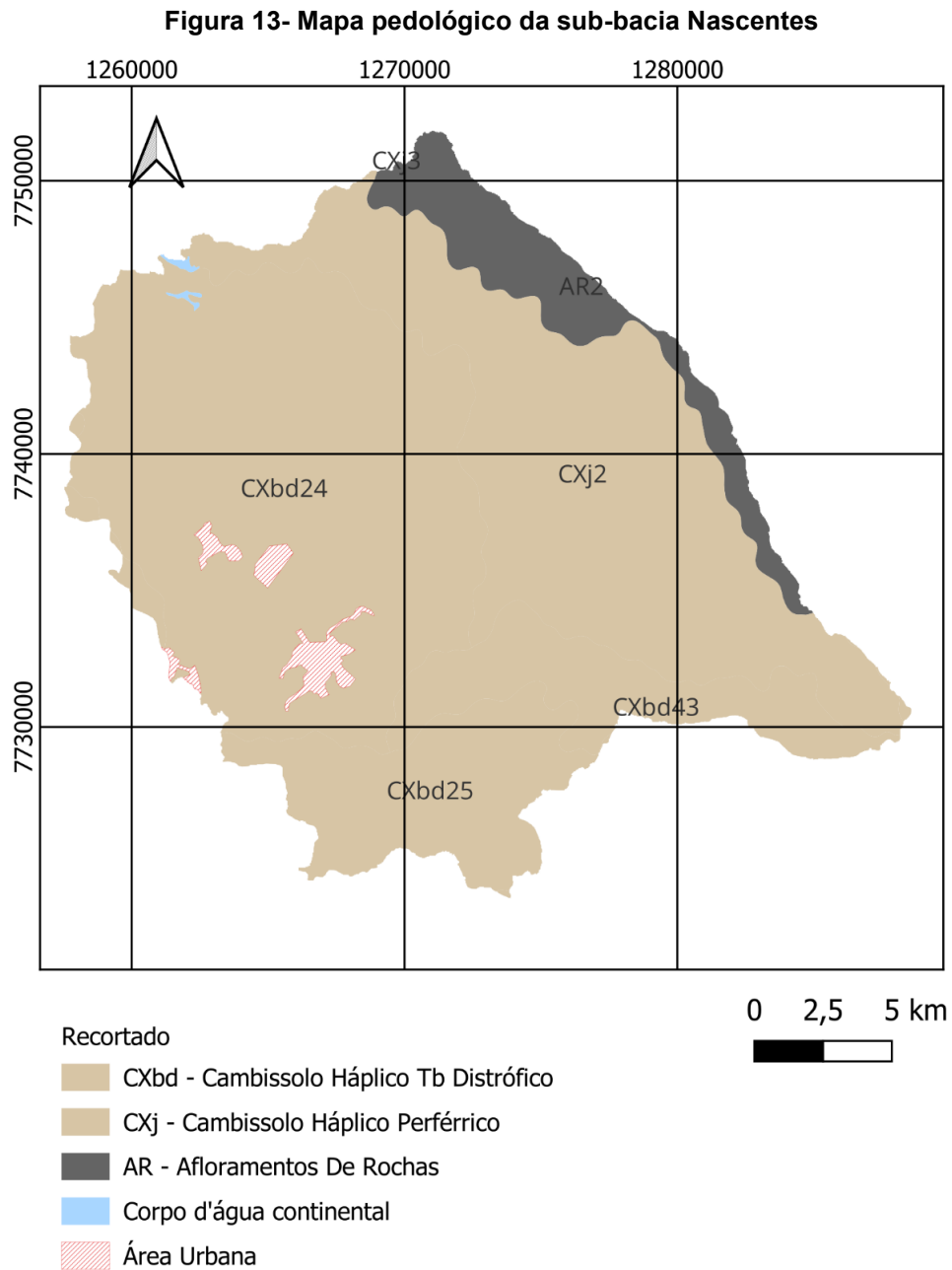


Fonte - Autor (2025)

Na área desta UTE está a nascente do Rio das Velhas no Parque Natural Municipal Cachoeira das Andorinhas, também estão localizados vários afluentes como o Rio Maracujá, o Ribeirão do Funil, o Córrego Olaria e o Córrego do Andaime.

Com relação à formação do solo da região observa-se na Figura 13 a presença do Cambissolo que, de forma geral apresenta baixa infiltração, baixa resistência à

erosão, de acordo com Sartori; Neto; Maia Genovez (2005), esse tipo de solo tende a aumentar o escoamento superficial, assim como a presença de afloramentos rochosos.



Fonte - Adaptado de IBGE (2023)

A região é caracterizada por intensa atividade minerária e atividades agropecuárias (CBH RIO DAS VELHAS, 2025). Além disso, dentro da sub-bacia estão localizadas

duas cidades: Ouro Preto e Itabirito. A principal região urbana é Cachoeira do Campo, distrito de Ouro Preto. De acordo com o SNIS, consulta realizada em 2025, Itabirito possui mapeamento de risco hidrológico de todos os cursos d'água urbanos e atualmente não há domicílios sujeitos a risco de inundação, enquanto Ouro Preto declara que não há mapeamento e existem 50 domicílios em área de risco de inundação. Ambas as cidades sofreram com eventos como enxurradas, alagamentos e inundações reportadas na mídia.

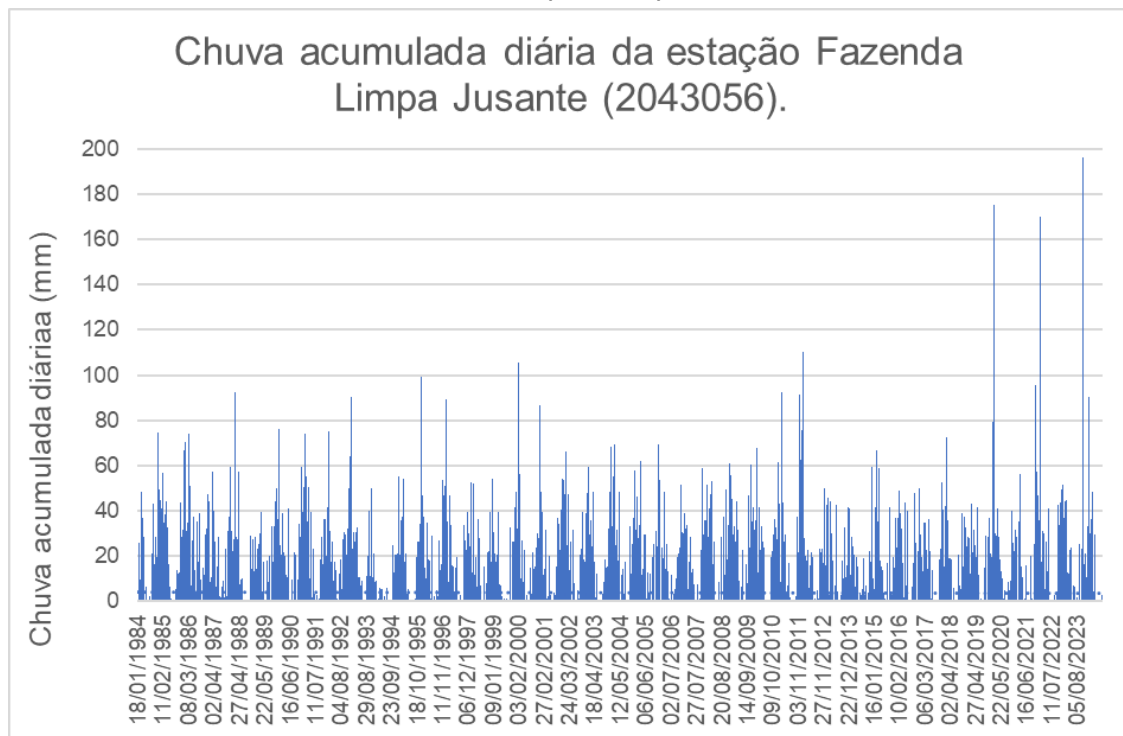
Para a aplicação da sistemática na sub-bacia Nascentes, foram coletadas e processadas informações da área descrita para os indicadores de perigo, exposição e vulnerabilidade. A seguir é apresentada a geração de dados para obtenção de cada um dos indicadores.

7.2 Levantamento dos Indicadores

7.2.1 Indicadores de Perigo

O indicador PPMAX,MED foi definido na seção 4.3 como o número de dias por ano com precipitação superior ou igual a 20mm, nos últimos 15 anos. Para obtenção dos dados necessários ao PPMAX,MED da região de interesse, foi realizado inicialmente o levantamento das estações disponibilizadas no Hidroweb (ANA, 2025). Dentre elas estão as estações Cachoeira do Campo, Vargem do Tejuca, Pico do Itabirito, Fazenda água limpa jusante. Desse conjunto, apenas a Fazenda Água Limpa jusante possui dados de 1984 até 2024 e por esse motivo foi selecionada para a análise. A Figura 14, apresenta os valores de chuva acumulada diária da estação Fazenda Água Limpa Jusante (código ANA 2043056). foi utilizada a série histórica completa que se inicia em 1984 e vai até 2024, utilizando apenas os dados consistidos do banco.

Figura 14- Chuva acumulada diária histórica da estação Fazenda Água Limpa Jusante (2043056)

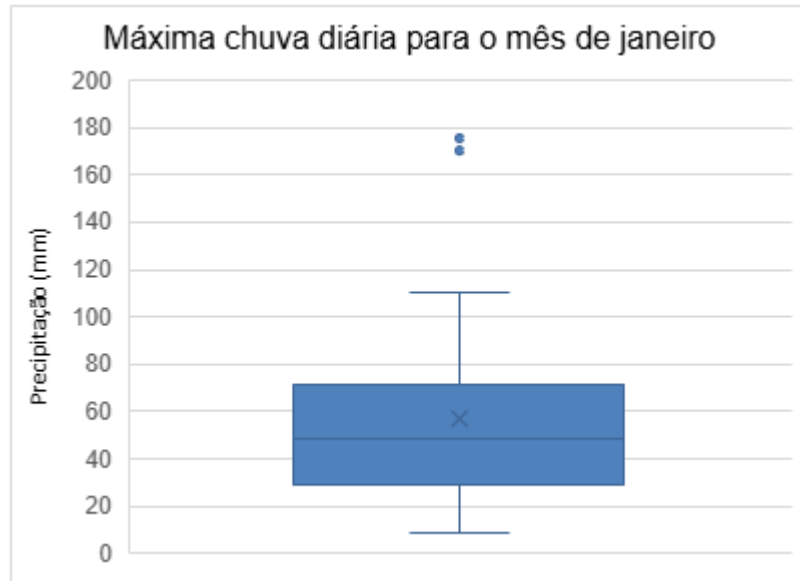


Fonte – Adaptado de ANA (2025)

Ao observar a Figura 14, verificamos que o valor de 20mm é bastante recorrente para a região. Dessa forma estabeleceu-se um ajuste nesse indicador para que o valor analisado seja um valor de referência consistente para a região. Assim, optou-se por definir o valor a partir da média das máximas do mês mais chuvoso do histórico, baseado na premissa de que a população está menos preparada para chuvas menos frequentes.

A partir dos dados históricos, foi constatado que o mês mais chuvoso para a região é janeiro e a mediana dos valores máximos registrados para janeiro é de 48,5mm, valor adotado para análise, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15- Boxplot com a distribuição dos máximos valores diários registrados para o mês mais chuvoso do histórico



Fonte - Autor (2025)

Após a definição do valor de chuva acumulada, foi realizada a análise do banco de dados para definir a média de dias por ano que apresentam valores superiores a esse valor. O resultado está exibido na Figura 16. Ao analisar as estatísticas descritivas do indicador, observa-se que a média de dias por ano com chuvas acumuladas superiores a 48,5mm está em torno de 3 dias e, dessa forma, esse será o valor adotado.

Figura 16- Número de dias por ano com precipitação diária superior a 45 mm ao longo do período histórico analisado



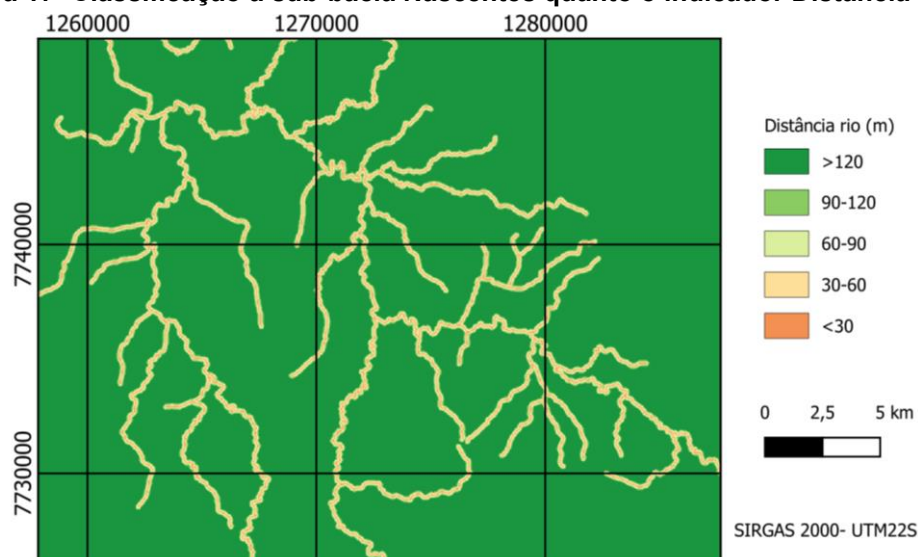
Fonte - Autor (2025)

Em função da escassez de estações fluviométricas com histórico suficiente para este trabalho, foi adotada apenas 1 estação para toda a região da bacia, logo ela será identificada pelo mesmo valor, que, de acordo com a reclassificação estabelecida na seção 6.1, é moderado.

A análise da intensidade de precipitação foi realizada utilizando a equação IDF (Intensidade-Duração-Frequência) referente à cidade de Ouro Preto, cujos dados foram disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2014). Para essa avaliação, considerou-se o tempo de concentração da bacia, calculado pela fórmula de Kirpich modificada, adequada para grandes bacias. O resultado desse cálculo indicou um tempo de concentração aproximado de 35 minutos. Com base nesse tempo de concentração e adotando-se um período de retorno (TR) de 50 anos, obteve-se o valor de intensidade de precipitação igual a 87,1 mm/h. De acordo com a reclassificação proposta no presente estudo, esse valor é classificado como moderado.

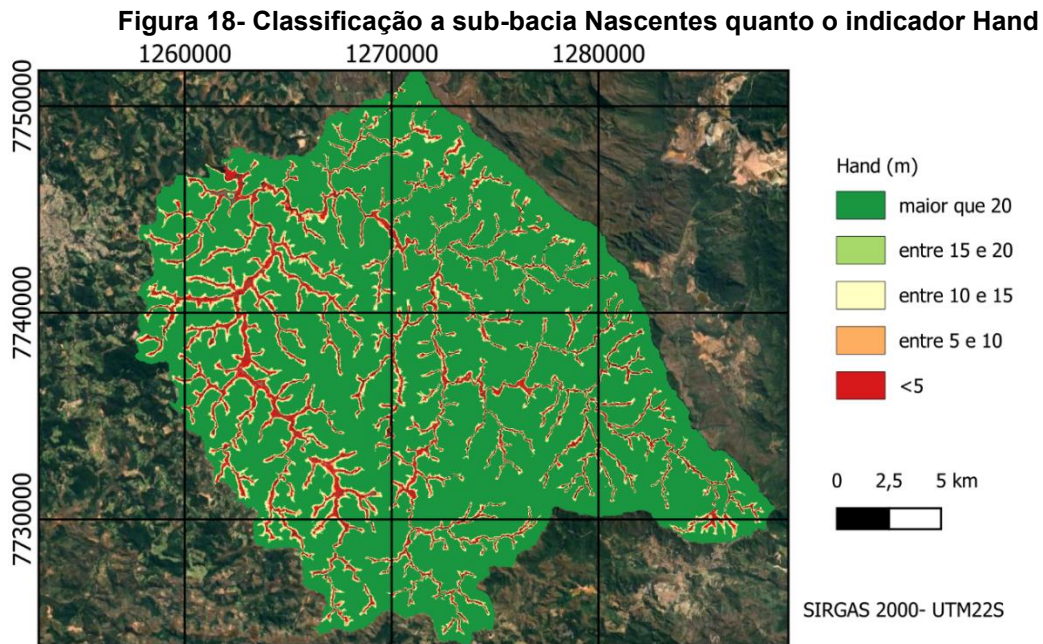
Para o critério Hidráulico/Hidrológico, inicialmente, foi realizado um teste usando o indicador de distância do rio, em que foram criadas 5 áreas de influência de 30 metros cada ao redor da rede hidrográfica fornecida pela ANA. Em seguida, foi realizada a reclassificação de cada faixa de distância conforme a seção 6.1. A Figura 17 apresenta a rede hidrográfica completa da sub-bacia com a sua classificação.

Figura 17- Classificação a sub-bacia Nascentes quanto o indicador Distância do rio



Fonte - Autor (2025)

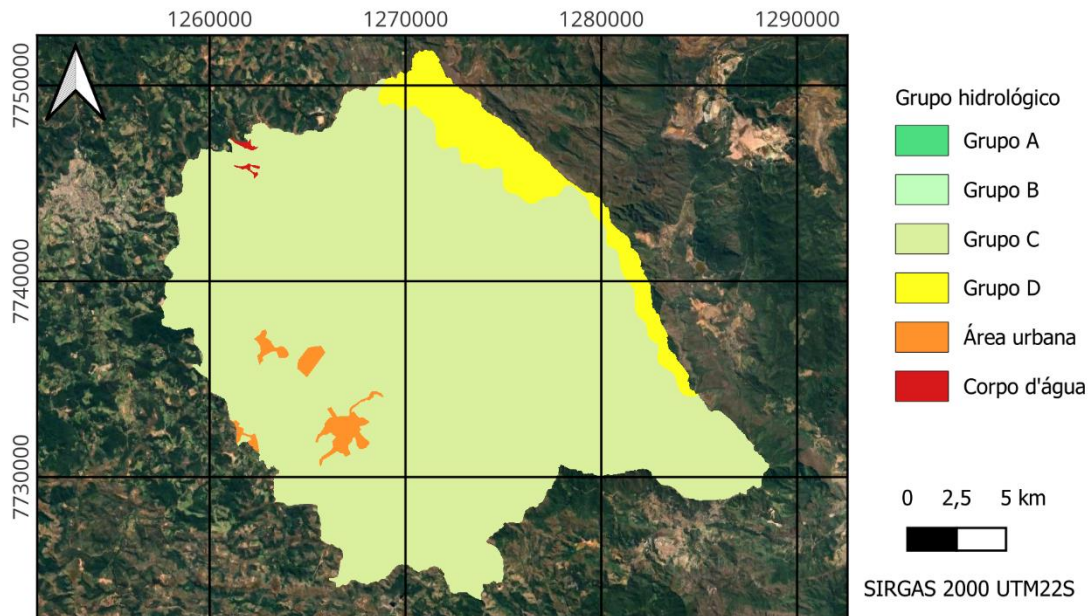
Em um segundo momento foi testada a performance do indicador Hand, calculado a partir do processamento do MDE pela ferramenta Hand Model (Nobre et al., 2011), seguido de reclassificação, também conforme a seção 6.1. Os resultados, apresentados na Figura 18, mostraram performance superior ao indicador distância do rio ao identificar mais precisamente áreas suscetíveis a inundação.



Fonte – Autor (2025)

A classificação do tipo de solo da sub-bacia estudada quanto ao grupo hidrológico foi realizada a partir de informações obtidas no mapa pedológico do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), na escala 1:250.000. Com esse mapa, foram identificadas as diferentes classes de solo presentes na região, conforme ilustra a Figura 19. Observou-se predominância do grupo hidrológico C, caracterizado por favorecer o escoamento superficial, além da presença de áreas com afloramento rochoso (grupo D) e áreas urbanas. Todas as classes mapeadas apresentam valores classificados entre moderado e muito alto, conforme descrito na seção 6.1.

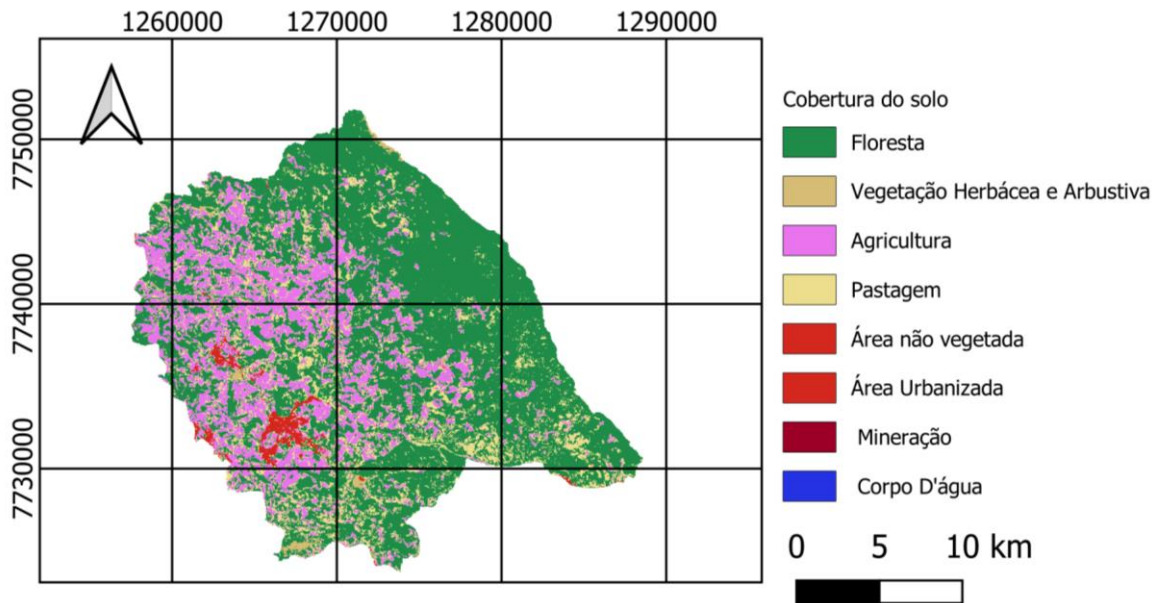
Figura 19- Classificação do solo da sub- bacia Nascentes quanto o indicador Grupo Hidrológico



Fonte - Adaptado de IBGE (2023)

A cobertura do solo foi obtida a partir dos dados do MapBiomas. De modo geral, observa-se uma predominância de áreas florestais e de atividades agrícolas, além da identificação de três regiões com maior ocupação urbana. O mapa foi classificado conforme os critérios estabelecidos na seção 6.1. A Figura 20 apresenta as classes identificadas na sub-bacia.

Figura 20- Classificação da sub-bacia Nascentes quanto o indicador Cobertura do solo



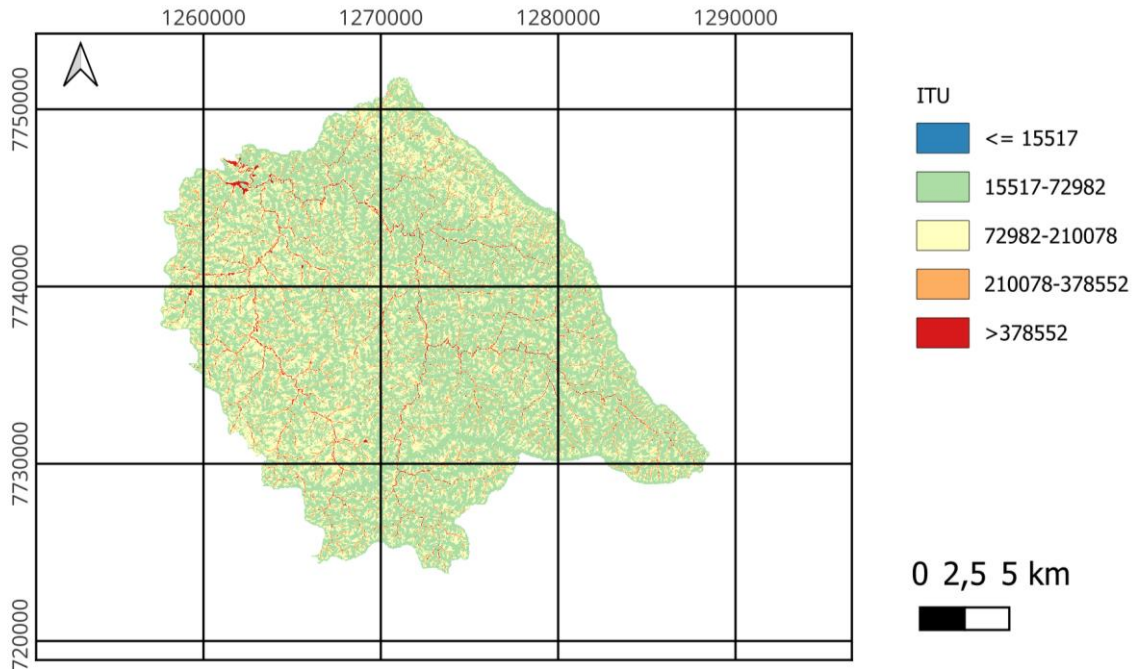
Fonte – Adaptado de MapBiomias (2021)

Os dados topográficos foram gerados com o geoprocessamento do MDE. Para a obtenção das informações necessárias, foi usada a ferramenta SIG Qgis, especificamente o comando `r. watershed`, que calcula parâmetros hidrológicos como o fluxo acumulado e o índice topográfico de umidade. Foi realizada a reclassificação desses dados utilizando 5 classes criadas, também na ferramenta Qgis, pelo método Natural Breaks, conforme explicitado na seção 6.1. Os mapas gerados podem ser observados nas Figuras 21 e 22.

O Fluxo acumulado representou bem o aumento do volume de vazão na rede hidrográfica, cujos valores crescem à medida que se aproxima da jusante da bacia, o que é consistente com a sua definição. Já o ITU apresentou de forma coerente os locais onde a água tende a se acumular, apresentando maiores valores com as planícies de inundação, e valores mais baixos nas áreas mais elevadas.

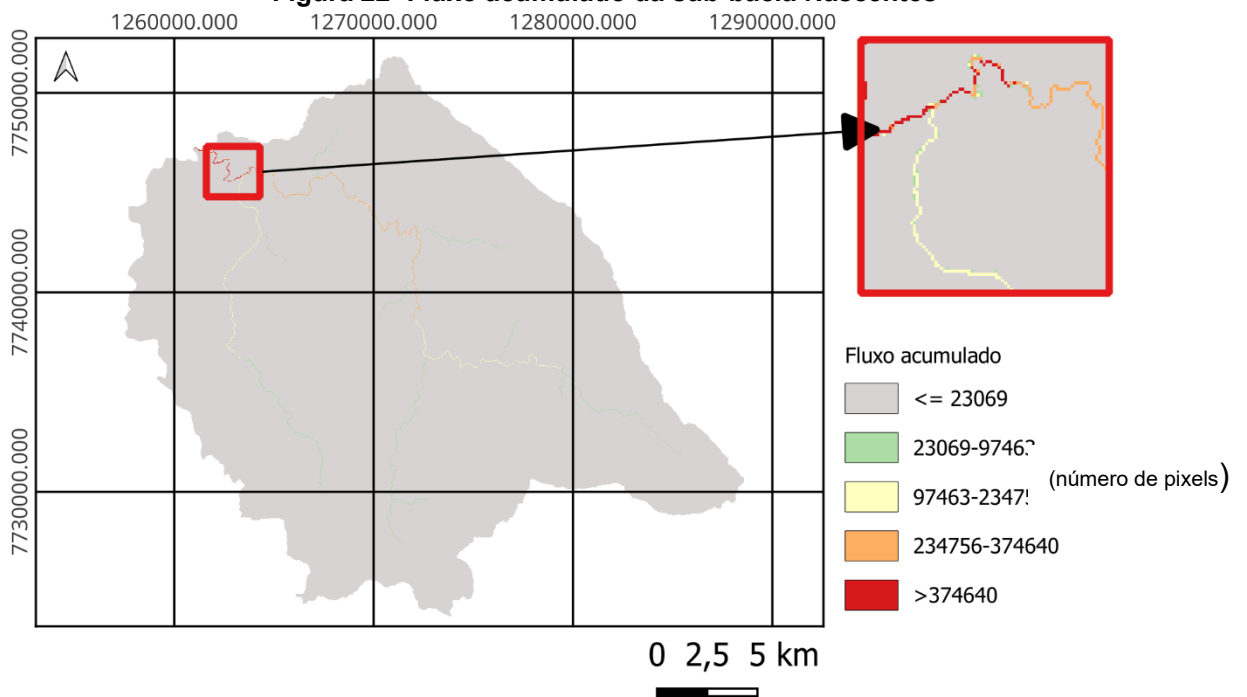
Por fim, a sub-bacia Nascentes não possui reservatórios a montante que possam atenuar às cheias, logo o indicador estruturas de controle de enchentes possui peso 0, ou seja, não há quaisquer atenuações de eventos de inundação.

Figura 21- Índice topográfico de umidade da sub-bacia Nascentes



Fonte – Autor (2025)

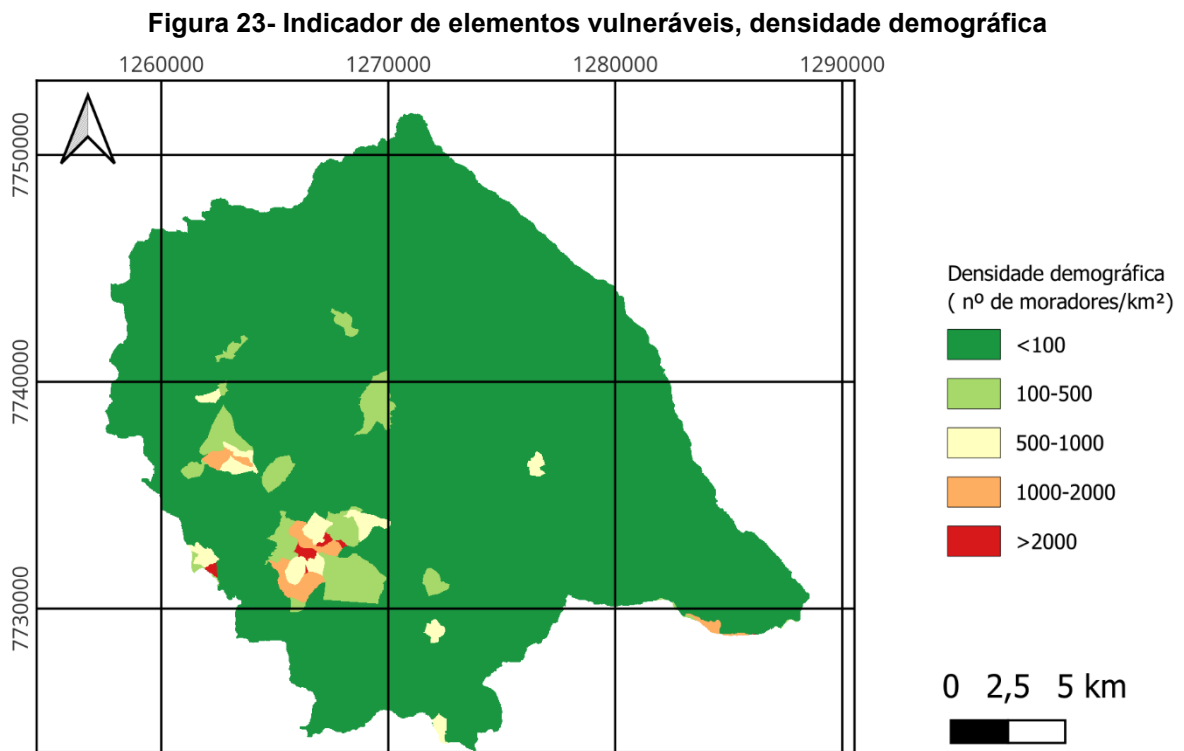
Figura 22- Fluxo acumulado da sub-bacia Nascentes



Fonte- Autor (2025)

7.2.2 Indicadores de Exposição

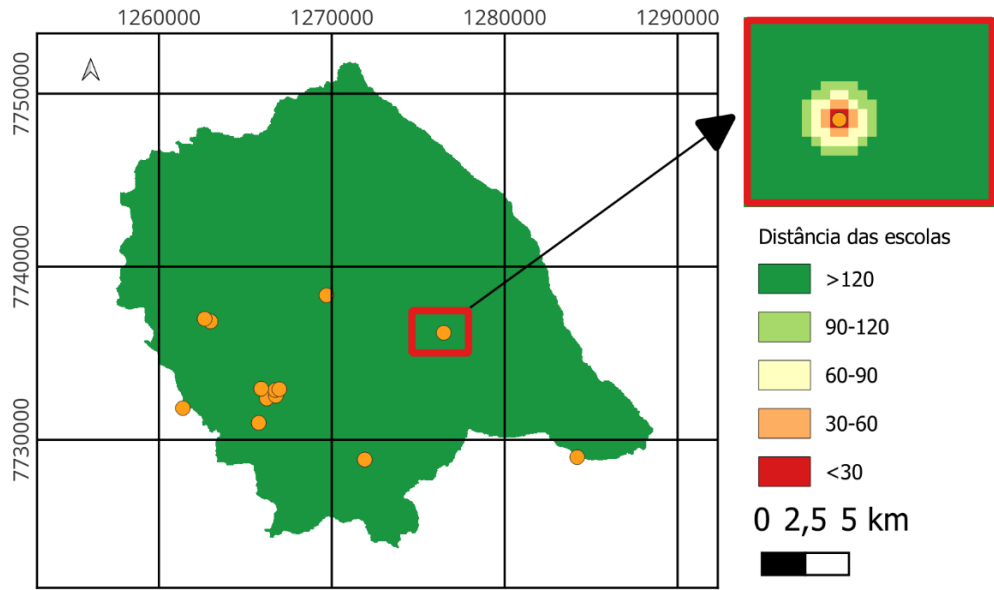
O número de habitantes do setor censitário foi determinado para a região com base nos dados do Censo 2022, assim como a respectiva área do setor (IBGE, 2023). Com esses dados, calculou-se a densidade demográfica, que foi classificada conforme o critério estabelecido na seção 6.1. Os resultados indicam que a sub-bacia Nascentes apresenta, predominantemente, baixa densidade populacional, sendo as maiores concentrações registradas nos distritos de Cachoeira do Campo e Amarantina, conforme ilustrado na Figura 23. Conseqüentemente, o indicador revela valores elevados apenas em áreas restritas.



Fonte - Adaptado de Censo (2010)

Entre os elementos vulneráveis considerados, destaca-se a proximidade de escolas e hospitais. Como não há hospitais na sub-bacia Nascentes, esse indicador foi excluído da análise. Para as escolas, utilizou-se um mapa fornecido pelo INEP, que identificou 13 instituições de ensino, predominantemente situadas em áreas urbanas, sendo apenas uma localizada em área rural. Foram estabelecidas cinco zonas de influência ao redor de cada escola, conforme ilustrado na Figura 24. A classificação dessas áreas seguiu os critérios apresentados na Seção 6.1.

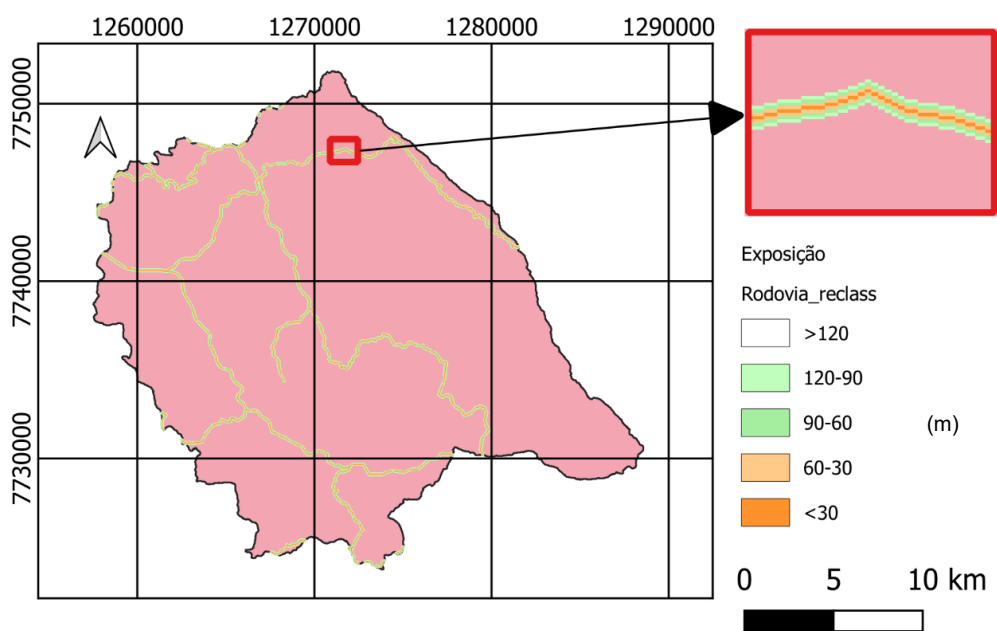
Figura 24- Indicador de elementos vulneráveis - Escolas na sub-bacia Nascentes



Fonte - Autor (2025)

Para a análise do indicador de infraestrutura rodoviária, avaliou-se a proximidade às rodovias MG-440, BR-356 e outras vias permanentes reconhecidas pelo IBGE, porém não denominadas, presentes na região da sub-bacia. A classificação foi realizada conforme descrito na Seção 6.1, e os resultados obtidos encontram-se apresentados na Figura 25.

Figura 25- Indicador de elementos vulneráveis Infraestrutura rodoviária



Fonte – Autor (2025)

Para a análise de macrodrenagem, foram consideradas informações provenientes das áreas urbanas das cidades de Ouro Preto e Itabirito. A Tabela 7 apresenta os elementos de macrodrenagem, suas extensões em quilômetros e as respectivas áreas urbanas em km². A densidade de infraestrutura de macrodrenagem foi calculada pela razão entre a extensão total dos elementos de macrodrenagem e a área da bacia, resultando em 0,74 km/km² para Itabirito e 0,02 km/km² para Ouro Preto. De acordo com a classificação adotada, esses valores correspondem a níveis classificados como moderado e baixo, respectivamente.

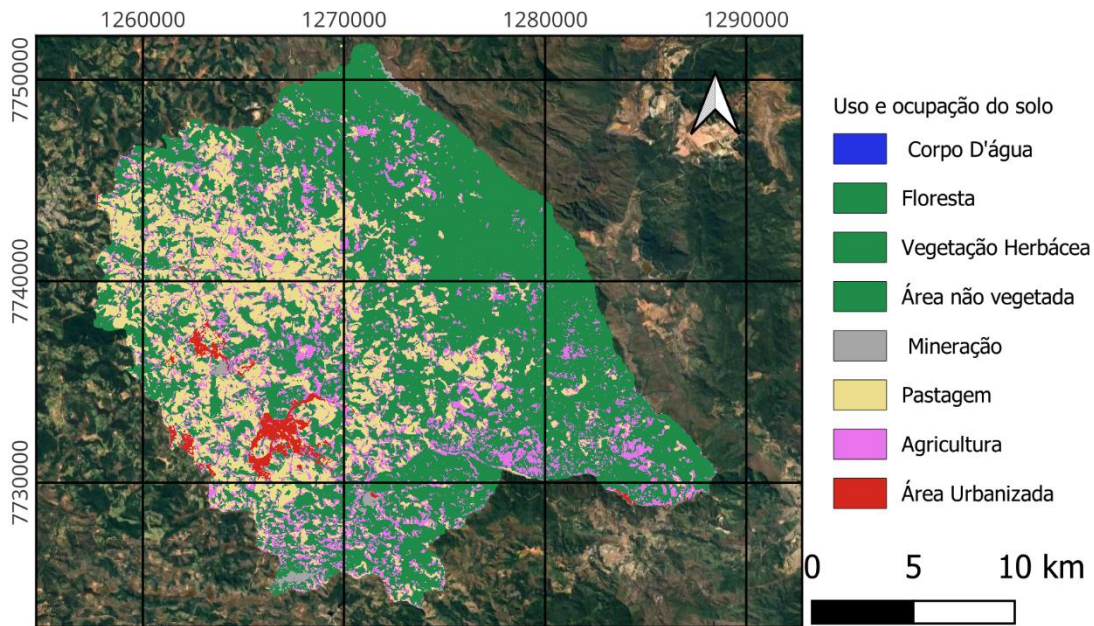
Tabela 7- Resumo dos elementos de macrodrenagem

Elemento	Itabirito	Ouro Preto
Área urbana total, incluindo áreas urbanas isoladas (km ²)	50	700,18
Total dos cursos d'água naturais perenes (km)	36	11
Total dos cursos d'água naturais perenes canalizados abertos (km)	0,01	1,5
Total dos cursos d'água naturais perenes canalizados fechados (Km)	0,9	0,9

Fonte – Adaptado de SNIS (2024)

Por fim, para o uso e ocupação do solo, foi usado o mapeamento do MapBiomas e a classificação apresentada na seção 6.1 em que o valor do indicador aumentou conforme a importância relativa do tipo de uso solo na região, assim foi considerado maior exposição a ocupação urbana seguida por atividades econômicas. O resultado pode ser observado na Figura 26.

Figura 26- Uso e ocupação da sub-bacia Nascentes

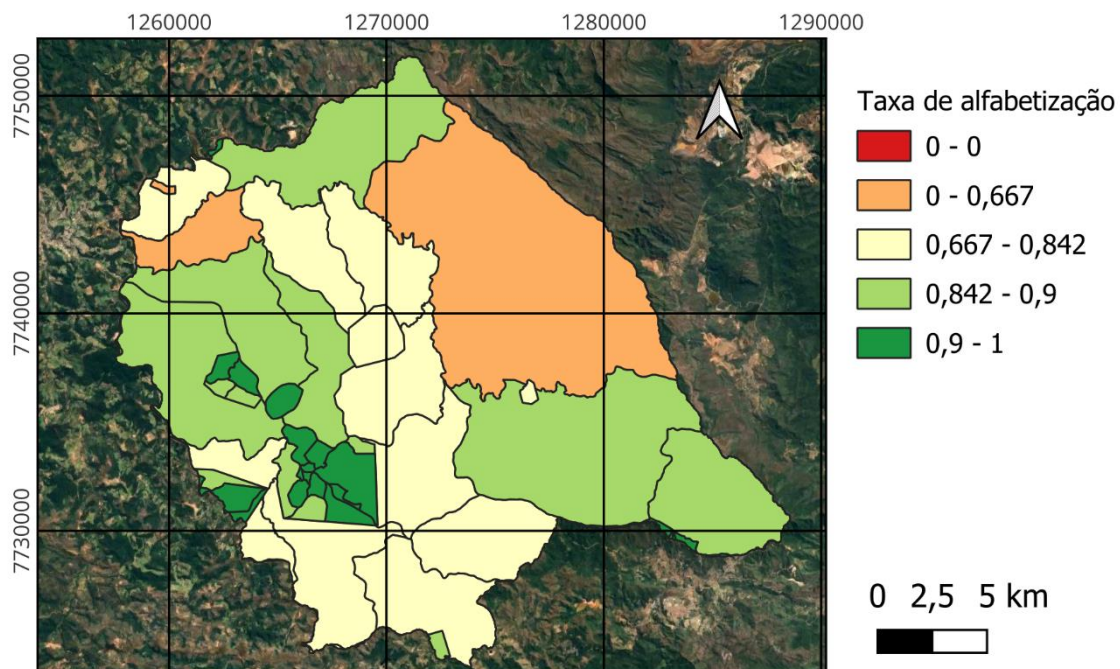


Fonte – Adaptado de MapBiomias (2021)

7.2.3 Indicadores de Vulnerabilidade

Os indicadores de vulnerabilidade foram obtidos a partir do processamento das informações do Censo 2010 e estão discretizados por setor censitário. Dentre os indicadores utilizados, a taxa de responsáveis não alfabetização, a taxa de população com menos de 5 anos ou mais de 70 anos e a falta de acesso aos serviços de água, esgoto e coleta de lixo não necessitaram de reclassificação, uma vez que já se apresentam como taxas, ou seja, valores unitários. Apenas a faixa de renda precisou ser classificada conforme estabelecido na seção 6.1.

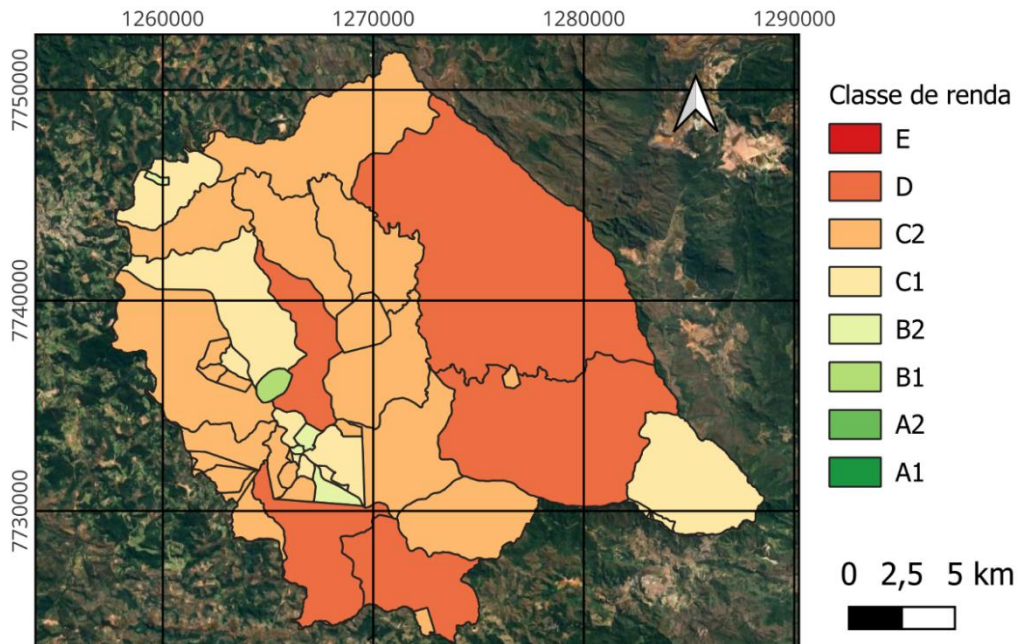
A análise realizada indica que as regiões com maior urbanização apresentam taxas de alfabetização superiores a 90% entre os responsáveis pelos domicílios. Esse fator está associado a resiliência das comunidades, pois amplia o acesso ao emprego, aspecto fundamental para o processo de recuperação pós-desastre. Observa-se que, embora a Figura 27 se refira à alfabetização, o modelo utiliza a taxa de responsáveis não alfabetizados. Este valor é obtido pelo inverso da alfabetização ($1 - \text{taxa de alfabetizados}$), permitindo que o indicador reflita diretamente o aumento da vulnerabilidade. Figura 27- Taxa de alfabetização



Fonte – Adaptado do Censo (2010)

Por outro lado, a sub-bacia é predominantemente composta por população das classes D e C, com apenas três setores censitários pertencendo à classe B, como pode ser observado na Figura 28. Isso indica que a maior parte da população da região apresenta uma renda mais baixa. A limitação de recursos financeiros dificulta a recuperação da comunidade após desastres naturais, e dessa forma, a torna menos resiliente.

Figura 28- Classe de renda por setor censitário na sub-bacia Nascentes

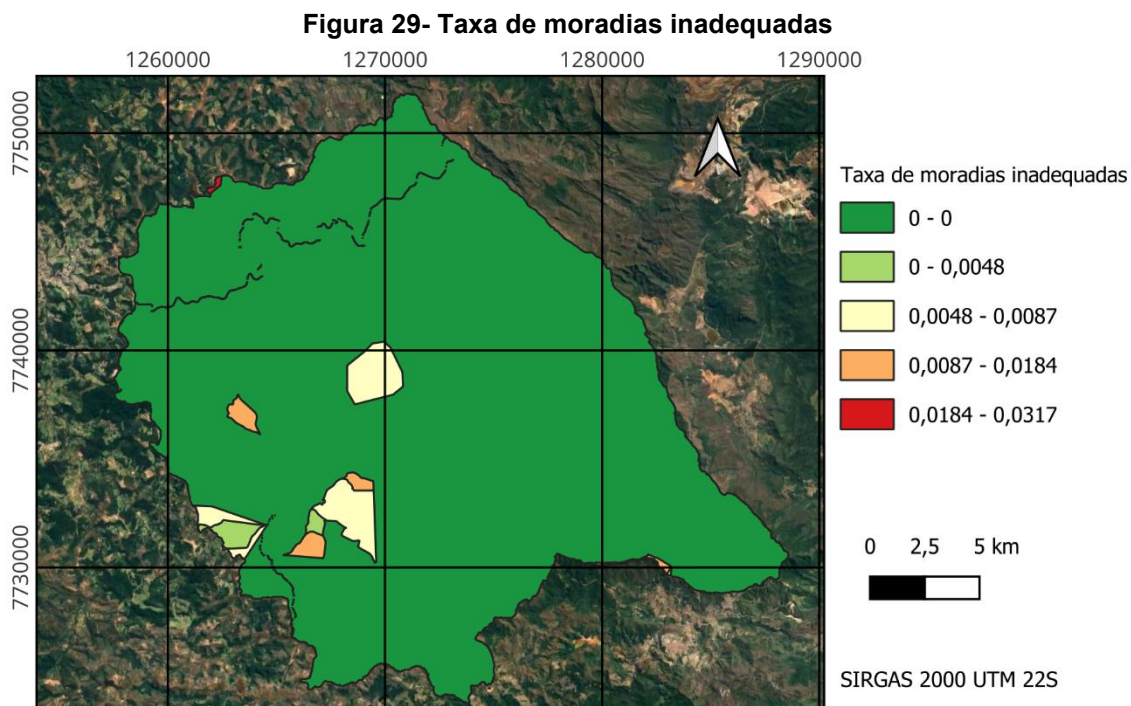


Fonte – Autor (2025)

Com relação aos indicadores associados a suscetibilidade, a taxa de moradias inadequadas, a taxa de moradores com mais de 70 anos ou menos de 5 anos e taxa de moradias sem acesso a serviços de saneamento básico, esses também foram obtidos a partir dos dados do Censo 2010.

A informação sobre a taxa de moradias inadequadas foi baseada na definição estabelecida pelo Censo de 2010, que considera aspectos como densidade de ocupação e acesso a serviços básicos de saneamento. Essa definição não aborda diretamente a qualidade dos materiais utilizados ou a segurança estrutural das edificações, fatores considerados relevantes para este estudo. Para complementar os dados, realizou-se uma validação cruzada utilizando informações obtidas por meio de imagens de satélite da região.

Observou-se que a taxa de moradias inadequadas nesta UTE é baixa, conforme ilustrado na Figura 29. Esta constatação também pode ser verificada com o uso de imagens do Google Street View, conforme exemplificado na Figura 30, onde se observa que as residências da região são predominantemente construídas em alvenaria e rebocadas, características que as tornam menos vulneráveis a danos associados a inundações.



Fonte – Autor (2025)

Figura 30- Imagem do google de comunidade em Cachoeira do Campo distrito de Ouro Preto

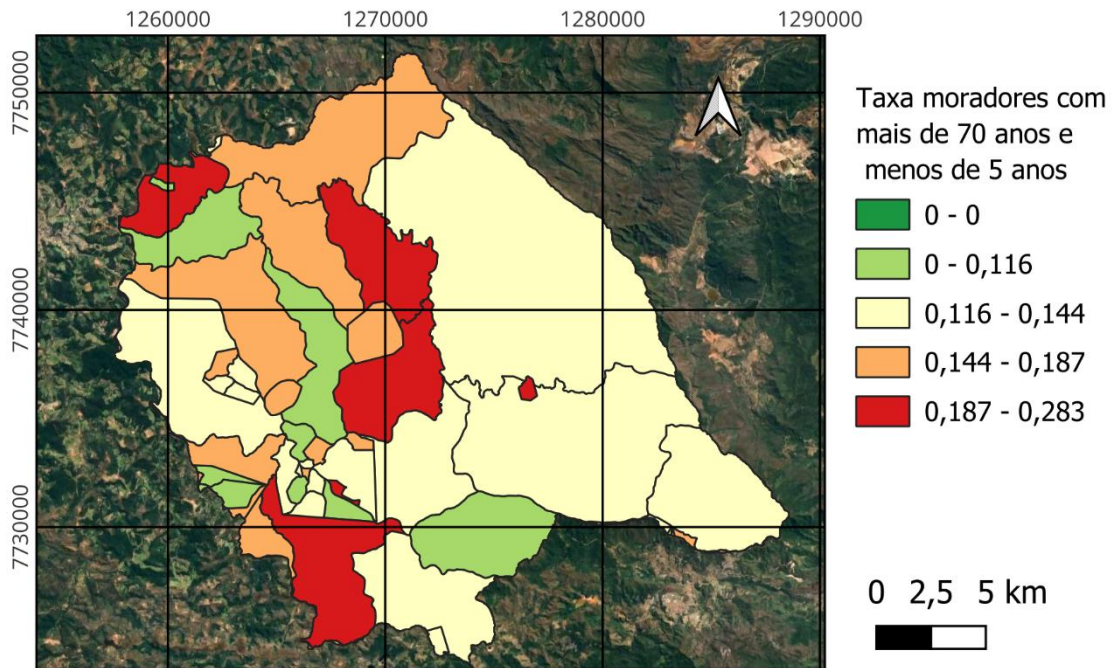


Fonte - Google street view (2025)

A sub-bacia apresenta baixas taxas de moradores com mais de 70 anos ou menos de 5 anos, como mostra a Figura 31. Mesmo nos locais com maior ocorrência, menos de 30% da população se enquadra nessas faixas etárias. Vale ressaltar que esse

indicador é variável, pois a idade da população muda com o tempo. Portanto, embora útil para análises de curto prazo, recomenda-se acompanhar esses dados ao longo dos anos para orientar o planejamento de longo prazo.

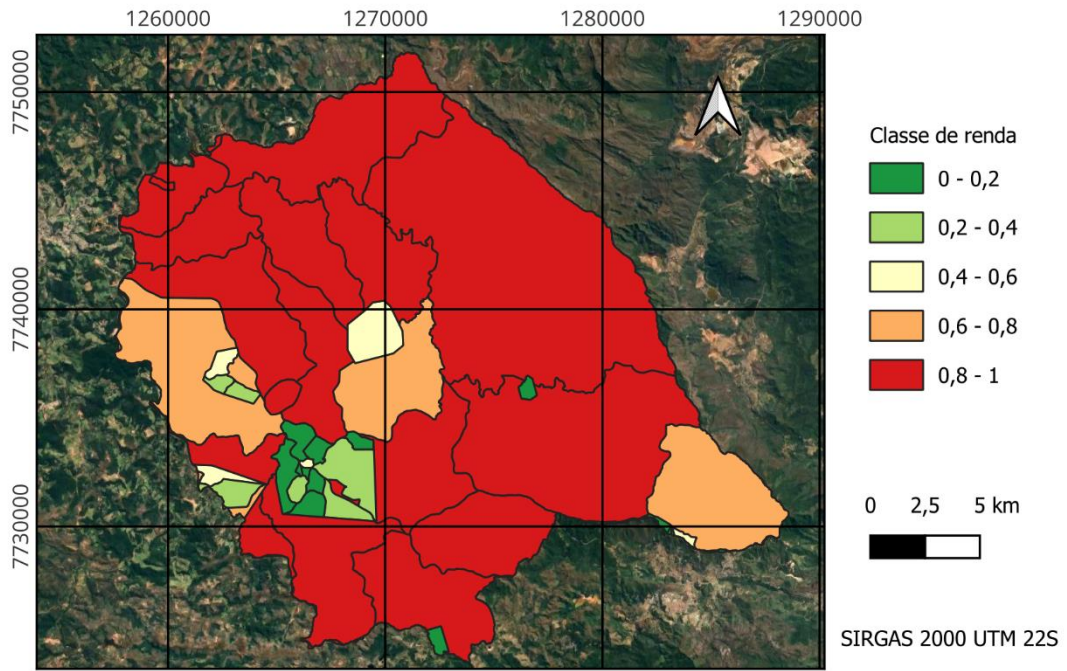
Figura 31- Taxa de moradores com mais de 70 anos ou menos de 5 anos.



Fonte – Adaptado do Censo (2010)

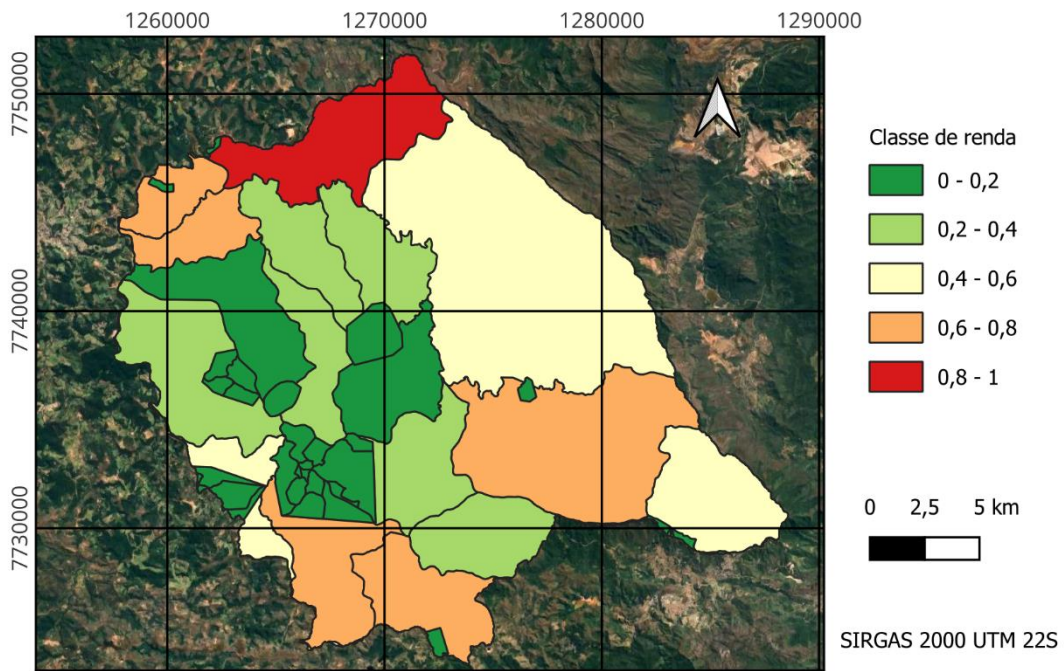
Por fim, a análise dos indicadores relacionados a saneamento básico está apresentada nas Figuras 32, 33 e 34 e aponta que regiões menos urbanizadas possuem taxas de acesso a esses serviços com valores baixos o que torna a população mais vulnerável segundo o indicador, no entanto, para essas regiões podem ser usados outros meios de abastecimento, esgotamento ou destinação do lixo que não estão contemplados nas informações fornecidas pelo Censo. Dessa forma, é necessário que esses indicadores sejam melhor analisados para áreas rurais, avaliando se de fato eles conseguem trazer a informação de vulnerabilidade desejada.

Figura 32- Taxa de domicílios sem acesso a esgotamento sanitário

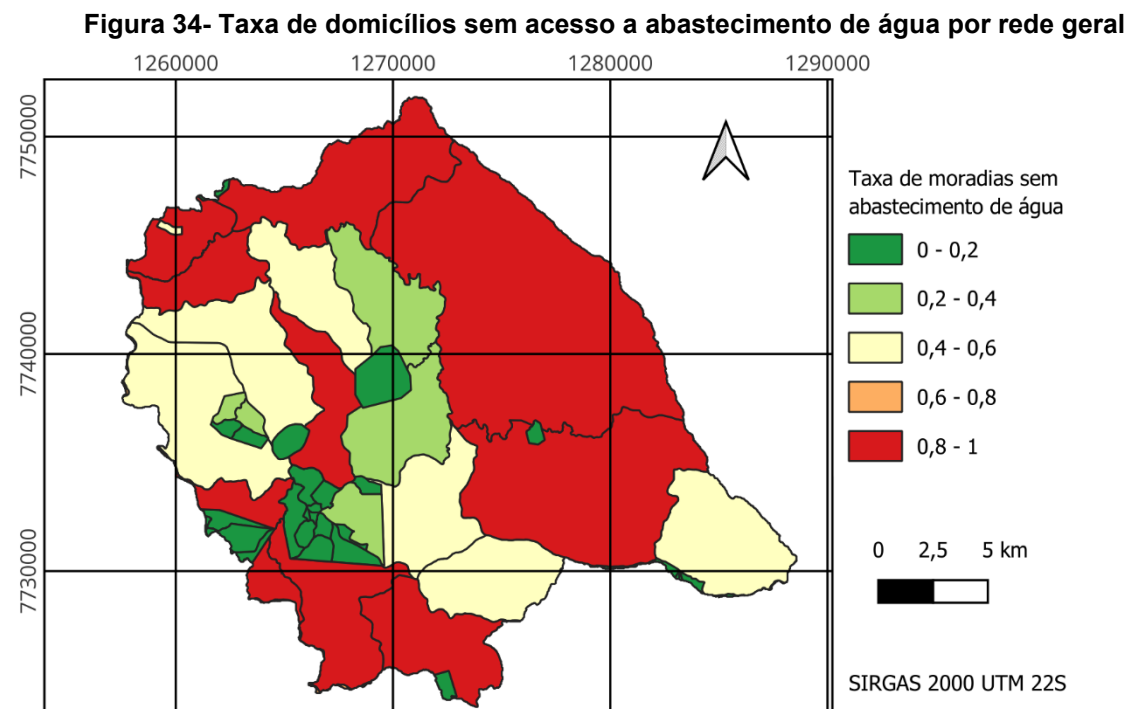


Fonte – Adaptado do Censo(2010)

Figura 33- Taxa de domicílios sem acesso a coleta de lixo



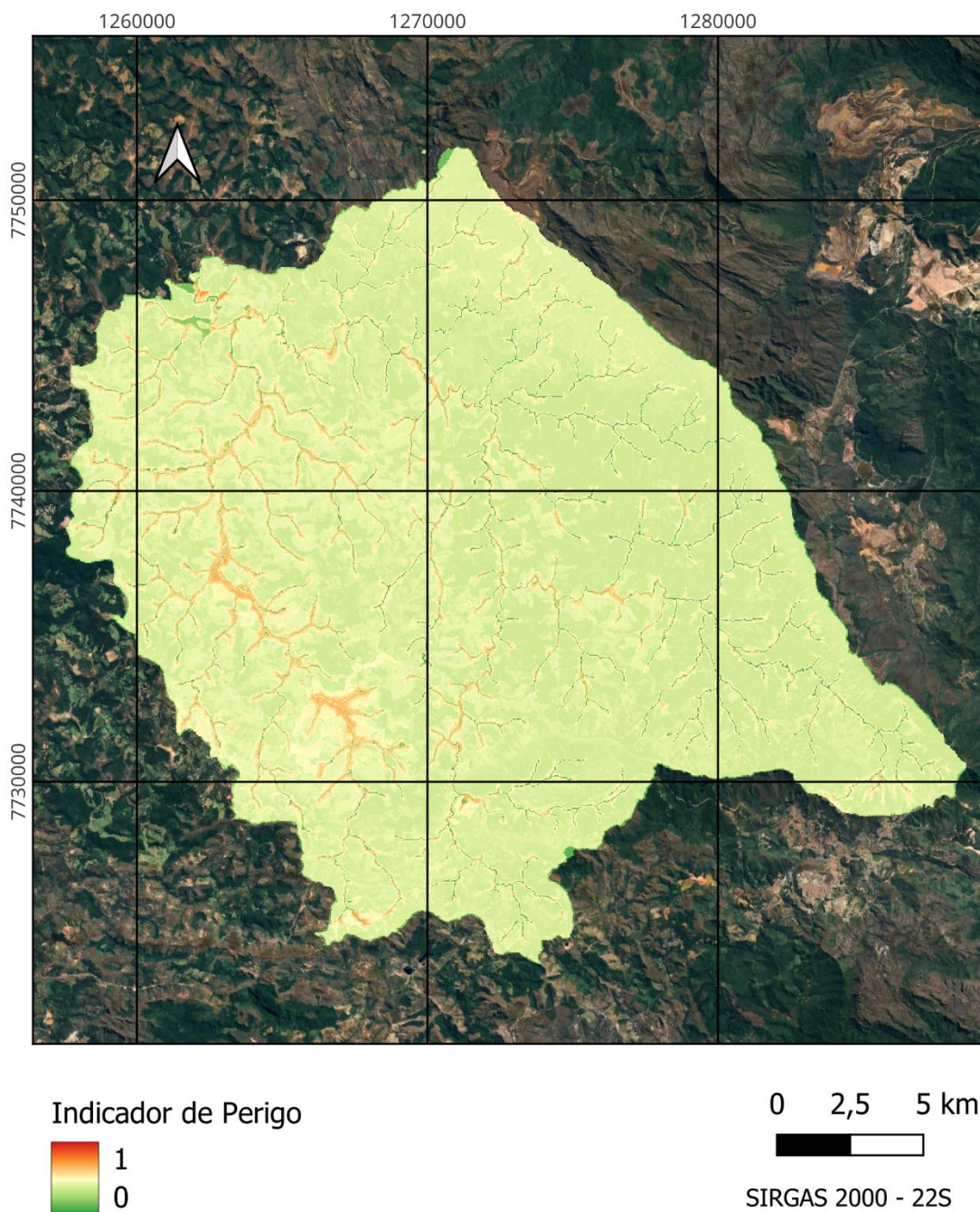
Fonte : Adaptado do Censo (2010)



Fonte - Autor (2025)

7.3 Mapa de Perigo

A partir dos indicadores citados, foi realizada uma soma ponderada para gerar o mapa de perigo, apresentado na Figura 35, em que quanto mais próximo ao valor um, maior é o potencial de perigo associado àquele local.

Figura 35 Mapa de Perigo da sub-bacia Nascentes

Fonte : Autor (2025)

Em seguida, foi realizada uma comparação visual entre os resultados obtidos pelo método multicritério proposto neste estudo e o mapa temático obtido no aplicativo Prox, de acesso livre e gratuito, que corresponde ao resultado de uma simulação hidrodinâmica denominada Cheia Natural 5, no rio das Velhas, cuja vazão efluente estimada é de 656 m³/s. Para a comparação, utilizamos o único trecho coincidente

disponível na aplicação com a área de estudo, localizado a jusante da sub-bacia Nascentes, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36-Comparação dos resultados com resultados obtidos com simulação hidrodinâmica



Fonte - A) Mapa de perigo de inundação – Autor (2025) B) Mapa temático de mancha de inundação obtido no aplicativo Prox no dia 20 de março de 2025.

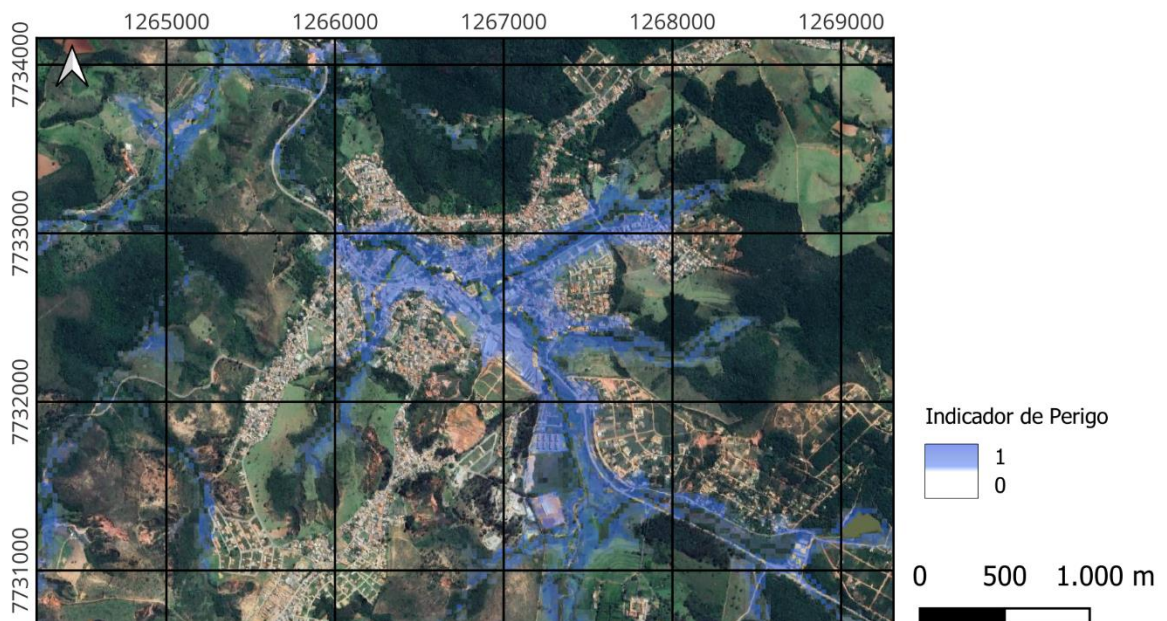
A análise desse trecho indicou uma boa coerência entre a mancha de inundação obtida por simulação hidrodinâmica e o mapa de perigo obtido pela metodologia proposta. O método multicritério conseguiu representar o formato da área com potencial de inundação, ainda que com menor precisão em relação à modelagem hidrodinâmica. Apesar dessa limitação, os resultados confirmam a consistência do método, demonstrando seu potencial para a análise preliminar do risco de inundação.

Para os indicadores de perigo, era esperado que aqueles com maior peso fossem preponderantes aos outros indicadores. No entanto, mesmo com maior peso, o PPMAX, MED e a intensidade de chuva foram irrelevantes para a escala adotada, visto que eles foram generalizados para toda a bacia. Já os indicadores ITU, fluxo acumulado e Hand, que apresentam valores elevados para áreas semelhantes, amplificam o valor de perigo para alguns pontos e dessa forma sobressaíram nos resultados do índice.

Ao analisar os resultados obtidos observa-se que a maior parte da sub-bacia tem um nível de perigo baixo e próximo aos rios esse valor tende a ser maior, variando entre moderado e, em alguns trechos, alto.

Por fim, o mapa apontou três áreas em que há maior perigo, sendo elas em Cachoeira do Campo, outra em Amarantina e a montante do reservatório de Rio de Pedras. O trecho urbano com valores mais elevados está no distrito de Cachoeira do Campo que pode ser observado na Figura 37, que é, de fato, um distrito com histórico de inundações.

Figura 37-Mapa de perigo do Distrito de Cachoeira do Campo



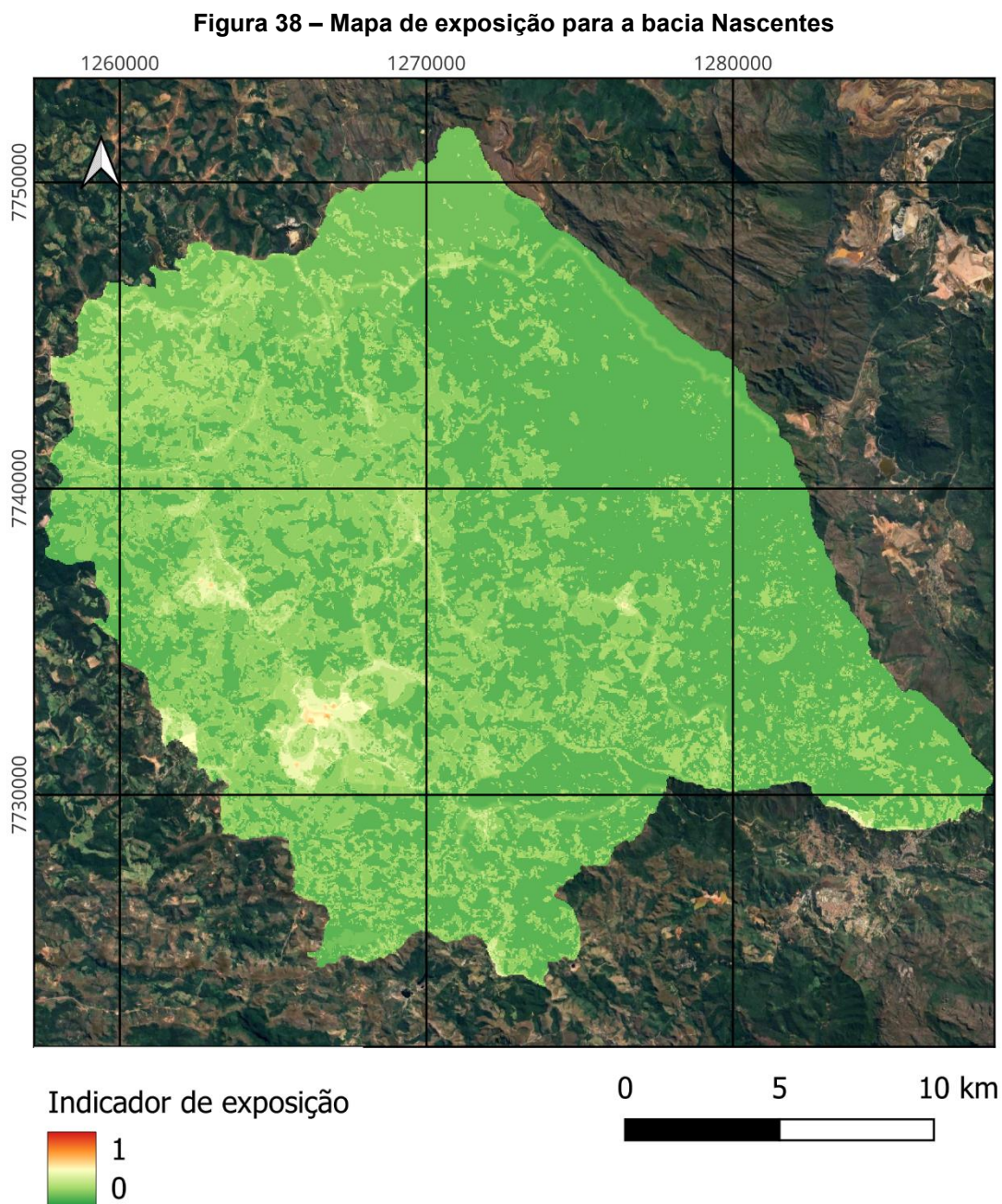
Fonte – Autor (2025)

7.4 Mapa de Exposição

O Mapa de exposição obtido representou a quantidade e os tipos de elementos expostos ao perigo, como infraestrutura, população e ativos econômicos e está representado na Figura 38, em que o indicador de exposição varia de 0 até 1 e quanto mais próximo de 1 maior é o grau de exposição associado. De forma geral, foram observados valores baixos na maior parte da sub-bacia, exceto em áreas urbanizadas, próximas as estradas e escolas onde obteve-se valores mais elevados de exposição, o que era um comportamento esperado visto os resultados de ponderação de seus indicadores.

Além disso, há uma leve diferença entre as cidades de Itabirito e Ouro Preto que está associada a informação de macrodrenagem, que foi obtida apenas por cidade, condição que piora a análise entre comunidades dentro da sub-bacia.

Podemos observar também, que há uma coincidência entre as regiões com os maiores índices de perigo e exposição, elas estão concentrados no distrito de Cachoeira do Campo, o que pode já indicar a necessidade de medidas preventivas.



Fonte: Autor (2025)

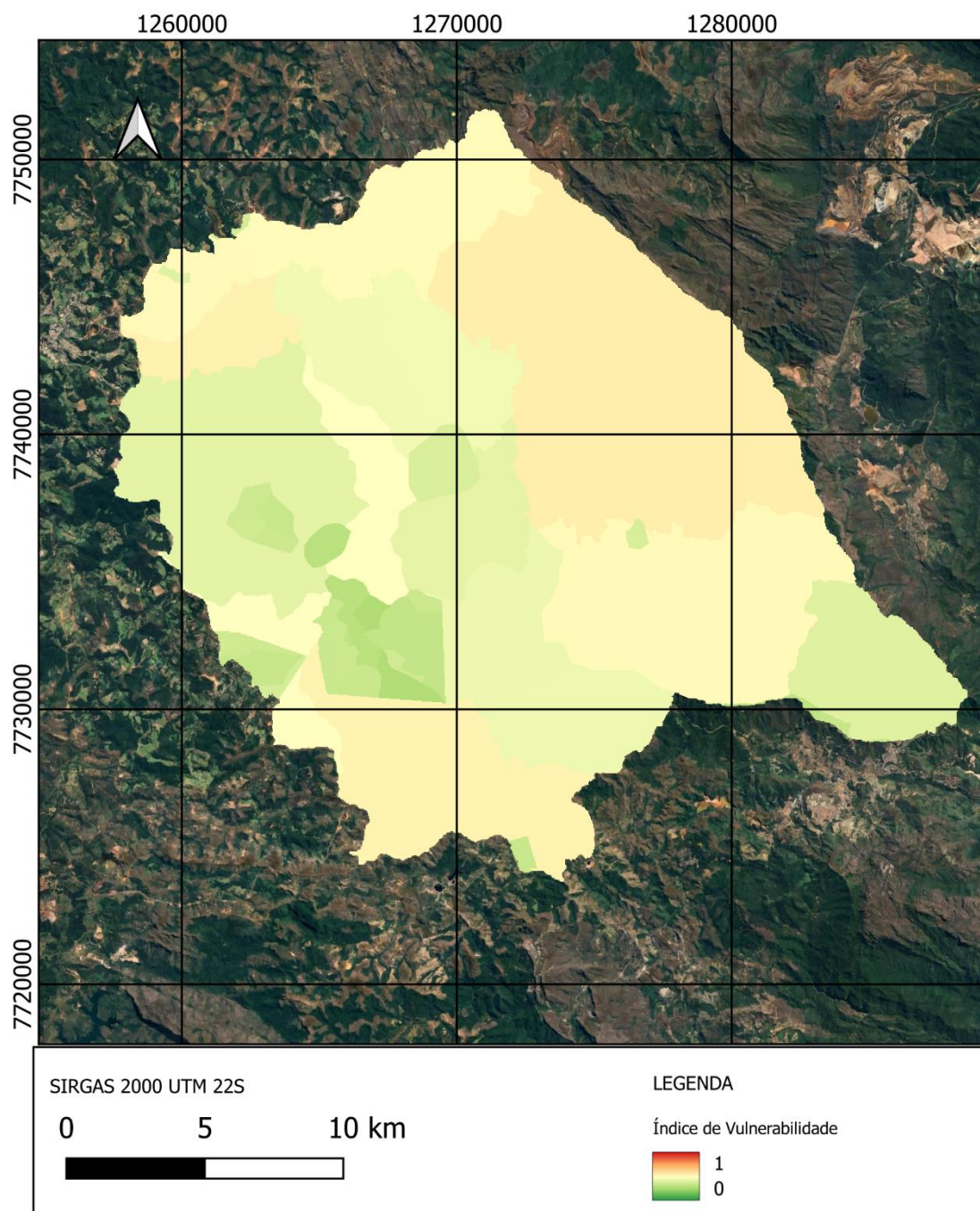
7.5 Mapa de Vulnerabilidade

Para a formação do índice de vulnerabilidade foram usados valores do Censo 2010, visto que ainda não estavam disponíveis dados do Censo 2022. O mapa de

vulnerabilidade possui valores que variam entre 0 e 1 e quanto mais próximo a 1 maior a vulnerabilidade.

Para a sub-bacia Nascentes, Figura 39, o mapa apresentou resultados que oscilam entre baixo e médio, indicando que a bacia de forma geral não possui um nível de fragilidade socio-econômica acentuada. O que é consistente com o IDHM de 2010 das cidades de Ouro Preto e Itabirito que corresponde a 0,741 e 0,730 respectivamente.

Além disso, foram observados valores de vulnerabilidade menores próximo aos centros urbanos, o que corrobora com a necessidade de se realizar uma análise mais aprofundada avaliando quais indicadores são relevantes para áreas rurais e urbanas e se os indicadores propostos são suficientes.

Figura 39- Mapa de vulnerabilidade da sub-bacia Nascentes

Fonte – Autor (2025)

7.6 Mapa de Risco

O mapa de Risco foi obtido com a combinação dos mapas de Perigo, Exposição e Vulnerabilidade, realizada a partir de uma soma ponderada e pode apresentar valores que variam de 0 até 1, onde quanto mais próximo a 1 maior o risco. Foram atribuídos os mesmos pesos a cada um dos componentes do risco, ou seja, eles foram

considerados igualmente importantes pelos especialistas, o mapa resultante está apresentado na Figura 40.

O primeiro resultado obtido é um mapa de risco que possibilita a análise interna a sub-bacia. Com ele, é possível verificar que os pontos com maior risco refletem os locais com maior índice de perigo, áreas com maior densidade demográfica e proximidade de escolas. Além disso, a vulnerabilidade pode ser observada em pontos que, mesmo apresentando alta exposição e perigo, não tiveram valores de risco tão elevados quanto outros com características semelhantes. Isso indica que os resultados estão consistentes com a ponderação aplicada, e todos os componentes apresentam reflexos visíveis.

Um ponto de fragilidade pode ser observado nos resultados para as áreas rurais em que se esperava valores de risco mais baixos, visto que há baixa exposição, mas o indicador de vulnerabilidade enviesou o resultado e mapeou a área com valores de risco similares a região urbana. O que não era esperado, mas é compreendido em função da baixa assertividade da técnica para áreas rurais.

Contudo, as regiões urbanas de Cachoeira do Campo e Amarantina que apresentaram valores altos para perigo e exposição, e valores baixos para vulnerabilidade, foram mapeados como regiões em área de maior risco dentro da sub-bacia.

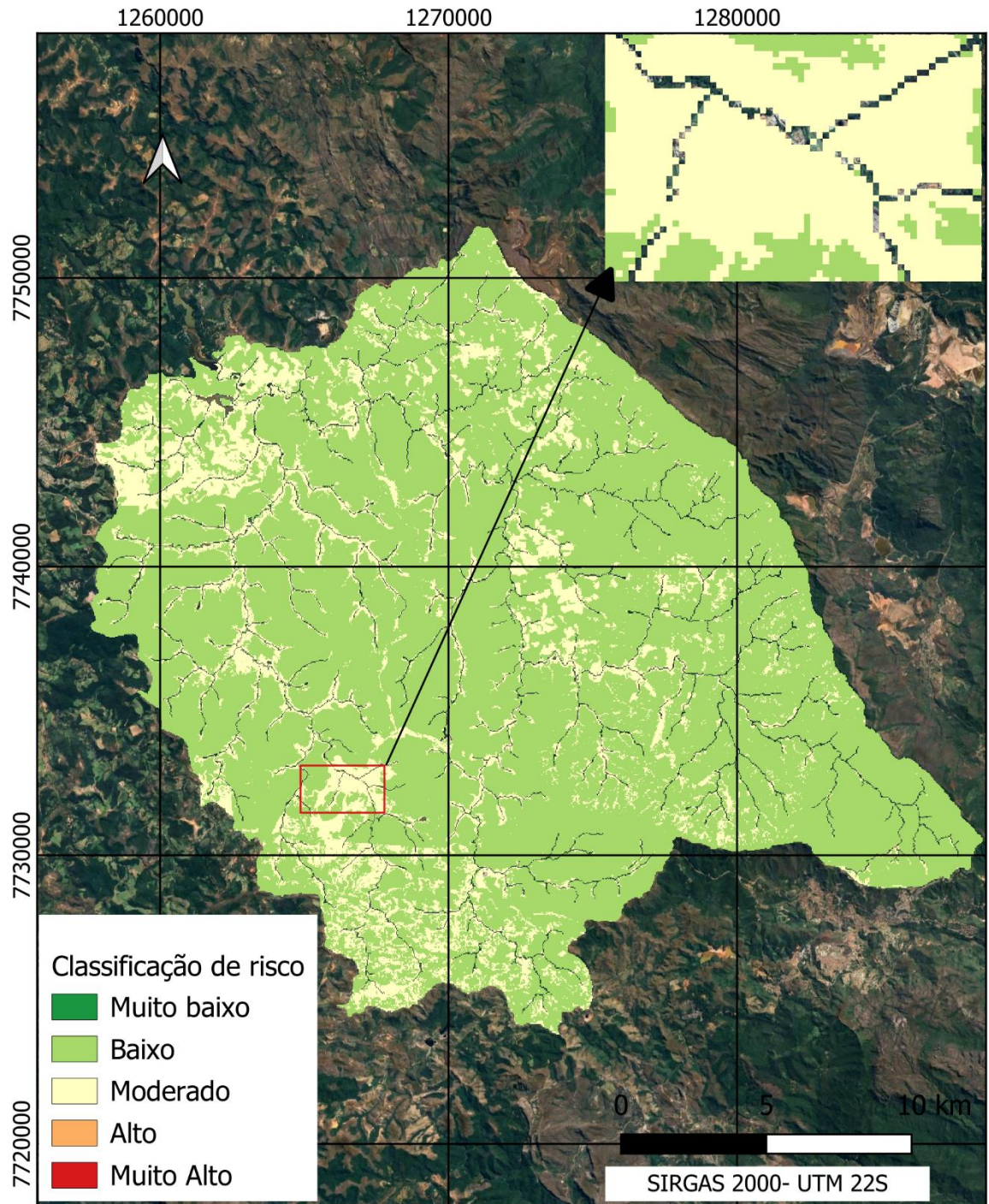
Para a validação da técnica foi utilizado o resultado do Atlas de Vulnerabilidade a inundações da ANA assim como foi realizado no trabalho de PORTELA et al. (2023). Entende-se que não se trata de uma comparação entre duas variáveis de mesma categoria, mas apenas uma análise qualitativa, visto que não há um índice de risco que aborda as dimensões de perigo, vulnerabilidade e exposição para a região estudada.

O Atlas apresenta resultados para o rio das Velhas e para o rio Maracujá que foram classificados como alta frequência e impacto baixo para o trecho do rio das Velhas na sub-bacia Nascentes e médio para o seu afluente rio Maracujá. Dessa forma a vulnerabilidade é alta para o rio Maracujá e média para esse trecho do rio das Velhas. Diante dessas informações observa-se que há uma diferenciação entre esses dois

trechos o que o método proposto não foi capaz de inferir, sendo necessário aprofundar em estudos futuros como melhorar a sensibilidade à vulnerabilidade.

Além disso, conforme mencionado anteriormente, é possível realizar uma segunda etapa de análise, que consiste na comparação entre diferentes sub-bacias a partir do valor final de risco ponderado. Esse valor é obtido por meio da razão entre a soma ponderada dos riscos por área e a soma total das áreas da sub-bacia. Com esse cálculo, obteve-se um único valor de risco para a sub-bacia Nascentes, que foi de 0,36, classificando-a como uma área de risco baixo. Ao aplicar o mesmo procedimento para outra sub-bacia, é possível obter um valor comparável, facilitando a análise e a avaliação relativa entre as diferentes sub-bacias.

Figura 40- Mapa de Risco



Fonte – Autor (2025)

8 CONCLUSÕES

Para a criação da ferramenta de análise de risco foi utilizado o conceito em que o risco é uma função do perigo, exposição e vulnerabilidade. Para a definição de cada uma dessas parcelas foram selecionados critérios e indicadores que pudessem refletir as características físicas e socioeconômicas das sub-bacias consideradas.

Para definição do nível de importância de cada indicador foram atribuídos pesos através de duas técnicas a ponderação, a saber: equitativa e a consulta a especialistas. Os especialistas participantes eram formados por um grupo experiente que trouxe informações relevantes a análise. A ferramenta foi implementada para sub-bacia Nascentes que possui histórico de inundações.

A análise dos indicadores de perigo refletiu informações relevantes sobre a sub-bacia, o PPMAX,MED apresentou um valor médio de 3 dias por ano excedendo 48,5 mm, a intensidade de precipitação para o tempo de concentração de 30 minutos foi estimada em 87,1 mm/h para um TR de 50 anos, indicando eventos de chuva significativa em períodos curtos. A proximidade dos rios foi mapeada com o uso do indicador Hand, destacando as áreas de maior suscetibilidade a inundações. Além disso, o tipo de solo predominante favorece o escoamento superficial, aumentando o perigo. Por fim, a análise topográfica mostrou que a água tende a se acumular em regiões específicas da bacia próximas as áreas de inundação.

Os resultados parciais obtidos para o índice de perigo foram satisfatórios, ao comparado aos resultados de uma mancha de inundação oriunda de uma simulação hidrodinâmica apresentou consistência e apontou as áreas de perigo conforme o esperado.

Com relação a exposição o mapeamento utilizou técnicas heterogêneas usando densidade populacional por setor censitário e mapeamento da distância de estradas e escolas. Como principais características a densidade populacional da sub-bacia é baixa, concentrando-se nos distritos de Cachoeira do Campo e Amarantina. As escolas estão majoritariamente em centros urbanos e a densidade de macrodrenagem varia entre as cidades analisadas, com Itabirito apresentando uma rede de maior

densidade do que Ouro Preto. O índice parcial de exposição foi considerado satisfatório e também apresentou resultados consistentes.

Os indicadores sociais demonstraram que a vulnerabilidade na sub-bacia é relativamente baixa, corroborada pelos índices de desenvolvimento humano das cidades analisadas. O resultado obtido para o índice de vulnerabilidade apresentou consistência na comparação com o índice IVS para a região metropolitana de Belo Horizonte, mas abriu questionamentos sobre sua eficiência em análises para áreas rurais ao apresentar resultados não esperados para a sub-bacia analisada. Dessa forma, o índice de vulnerabilidade precisa de melhorias.

A resolução dos mapas de todos os indicadores impactou significativamente a análise de risco. A adoção de diferentes resoluções resultou em perda de detalhes, fato observado na comparação entre os mapas de vulnerabilidade e de perigo. Para o indicador de perigo é viável realizar uma análise em nível local dentro de uma bacia hidrográfica, enquanto, para a vulnerabilidade, a escala de análise permanece restrita ao setor censitário.

Por fim, a sistemática de análise de risco demonstrou coerência nos resultados obtidos, apresentando uma estrutura metodológica promissora para a avaliação de perigo, exposição e vulnerabilidade. No entanto, a necessidade de refinamentos metodológicos é evidente, especialmente no que tange à adaptação do índice de vulnerabilidade para diferentes contextos regionais e à inclusão de novas variáveis que ampliem a compreensão do risco tornando a ferramenta mais robusta.

9 RECOMENDAÇÕES

A sistemática de análise de risco apresentou potencial, mas ainda carece de melhorias para que possa ser usada por gestores para a definição de políticas públicas e definição de direcionamento de recursos. Dessa forma recomenda-se melhorias na metodologia como apresentado a seguir.

Primeiramente, a classificação dos indicadores não foi avaliada para um contexto nacional, podendo variar regionalmente. Dessa forma, os valores de referência adotados para esta bacia não são unânimes, sendo necessário identificar aqueles que melhor se adequam a outras regiões do Brasil e ajustar as classes utilizadas.

Além disso, os indicadores de vulnerabilidade foram definidos com base em dados do Censo 2010. Com a disponibilização do Censo 2022, é fundamental reavaliar sua validade, considerando possíveis alterações nas informações socioeconômicas e demográficas.

O índice de vulnerabilidade possui uma grande complexidade, visto que se trata de uma análise multidisciplinar e dessa forma precisa ser refinado trazendo discussões mais profundas sobre os pesos definidos para cada indicador e a pertinência dos indicadores escolhidos baseada em sua relação com os impactos gerados pelas inundações.

Outro aspecto a ser aprimorado é a inclusão de novas variáveis no modelo, como fatores ligados à governança do risco e à capacidade de suporte comunitário que podem ser representados pela presença de defesa civil estruturada e pelo PIB do município.

Para a caracterização da exposição, seria necessário incluir outros elementos vulneráveis apontados como relevantes pelos especialistas entrevistados, tais como infraestruturas de abastecimento de energia, sistemas de comunicação, aeroportos, Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e Estações de Tratamento de Água (ETA).

Por fim, um aspecto frequentemente citado e não incorporado neste trabalho é a projeção do perigo considerando cenários de mudanças climáticas. Esse tema não foi explorado, mas representa um ponto crítico para futuras pesquisas, dada a crescente

influência das alterações climáticas sobre a frequência e a intensidade dos eventos extremos.

Dessa forma, a implementação dessas melhorias e estudo complementares tornará a sistemática mais eficaz para a gestão de riscos, permitindo seu uso na definição de políticas públicas e no direcionamento de recursos para a mitigação dos impactos das inundações.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, Mohammad Fikry; SIRAJ, Sajid; HODGETT, Richard E. An Overview of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Application in Managing Water-Related Disaster Events: Analyzing 20 Years of Literature for Flood and Drought Events. *Water* 2021, Vol. 13, Page 1358, v. 13, n. 10, p. 1358, 13 maio 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/10/1358/htm>>. Acesso em: 10 maio 2024.

AERTS, Jeroen C.J.H. Integrating agent-based approaches with flood risk models: A review and perspective. *Water Security*, v. 11, p. 100076, 1 dez. 2020. Acesso em: 10 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Atlas de Vulnerabilidade a Inundações*. Brasília: [s.n.], 2014. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em: 31 mar. 2025.

AHMED, Istak *et al.* Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric Analytical Hierarchy Process. *Geosystems and Geoenvironment*, v. 3, n. 2, p. 100250, 1 maio 2024. Acesso em: 7 maio 2024.

ALABBAD, Yazeed; YILDIRIM, Enes; DEMIR, Ibrahim. Flood mitigation data analytics and decision support framework: Iowa Middle Cedar Watershed case study. *Science of The Total Environment*, v. 814, p. 152768, 25 mar. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721078475>>. Acesso em: 15 maio 2023.

ANDRADE, E.; DANNA, L.C.; SILVA, P.C.F. Mapeamento de Perigos e Riscos de Inundação no Município de Aparecida (São Paulo). *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 35_2, n. 1, p. 28–42, 27 mar. 2013. Acesso em: 7 maio 2024.

ARAÚJO, Mélori Maria Fernandes De *et al.* Caracterização hidrológica e suscetibilidade de risco à inundação nas bacias do município de Arroio do Padre/RS. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 10, n. 1, p. 283–296, 20 jun. 2019. Disponível em: <<https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2019.001.0024>>. Acesso em: 10 maio 2024.

ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Carlos Ribeiro; TAVARES JÚNIOR, Stélio Soares. Expansão Urbana e Fatores de Risco à Inundação em Boa Vista - RR. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 44, p. 139, maio 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/49680>>.

BRITO, Edmundo Rodrigues De; BASTOS, Frederico de Holanda. Suscetibilidade a eventos de inundação como subsídio ao planejamento urbano - O estudo da cidade do Crato/Ceará/Brasil. *http://journals.openedition.org/confins*, n. 53, 18 dez. 2021. Disponível em: <<http://journals.openedition.org/confins/43945>>. Acesso em: 10 maio 2024.

CARLOS, Antônio *et al.* EXPANSÃO URBANA E FATORES DE RISCO À INUNDAÇÃO EM BOA VISTA-RR URBAN EXPANSION AND FACTORS OF FLOOD RISK IN BOA VISTA-RR. v. 44, p. 2177–2738, 2018. Acesso em: 10 maio 2024.

CAVALCANTE DE LIMA, Ana Carolina; FACCIOLI, Gregorio Guirada; MEDEIROS, Fabiana Carnaúba. CRIAÇÃO DE MODELO DE RISCO A INUNDAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRAFICA DO RIO JACUÍPE (AL/PE) A PARTIR DO MÉTODO DE PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO – AHP. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. e04601, 23 jan. 2024. Disponível em: <<https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/4601>>. Acesso em: 25 mar. 2025.

CBH Rio das Velhas - CBH Rio das Velhas: Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/>>. Acesso em: 28 mar. 2025.

CHEN, Yu; ALEXANDER, David. Integrated flood risk assessment of river basins: Application in the Dadu river basin, China. *Journal of Hydrology*, v. 613, p. 128456, 1 out. 2022. Acesso em: 7 maio 2024.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. *Morfologia do relevo*. São Paulo: Edgard Blücher, 1971.

CUTTER, Susan L.; BORUFF, Bryan J.; SHIRLEY, W. Lynn. Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242–261, 1 jun. 2003. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley->

com.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1111/1540-6237.8402002>. Acesso em: 14 fev. 2025.

DA SILVA, Paulo Vitor Ribeiro Marques; JUNIOR, Ricardo Abranches Félix Cardoso; DE NORONHA, Gustavo Carneiro. Mapeamento e análise de risco de inundação da Bacia do Rio Paraíba/AL: estudo de caso. *Sistemas & Gestão*, v. 11, n. 4, p. 431–443, maio 2017. Disponível em: <<https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/1143>>.

DE MELO, Sharon Kelly; ALMEIDA, Aleska Kaufmann; DE ALMEIDA, Isabel Kaufmann. Multicriteria analysis for flood risk map development: a hierarchical method applied to Brazilian cities. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 33, p. 80311–80334, 1 jul. 2023. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez27.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11356-023-27856-8>>. Acesso em: 23 jul. 2024.

DE MOEL, H. *et al.* Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 20, n. 6, p. 865–890, 11 ago. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-015-9654-z>>. Acesso em: 2 ago. 2024.

DE MOEL, H.; VAN ALPHEN, J.; AERTS, J. C.J.H. Flood maps in Europe – methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 9, n. 2, p. 289–301, 4 mar. 2009. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/9/289/2009/>>. Acesso em: 13 jul. 2024.

DIACONU, Daniel Constantin; COSTACHE, Romulus; POPA, Mihnea Cristian. An Overview of Flood Risk Analysis Methods. *Water 2021, Vol. 13, Page 474*, v. 13, n. 4, p. 474, 11 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/474/htm>>. Acesso em: 7 maio 2024.

DUNG, Nguyen Ba *et al.* The Role of Factors Affecting Flood Hazard Zoning Using Analytical Hierarchy Process: A Review. *Earth Systems and Environment*, v. 6, n. 3, p. 697–713, 1 set. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s41748-021-00235-4>>. Acesso em: 10 maio 2024.

F. CIQUEIRA *et al.* MÉTODOS DE ANÁLISE DO RISCO APLICADOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS. 10º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL (PLURIS 2024) *Cidades e Territórios em Transição Guimarães*, 2024. Acesso em: 26 mar. 2025.

FABRIS GOERL, Roberto *et al.* O MODELO HAND COMO FERRAMENTA DE MAPEAMENTO DE ÁREAS PROPENSAS A INUNDAR. 2017, [S.I.]: 2017, 2017. . Acesso em: 12 abr. 2025.

FERNÁNDEZ, D. S.; LUTZ, M. A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, v. 111, n. 1–4, p. 90–98, 26 fev. 2010a. Acesso em: 10 maio 2024.

FRUTUOSO, Gilciane Kariny da Costa; GRIGIO, Alfredo Marceço; BARROS, Terezinha Cabral de Albuquerque Neta. Mapeamento das áreas de risco de inundação urbana na cidade de Assú - Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 6, p. 2994–3012, 9 dez. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/253775>>. Acesso em: 7 maio 2024.

FURLAN, André Ricardo; TRENTIN, Romario. MAPEAMENTO DOS DOMICÍLIOS EM RISCO DE INUNDAÇÃO: UM ESTUDO UTILIZANDO DADOS MULTIFINALITÁRIOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SUZANA, ERECHIM, RS. *REVISTA GEOGRAFAR*, v. 16, n. 2, p. 486, 31 dez. 2021. Acesso em: 12 maio 2024.

GOERL, Roberto Fabris; KOBAYAMA, Masato; PELLERIN, Joel Robert Georges Marcel. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC - doi: 10.4025/bolgeogr.v30i1.13519. *Boletim de Geografia*, v. 30, n. 1, p. 81–100, 21 jun. 2012. Disponível em: <<https://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/13519>>. Acesso em: 8 maio 2024.

GRIGG, Neil S. Comprehensive Flood Risk Assessment: State of the Practice. *Hydrology* 2023, Vol. 10, Page 46, v. 10, n. 2, p. 46, 10 fev. 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2306-5338/10/2/46/htm>>. Acesso em: 10 maio 2024.

GUDIYANGADA NACHAPPA, Thimmaiah *et al.* Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of Hydrology*, v. 590, p. 125275, 1 nov. 2020. Acesso em: 7 maio 2024.

GUIMARÃES, Nelson Avelar; PENHA, Julierme Wagner Da. Mapeamento das áreas de risco de inundação com a utilização do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente: estudo de caso em Muriaé. *Revista Agrogeoambiental*, v. 1, n. 2, 1 ago. 2009. Disponível em: <<https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/76>>. Acesso em: 8 maio 2024.

HAMMAMI, Salma *et al.* Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, v. 12, n. 21, p. 1–16, 1 nov. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-019-4754-9>>. Acesso em: 25 mar. 2025.

IBGE. *Pedologia*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 12 abr. 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. *Índice de Vulnerabilidade Social – IVS: metodologia e aplicação no Brasil*. Brasília: [s.n.], 2015

Jenks, G. F. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, v. 7, p. 186–190, 1967.

KITTIPONGVISES, Suthirat *et al.* AHP-GIS analysis for flood hazard assessment of the communities nearby the world heritage site on Ayutthaya Island, Thailand.

International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 48, p. 101612, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101612>>. Acesso em: 7 maio 2024.

LIMA, Renato Eugenio De *et al.* PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA (PARANÁ). *Caminhos de Geografia*, v. 22, n. 82, p. 01–12, 2 ago. 2021. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/55095>>. Acesso em: 7 maio 2024.

LÜDTKE, Stefan *et al.* A Consistent Approach for Probabilistic Residential Flood Loss Modeling in Europe. *Water Resources Research*, v. 55, n. 12, p. 10616–10635, 1 dez. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019WR026213>>. Acesso em: 10 maio 2024.

MARQUES, Mara Lúcia; CORÉGIO DA SILVA, Maurício; MANGABA DE CAMARGO, Danilo. ANÁLISE GEOESPACIAL NO MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL EM CAMPINAS, SP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69, n. 9, 8 ago. 2017. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44081>>. Acesso em: 25 mar. 2025.

MATTEDI, Marcos Antônio; MELLO, Bruno Jandir; SOUZA, Cristiane Mansur de Moraes; *et al.* Aplicação do índice de vulnerabilidade socioambiental a desastres por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG): *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 13, n. 1, p. e23423, fev. 2024. Disponível em: <<https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/23423>>.

MERZ, B. *et al.* Review article “Assessment of economic flood damage”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 10, n. 8, p. 1697–1724, 18 ago. 2010. Disponível em: <www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/1697/2010/>. Acesso em: 2 jul. 2024.

MILOGRANA, Jussanã. *Sistemática de auxílio à decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas*. 2009. Universidade de Brasília,

Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/4599>>. Acesso em: 2 abr. 2025.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *POLÍTICA NACIONAL DE DEFESA CIVIL*. . [S.l: s.n.]. . Acesso em: 8 abr. 2025., 2007

MISHRA, Kanchan; SINHA, Rajiv. Flood risk assessment in the Kosi megafan using multi-criteria decision analysis: A hydro-geomorphic approach. *Geomorphology*, v. 350, p. 106861, 1 fev. 2020. Acesso em: 7 maio 2024.

MONTE, Benício Emanuel Omena. CRBi: um índice de risco de inundações desenvolvido para municípios brasileiros. 2022. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/239034>>. Acesso em: 12 fev. 2025.

MONTE, Benício Emanuel Omena *et al.* Terminology of natural hazards and disasters: A review and the case of Brazil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 52, p. 101970, 1 jan. 2021. Acesso em: 12 fev. 2025.

MOURA, Priscilla Macedo. *Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain*. 2008. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 2008. Disponível em: <https://www.academia.edu/74169948/M%C3%A9thode_d%C3%A9valuation_des_p_ormances_des_syst%C3%A8mes_dinfiltration_des_eaux_de_ruissellement_en_milieu_urbain>. Acesso em: 31 mar. 2025.

OGATO, Gemechu Shale *et al.* Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 27, p. 100659, 1 fev. 2020. Acesso em: 7 maio 2024.

PAPAIOANNOU, G.; VASILIADES, L.; LOUKAS, A. Multi-Criteria Analysis Framework for Potential Flood Prone Areas Mapping. *Water Resources Management*, v. 29, n. 2, p. 399–418, 1 jan. 2015. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez27.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s11269-014-0817-6>>. Acesso em: 7 maio 2024.

PERIÇATO, André Jesus; SILVA, Valdeir Demétrio Da; MARCATTO, Francieli Sant'ana. Identificação e mapeamento das áreas de risco no município de Itajaí- SC a partir das inundações ocorridas em 2011 (Identification and mapping of the flood risk areas in the city of Itajaí-SC based on the 2011 floods). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 6, p. 1895–1909, 28 nov. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/233897>>. Acesso em: 8 maio 2024.

PONS, N A D *et al.* AVALIAÇÃO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE (ITU) PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÃO EM AMBIENTES URBANOS. 2024. Acesso em: 27 mar. 2025.

PORTELA, Bárbara de Melo *et al.* Análise da Vulnerabilidade à Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém, utilizando o Método de Análise Hierárquica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 3, p. 1247–1262, 1 jun. 2023. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/257875>>. Acesso em: 10 maio 2024.

REZENDE, Patrícia Soares; MARQUES, Daniela Vieira; OLIVEIRA, Luiz Antônio De. CONSTRUÇÃO DE MODELO NO QGIS E UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO – AHP PARA MAPEAMENTO DE RISCOS À INUNDAÇÃO NA ÁREA URBANA DE PARACATU – MG. *Caminhos de Geografia*, v. 18, n. 61, p. 1–18, 30 mar. 2017. Acesso em: 25 fev. 2025.

SARTORI, Aderson; NETO, Francisco Lombardi; MAIA GENOVEZ, Abel. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. v. 10, p. 5–18, 2005. Acesso em: 24 jan. 2025.

SAYERS, Paul *et al.* Flood Risk Management A Strategic Approach: Part of a series on strategic water management. *Water and Sewerage Journal*, p. 202, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2TkeZHh>>. Acesso em: 13 jul. 2024.

SCHOPPA, Lukas *et al.* Probabilistic Flood Loss Models for Companies. *Water Resources Research*, v. 56, n. 9, p. e2020WR027649, 1 set. 2020. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020WR027649>>. Acesso em: 7 maio 2024.

SIEG, Tobias *et al.* Toward an adequate level of detail in flood risk assessments. *Journal of Flood Risk Management*, v. 16, n. 3, 1 set. 2023. Acesso em: 13 jul. 2024.

SILVA, Paulo Vitor Ribeiro Marques Da; JUNIOR, Ricardo Abranches Félix Cardoso; NORONHA, Gustavo Carneiro De. Mapeamento e análise de risco de inundação da Bacia do Rio Paraíba/AL: estudo de caso. *Sistemas & Gestão*, v. 11, n. 4, p. 431–443, 31 maio 2016. Disponível em: <<https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/1143/550>>. Acesso em: 7 maio 2024.

SILVA SOUZA, Alisson *et al.* A flood warning system to critical region. *Procedia Computer Science*, v. 109, p. 1104–1109, 1 jan. 2017. Acesso em: 16 maio 2023.

SULEIMAN, Samia Nascimento. *GIRD+10. Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos de Desastres*. Brasília: [s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.institutosiades.org.br/wp-content/uploads/Caderno_GIRD10.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2025.

TANG, Xianzhe *et al.* An Optimized Weighted Naïve Bayes Method for Flood Risk Assessment. *Risk Analysis*, v. 41, n. 12, p. 2301–2321, 1 dez. 2021. Acesso em: 7 maio 2024.

TEHRANY, Mahyat Shafapour; PRADHAN, Biswajeet; JEBUR, Mustafa Neamah. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, v. 512, p. 332–343, 6 maio 2014. Acesso em: 7 maio 2024.

TEHRANY, Mahyat Shafapour; PRADHAN, Biswajeet; JEBUR, Mustafa Neamah. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, v. 504, p. 69–79, 11 nov. 2013. Acesso em: 7 maio 2024.

TUCCI, Carlos E. M. *Hidrologia aplicada*. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2005.

UNDRR. *Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction*. Disponível em: <<https://www.undrr.org/drr-glossary/terminology>>. Acesso em: 31 mar. 2025.

WANG, Yamei *et al.* A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, v. 25, n. 13, p. 3465–3484, out. 2011.

ZHANG, Ke *et al.* An integrated flood risk assessment approach based on coupled hydrological-hydraulic modeling and bottom-up hazard vulnerability analysis. *Environmental Modelling & Software*, v. 148, p. 105279, 1 fev. 2022. Acesso em: 7 maio 2024.

APÊNDICE A– Indicadores de perigo

Critérios	Parâmetro	Publicações
Tipo de solo	Tipo de solo	Istak Ahmeda et al. (2022), Lima et al. (2024), Tehrany et al. (2013), Tehrany et al.(2014), Marques et al. (2017), Ogatoa et al.(2020)
Geomorfologia	Área de deposição/área do canal	Mishra et al. (2019)
	Batimetria	Zhang et al. (2022)
	Geologia	Tehrany et al. (2013), Tehrany et al. (2014), Nachappaa et al. (2020)
	canais ativos, canais abandonados, corpos de areais, bancos de areia, superfície de leque aluvial	Mishra et al. (2019)
	Leito de inundação	Júnior et al. (2018)
	Profundidade do lençol freático	Fernández et al. (2010)
	Tipo de canal do rio	Brito et al. (2021)
Topográfico	Declividade	Fernández et al. (2010), Tehrany et al. (2013), Júnior et al. (2018), Papaioannou et al. (2014), Tehrany et al. (2014), Ogatoa et al. (2020), Kittipongvises et al. (2020), Nachappaa et al. (2020), Tang et al. (2021), Ahmeda et al. (2022), Chen et al. (2022), Lima et al. (2024), Marques et al. (2017), Mishra et al. (2019)
	Fluxo acumulado	Ahmeda et al. (2022), Papaioannou et al. (2014)
	Direção da inclinação	Nachappaa et al. (2020)
	Distância horizontal de escoamento superficial (HOFD)	Papaioannou et al. (2014)
	Distância Vertical de escoamento superficial (VOFD)	Papaioannou et al. (2014)
	Elevação	Fernández et al. (2010), Wang et al. (2011), Tehrany et al. (2014), Marques et al. (2017), Júnior et al. (2018), Ogatoa et al. (2020), Kittipongvises et al. (2020), Nachappaa et al. (2020), Tang et al. (2021), Ahmeda et al. (2022), Chen et al. (2022), Lima et al. (2024)

Crítérios	Parâmetro	Publicações
	Índice de posição tográfica (TPI)	Papaioannou et al. (2014)
	Índice topográfico de umidade (ITU)	Tehrany et al. (2013), Tehrany et al. (2014), Nachappaa et al. (2020), Ahmeda et al. (2022), Papaioannou et al. (2014)
	Índice de potência do fluxo (SPI)	Tehrany et al. (2013), Tehrany et al. (2014), Nachappaa et al. (2020)
Geomorfologia/precipitação	Classificação de suscetibilidade	Mattedi et al. (2024), Ahmeda et al. (2022), Tehrany et al. (2014), Tang et al. (2021), Tehrany et al. (2013)
Hidrológico	Área da bacia hidrográfica	Kittipongvises et al. (2020)
	Cheia de montante	Wang et al. (2011)
	Coeficiente de rugosidade de Manning	Brito et al. (2021)
	Curve Number (CN)	Papaioannou et al. (2014), Brito et al. (2021),
	Densidade de drenagem	Kittipongvises et al. (2020), Ogatoa et al. (2020), Wang et al. (2011)
	Distância até o rio	Tehrany et al. (2014), Mishra et al. (2019), Tang et al. (2021), Ahmeda et al. (2022), Nachappaa et al. (2020), Fernández et al. (2010)
	Escoamento superficial	Kittipongvises et al. (2020)
	Evaporação do tanque	Zhang et al. (2022)
	Tempo de retorno- TR	Lüdtke et al. (2019), Schoppa et al. (2020), Brito et al. (2021)
	Retenção de água no solo (SWR)	Tang et al. (2021)
	Tempo de retardo - Tlag	Brito et al. (2021)
	Tempo de concentração - TC	Brito et al. (2021), ARAUJO et al., (2019)
	Vazão média diária	Zhang et al. (2022)
Coeficiente de compacidade	ARAUJO et al., (2019)	

Crêterios	Parâmetro	Publica�es
	�ndice de conforma�o	ARAUJO et al., (2019)
Medidas de conten�o	Projeto de controle de enchentes	Wang et al. (2011)
Precipita�o	Chuva	Tehrany et al. (2013), Tehrany et al. (2014), Ogatoa et al. (2020), Zhang et al. (2022)
	Chuva máxima diária	Kittipongvises et al. (2020)
	�ndice de Fournier modificado	Papaioannou et al. (2014)
	Média de chuva anual	Mishra et al. (2019), Nachappaa et al. (2020), Ahmeda et al. (2022)
	Média máxima anual de chuva em 72h e média anual de frequência de tempestades	Wang et al. (2011)
	Precipita�o m�dia	Brito et al. (2021)
	R20_ contagem anual de dias em que a precipita�o diária � ≥ 20 mm.	Chen et al. (2022)
	R5day_ Intensidade máxima de um acontecimento de intensidade máxima	Chen et al. (2022)
	R99_ fra�o de precipita�o total anual que se situa acima do percentil 99	Chen et al. (2022)
Cobertura do solo	Tipo de cobertura do solo	Fernández et al. (2010), Brito et al. (2021)
	NDVI- �ndice de vegeta�o por diferença normalizada	Nachappaa et al. (2020), Chen et al. (2022)
	Cobertura vegetal fracionada (CVF)	Tang et al. (2021)
	Cobertura Vegetal	Wang et al. (2011)

Fonte – Autor (2025)

APÊNDICE B – Indicadores de exposição

Critérios	Parâmetro	Autores
Populacional	Densidade demográfica	Wang et al. (2011), Marques et al. (2017), Mishra et al. (2019), Ogatoa et al. (2020), Mattedi et al. (2024), Zhang et al. (2022), Chen et al. (2022),
	Média de moradores por domicílio	Marques et al. (2017)
	Número de moradores no setor	Marques et al. (2017)
	Número de residências no setor censitário	Mattedi et al. (2024)
	%Domicílios particulares permanentes com seis moradores ou mais moradores	Mattedi et al. (2024)
	Densidade domiciliar	Mishra et al. (2019)
Cobertura do solo	Uso e ocupação do solo	Lima et al. (2024) Ogatoa et al. (2020) Ahmeda et al. (2022) Zhang et al. (2022) Tehrany et al. (2014) Tehrany et al. (2013) Marques et al. (2017) Mishra et al. (2019)
	Uso do solo	Ogatoa et al. (2020), Kittipongvises et al. (2020)
	Terras de cultivo	Wang et al. (2011)

APÊNDICE C – Indicadores de Vulnerabilidade

Critério	Indicadores	Autores
Gênero	% Mães chefe de família	Mattedi et al. (2024)
	Razão entre número de homens e mulheres	Zhang et al. (2022)
	Densidade populacional feminina	Mishra et al. (2019)
Composição Etária e de Necessidades Específicas	% População idosa (acima de 60 anos)	Mattedi et al. (2024)
	% População infantil (até 12 anos)	Mattedi et al. (2024)
	Porcentagem de população >65 anos e <12 anos	Marques et al. (2017)
	População menor de 10 anos e maior de 59 anos	Zhang et al. (2022)
	População portadora de necessidade específicas	Zhang et al. (2022)
	Número de dependente	Zhang et al. (2022)
Educação	Porcentagem de pessoas analfabetas acima de 12 anos	Marques et al. (2017)
	Taxa de alfabetização	Mishra et al. (2019)
	População analfabeta	Zhang et al. (2022)
Etnia	% População negra, parda ou indígena	Mattedi et al. (2024)
Economia	PIB	Wang et al. (2011)
	PIB per capita	Chen et al. (2022)
	População desempregada	Zhang et al. (2022)
	Porcentagem de responsáveis com rendimento de até 1 salário-mínimo	Marques et al. (2017)

Critério	Indicadores	Autores
	Porcentagem de responsáveis sem rendimento	Marques et al. (2017)
	Renda familiar	Mattedi et al. (2024)
	Densidade do PIB	Chen et al. (2022)
Experiência	Eventos de inundação passados	Kittipongvises et al. (2020)
	Experiência em inundações	Lüdtke et al. (2019), Schoppa et al. (2020)
Danos	Perda relativa de edifícios residenciais	Lüdtke et al. (2019)
	Perda relativa para a edificação	Schoppa et al. (2020)
	Perda relativas de bens e estoque	Schoppa et al. (2020)
	Perda relativas de equipamentos	Schoppa et al. (2020)
	Duração da inundação	Lüdtke et al. (2019), Schoppa et al. (2020)
	Nível de água	Lüdtke et al. (2019), Schoppa et al. (2020), Zhang et al. (2022)
Infraestrutura	Densidade rodoviária	Wang et al. (2011), Mishra et al. (2019), Nachappaa et al. (2020), Kittipongvises et al. (2020),
	Interseção rio-estrada	Mishra et al. (2019)
	Densidade de infraestrutura urbana	Mattedi et al. (2024)
	%Domicílios sem esgotamento sanitário adequado	Mattedi et al. (2024)
	%Vias sem drenagem urbana	Mattedi et al. (2024)
	% Vias sem pavimentação	Mattedi et al. (2024)
	Padrão do projeto de controle de inundação	Chen et al. (2022)

Critério	Indicadores	Autores
	Taxa de precaução	Schoppa et al. (2020), Lüdtke et al. (2019)
	Coeficiente de roteamento da inundação	Chen et al. (2022)
Estrutura produtiva	Número de pessoas em serviços e indústria	Zhang et al. (2022)
	Número de pessoas em trabalho agrícola	Zhang et al. (2022)
	Número de pessoas em trabalho doméstico	Zhang et al. (2022)
	Setor do negócio	Schoppa et al. (2020)
	Área de arrozal	Zhang et al. (2022)
	%Domicílios permanentes tipo casa	Mattedi et al. (2024)
Característica de Domicílios e empresas	% Domicílios alugados	Mattedi et al. (2024)
	Área construída	Lüdtke et al. (2019)
	Situação espacial	Schoppa et al. (2020)
	Número de domicílios rurais	Zhang et al. (2022)
	Número de domicílios urbanos	Zhang et al. (2022)
	Tipo de construção	Lüdtke et al. (2019)
	Tamanho da empresa	Schoppa et al. (2020)

Fonte – Autor (2025)

APÊNDICE D – Lista de bases de dados

Tipo de Dado	Origem dos Bancos de Dados
MDE	ANADEM
	SRTM versão 3-USGS
	Base vetorial contínua do RS
	TOPODATA
Altitude e declividade	Embrapa
	Aerofotos digitais com resolução espacial de 2 m, disponibilizada pelo Satélite GEOEYE
	Google Earth-Pro, SRTM, disponível no site Earth Explorer, administrado pela USGS
	Levantamentos topo-batimétricos e aerofotogramétricos realizados na bacia
Dados de Chuva	Imerge
	widroweb ANA
	Tropical Rainfall Measuring Mission
	Cemaden
IDF	SGB
Limites territoriais	Cartas Geográficas do Exército brasileiro (BDGEX)
	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
Uso e ocupação do solo	Mapeamento anual do uso e cobertura da terra no Brasil (MapBiomas)
	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
Dados Pedológicos	IBGE
Tipos de solo	Embrapa
Características da Bacia hidrográfica	Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia (SRH)
	ANA

Tipo de Dado	Origem dos Bancos de Dados
Inventário de drenagem e manejo das Águas Pluviais Urbanas	SNIS
Escolas	https://www.geo.mg.gov.br/progeo-web/ INEP
	https://iede.fjp.mg.gov.br/map
Unidades de saúde	https://www.geo.mg.gov.br/progeo-web/
	Aerofotos digitais com resolução espacial de 2 m, disponibilizada pelo Satélite GEOEYE
Dados socioeconômicos	Censo
	PNADC
	Prefeituras
	EMATER/RS
	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC)
Malha Rodoviária	PLATAFORMA ONLINE DE VISUALIZAÇÃO DE CAMADAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA - 5ª EDIÇÃO
	MapBiomias
Infra-estrutura	Plano Estratégico Municipal para Assentamentos Subnormais (PMI, 2001)
	Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil
	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) das Secretarias de Educação, Saúde, Urbanismo, Governo Municipal Abastecimento e Planejamento
Inventário de Inundação	Matérias publicadas em blogs e sites da cidade
	Google Earth Pro
	Defesa Civil
	Arquivo histórico municipal
	Trabalhos de campo para verificação e caracterização dos fenômenos ocorridos in loco
	Entrevista com moradores das áreas de risco

Tipo de Dado	Origem dos Bancos de Dados
Mapa de potencial poluidor	Sistema de Monitoramento Ambiental (SIMA) da Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMMA)

Fonte – Autor (2025)

APÊNDICE E – Informações Disponíveis por Setor Censitário no Censo 2010

Informação	Arquivo	Nome da variável
Faixa etária (população menor que 5 anos e maior de 70 anos)	6.16 Arquivo Idade, total	V23 até V39 e V104 até V134
Condição de alfabetização	6.6 Arquivo Alfabetização, total	V078 Responsáveis alfabetizados(as) com 10 ou mais anos de idade em domicílios particulares
Rendimento médio da população	6.1 Arquivo Básico	V005 Valor do rendimento nominal médio mensal das pessoas responsáveis por domicílios particulares permanentes (com e sem rendimento)
Acesso a abastecimento de água	6.2 Arquivo Domicílio, características gerais	V012 Domicílios particulares permanentes com abastecimento de água da rede geral
Acesso a esgotamento sanitário	6.2 Arquivo Domicílio, características gerais	V017 Domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial
Acesso a coleta de lixo domiciliar	6.2 Arquivo Domicílio, características gerais	V035 Domicílios particulares permanentes com lixo coletado
Número de domicílios particulares permanentes e adequados	6.23 Arquivo Entorno 02	V206 Domicílios particulares permanentes com moradia inadequada – Existe identificação do logradouro V207 Domicílios particulares permanentes com moradia inadequada – Não existe identificação do logradouro

Fonte: Adaptado de Censo 2010

APÊNDICE F – Apresentação realizada para os especialistas



Aos especialistas

Este trabalho faz parte do desenvolvimento da pesquisa de mestrado de Flávia Ciqueira, sob a orientação da Prof.^a Priscilla Macedo e coorientação da Prof.^a Jussanã Milograna.

O objetivo do trabalho é desenvolver uma ferramenta baseada em análise multicritério para avaliação de risco de inundações em macrobacias brasileiras para auxiliar na tomada de decisões pelos gestores públicos com a finalidade de priorização de investimentos.

A ferramenta proposta aplica-se a avaliação de risco de inundação em macrobacias, onde há escassez de bancos de dados qualificados e em detalhamento suficiente para a execução de simulações hidrodinâmicas, ou onde em função da escala, torna-se inviável o uso de técnicas convencionais de modelagem.

A utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e de modelos digitais de terreno são elementos fundamentais para essa análise. Esses dados permitem criar camadas detalhadas para cada indicador, oferecendo uma visão dos aspectos socioeconômicos, hidrológicos e físicos da macrobacia.

Cada camada de informação contribui para a construção de um panorama integrado do risco de inundação, possibilitando a análise para bacias da ordem de grandeza de algumas centenas de km².

Objetivo da entrevista

Ponderar critérios e indicadores para avaliar o risco de inundação, considerando perigo, exposição e vulnerabilidade.

Como será a entrevista



Mapeamento de Risco de Inundação

Risco: função da probabilidade de ocorrência de uma inundação e suas consequências

Sayers et al. (2013)

Dimensões do Risco

Perigo: Caracteriza a probabilidade e intensidade de inundações.

Exposição: Mapeia elementos vulneráveis (população, propriedades).

Vulnerabilidade: Medida de capacidade de resposta à inundações.

RISK

Definição de critérios

- **CrITÉrios de Perigo:**

Meteorol3gicos

Hidrol3gicos

Tipo de Solo

Cobertura do
solo

Infraestrutura
existente

Topografia

Definição de critérios

- **Critérios de Exposição**

Uso e
ocupação

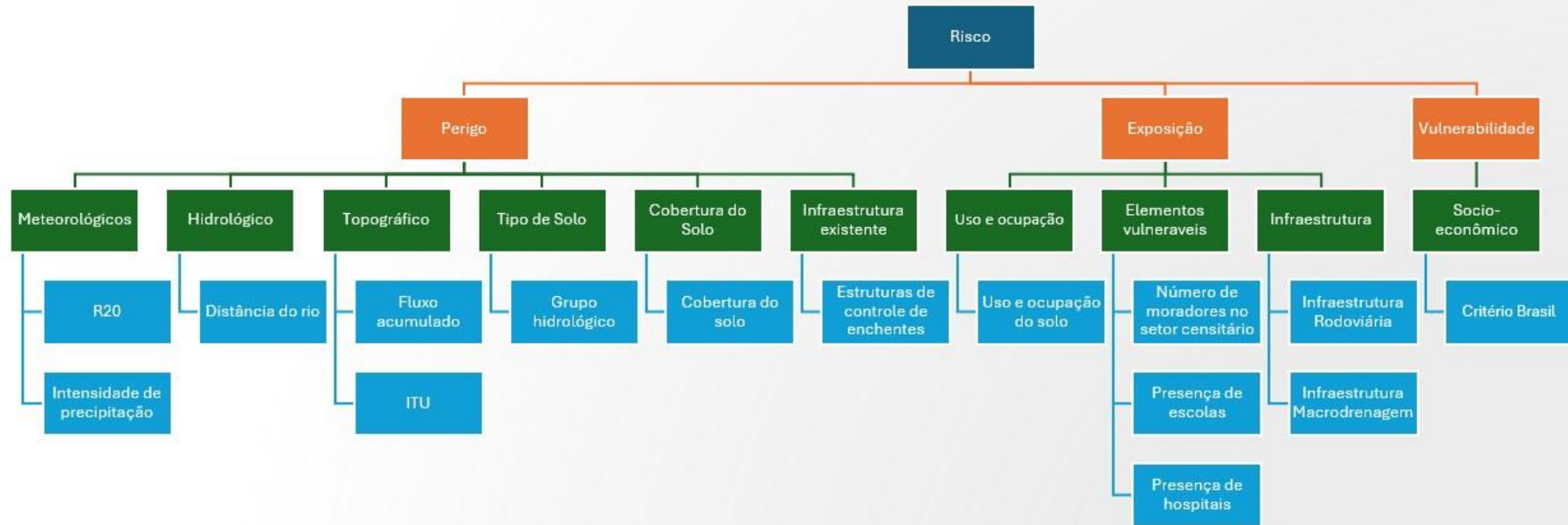
Elementos
vulneráveis

Infraestrutura

Definição de critérios

- **Critérios de Vulnerabilidade**

Socio-
econômico



Glossário de indicadores

Indicador	Justificativa	Como medir
R20	Regiões com alta frequência de eventos acima de 20 mm/dia podem enfrentar riscos maiores de inundações.	Número de dias por ano com precipitação superior ou igual a 20mm, nos últimos 15 anos.
Intensidade de precipitação	Permite avaliar o risco de inundação ao considerar eventos extremos de chuva que maximizam o escoamento superficial na bacia.	Intensidade de precipitação com duração igual ao período de concentração da bacia e TR50 (mm/h)
Distância do rio	As faixas de distância em torno do rio podem ser interpretadas como zonas de risco progressivo, onde a proximidade com o rio indica uma exposição potencial ao perigo de inundações.	Distância de um ponto até a margem do leito menor do rio.

Glossário de indicadores

Indicador	Justificativa	Como medir
Fluxo acumulado	O fluxo acumulado soma a água que desce a encosta nas células do raster de saída (Kazakis et al., 2015). A água tende a se acumular nas junções tributárias de um sistema fluvial.	A ferramenta utilizada para determinar a quantidade de células de fluxo de montante que contribuirão para um determinado ponto a jusante. O indicador é o valor determinado pela ferramenta.
ITU	ITU é uma medida relativa da disponibilidade em longo prazo de umidade do solo de um determinado local na paisagem.	$ITU = \ln(\alpha / (\tan \beta))$ α = área de contribuição da bacia β = declividade
Grupo hidrológico	Caracterizar a permeabilidade do solo, informação fundamental para a determinação do escoamento superficial.	Classificação do grupo hidrológico do solo

Glossário de indicadores

Indicador	Justificativa	Como medir
Cobertura do solo	A cobertura do solo irá definir sua permeabilidade, superfícies impermeáveis aumentam o escoamento superficial e por consequência a frequência de cheias.	Cobertura do solo (vegetação natural, plantada ou construções).
Estruturas de controle de enchentes	Identificar se existem obras que garantem a proteção até determinado nível de risco hidrológico atenuando dessa forma a dimensão do perigo	Identificar o TR atendido pela obra.
Uso e ocupação do solo	Identificar o tipo de utilização da área, se a região é rural, urbana ou industrial.	Tipo de ocupação: industrial, residencial, comercial, agricultura, pastagem, mineração, florestal.
Número de moradores no setor censitário	Mapaeamento de pessoas que possam ser sujeito a perdas potenciais	Número de moradores.

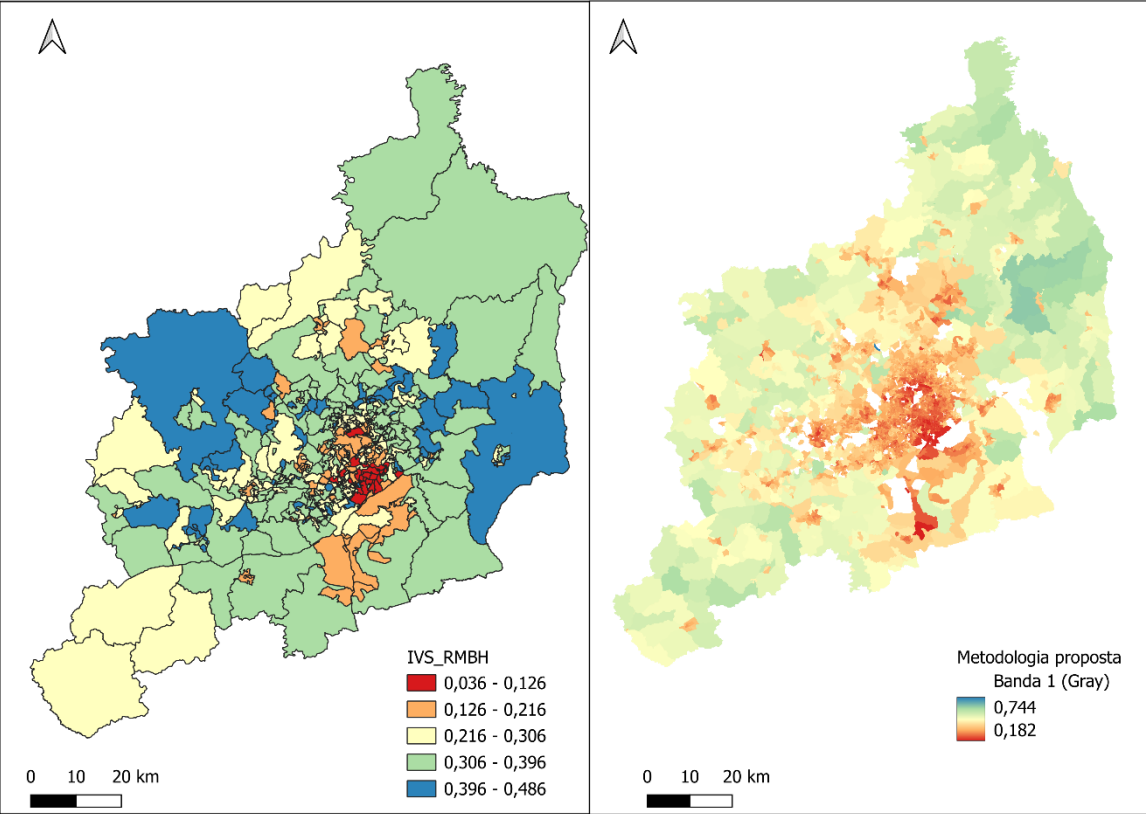
Glossário de indicadores

Indicador	Justificativa	Como medir
Presença de escolas	Mapaeamento de prédios escolares que possam ser sujeito a perdas potenciais	Número de escolas.
Presença de hospitais	Mapaeamento de prédios de hospitais que possam ser sujeito a perdas potenciais	Número de hospitais.
Infraestrutura Rodoviária	Mapaeamento de infraestrutura publica que possam ser sujeito a perdas potenciais	Densidade de infraestrutura km/km ² .
Infraestrutura de Macrodrenagem	Mapaeamento de infraestrutura publica que possam ser sujeito a perdas potenciais	Densidade de infraestrutura km/km ² .
Critério Brasil	Permite identificar populações mais suscetíveis a desastres naturais, considerando fatores como renda, acesso a serviços e educação.	Através da renda obtida pelo IBGE, usar a tabela final e identificar a classe associada.

APÊNDICE G – Validação do indicador de vulnerabilidade para RMBH

Para a devida validação do índice, foi necessário realizar a implementação para a região metropolitana de Belo Horizonte para que fosse possível realizar a comparação com o IVS, como pode ser observado na Figura 41.

Figura 41- Comparação entre Indicadores de vulnerabilidade para a RMBH



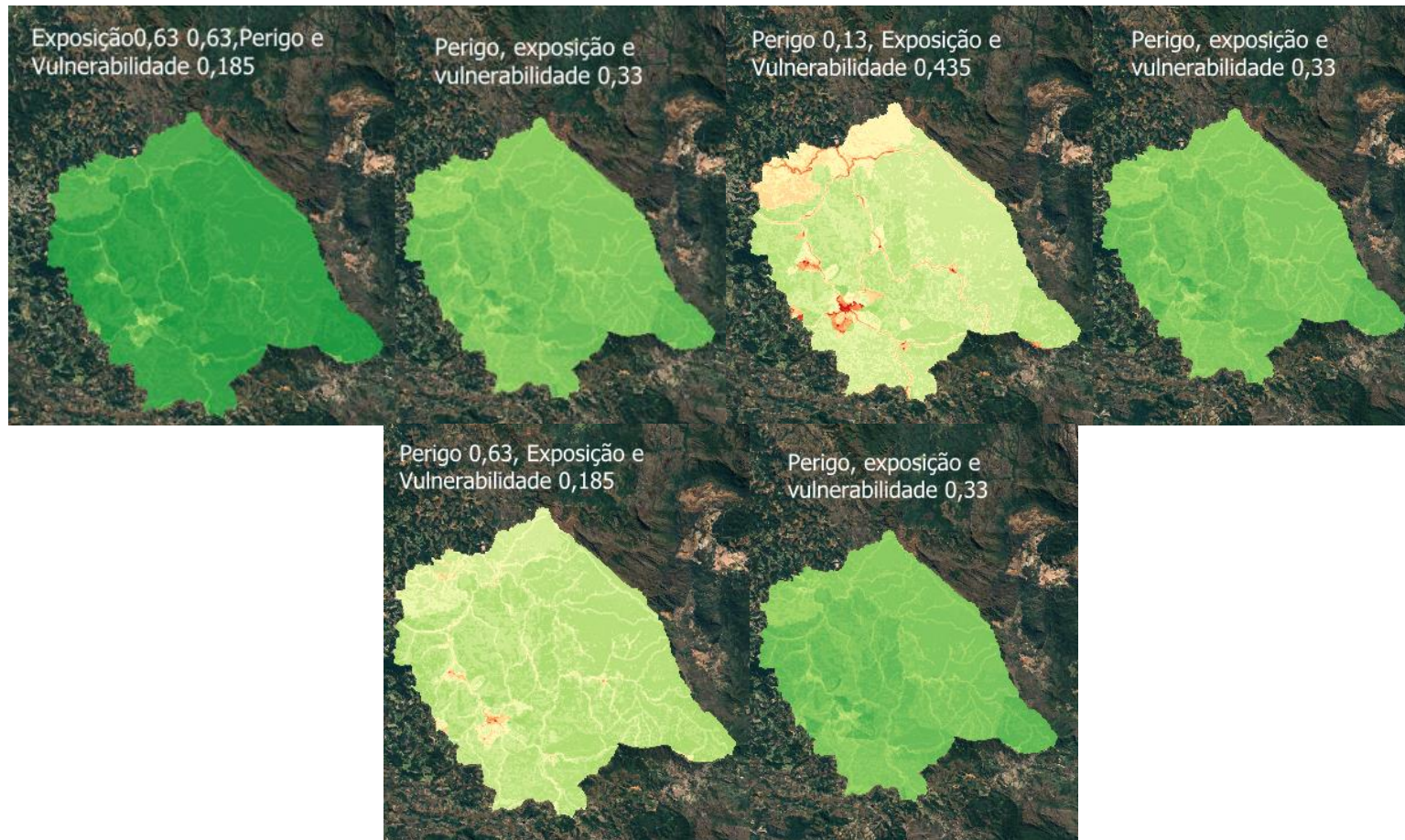
Fonte – a) Adaptado de IPEA (2025) b) Autor (2025)

Apesar de não possuírem os mesmos valores, os mapas apresentam consistência na informação de vulnerabilidade. Um exemplo disso é que, em ambos, as áreas de menor vulnerabilidade estão concentradas na região central, o que indica que o método atende ao seu propósito.

APÊNDICE H – Análise de sensibilidade dos indicadores do risco

Para testar a estabilidade do modelo, realizou-se uma análise de sensibilidade variando sistematicamente os pesos de Perigo, Exposição e Vulnerabilidade entre os limites mínimos e máximos sugeridos pelos especialistas. Os resultados (Figura 42) indicaram que o modelo é altamente sensível a essas oscilações, o que validou a escolha da mediana como o método mais adequado para agregar as opiniões dos 25 especialistas, neutralizando discrepâncias extremas.

Figura 42- Resultado do mapa de risco conforme variações nos pesos dos componentes do risco



ANEXO A – Classificação hidrológica do tipo de solo

Grupo Hidrológico	Tipo de Solo
A (Alta infiltração, alta resistência à erosão, bem drenados)	LATOSSOLO AMARELO (textura argilosa ou muito argilosa, alta macroporosidade)
	LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (textura argilosa ou muito argilosa, alta macroporosidade)
	LATOSSOLO VERMELHO (textura argilosa ou muito argilosa, alta macroporosidade)
	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (textura média, horizonte superficial não arenoso)
B (Moderada infiltração, moderada resistência à erosão, solos profundos)	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (textura média, horizonte superficial arenoso)
	LATOSSOLO BRUNO
	NITOSSOLO VERMELHO

Grupo Hidrológico	Tipo de Solo
	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO
C (Baixa infiltração, baixa resistência à erosão, mudança textural abrupta)	<p>ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO (textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa, sem mudança textural abrupta)</p> <p>ARGISSOLO (pouco profundo, sem mudança textural abrupta)</p> <p>ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO (profundos, com mudança textural abrupta)</p> <p>CAMBISSOLO (textura média)</p> <p>CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO (com características latossólicas)</p> <p>ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO</p> <p>NEOSSOLO FLÚVICO</p>

Grupo Hidrológico	Tipo de Solo
D (Muito baixa infiltração, solos rasos, solos orgânicos)	NEOSSOLO LITÓLICO
	ORGANOSSOLO
	GLEISSOLO
	CHERNOSSOLO
	PLANOSSOLO
	VERTISSOLO
	ALISSOLO e LUVISSOLO
	PLINTOSSOLO
	SOLOS DE MANGUE
	AFLORAMENTOS DE ROCHA
	Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C

Grupo Hidrológico	Tipo de Solo
	ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO (pouco profundos, com mudança textural abrupta)

ANEXO B – Indicadores do indicador de vulnerabilidade IVS

	Indicadores
ivs_infraestrutura_urbana	Percentual da população que vive em domicílios urbanos sem o serviço de coleta de lixo
	Percentual de pessoas em domicílios com abastecimento de água e esgotamento sanitário inadequados
	Percentual de pessoas em domicílios vulneráveis à pobreza e que gastam mais de uma hora até o trabalho no total de pessoas ocupadas, vulneráveis e que retornam diariamente do trabalho
IVS Capital Humano	Mortalidade até um ano de idade
	Percentual de crianças de 0 a 5 anos que não frequenta a escola
	Percentual de crianças de 6 a 14 anos que não frequenta a escola
	Percentual de mulheres de 10 a 17 anos de idade que tiveram filhos
	Percentual de mães chefes de família, sem fundamental completo e com pelo menos um filho menor de 15 anos de idade, no total de mães chefes de família
	Taxa de analfabetismo da população de 15 anos ou mais de idade
	Percentual de crianças que vivem em domicílios em que nenhum dos moradores tem o ensino fundamental completo
	Percentual de pessoas de 15 a 24 anos que não estudam, não trabalham e são vulneráveis à pobreza, na população total dessa faixa etária
ivs_renda_e_trabalho	Proporção de vulneráveis à pobreza
	Taxa de desocupação da população de 18 anos ou mais de idade
	Percentual de pessoas de 18 anos ou mais sem fundamental completo e em ocupação informal
	Percentual de pessoas em domicílios vulneráveis à pobreza e dependentes de idosos
	Taxa de atividade das pessoas de 10 a 14 anos de idade

ANEXO C– Classificação das escalas dos tipos de avaliação de risco

Característica	Supra-nacional (continental)	Macro (nacional)	Meso (regional)	Micro (local)
Resolução (DEM)	1–10 km	100 m–1 km	~25–100 m	~1–25 m
Estimativa de Perigo	Modelo global de inundações em rios	Modelo genérico de inundações	Modelo chuva-vazão e Modelagem hidráulica 2D ou simplificação	Modelagem hidráulica 2D
	Alturas de ressaca	Agregação de simulações hidráulicas		
Estimativa de Consequências	PIB ou população em grade na zona de inundação	Uso do solo e curvas de dano	Uso do solo e curvas de dano	Curvas de dano por estágio para edifícios individuais
Incertezas	Presença de defesas contra inundações é desconhecida (ontológica)	Modelagem de inundação em escala grosseira (ontológica/epistêmica)	Falha das defesas (epistêmica)	Modelagem hidráulica (epistêmica)
			Evento probabilístico (aleatório)	Falha das defesas (epistêmica)
			Cálculo de danos (epistêmico)	Probabilidade do evento (aleatória)
				Cálculo de danos (epistêmico)
Validação	Comparar os resultados do estudo/modelo com dados históricos para verificar precisão, consistência e confiabilidade.	Os modelos podem superestimar os danos totais ao usar parâmetros conservadores ou abordagens que maximizam as perdas.	A validação foca em danos agregados e pode não refletir com precisão as diferenças locais ou setoriais	A validação é mais confiável para eventos recentes com documentação detalhada, sendo menos precisa para eventos antigos ou mal documentados.
Aplicação Acadêmica	Processo de avaliação geral de riscos	Processo de avaliação geral de riscos	Avaliação do impacto de medidas de mitigação ou adaptação	Avaliação do impacto de medidas de mitigação ou adaptação
	Efeito das mudanças climáticas e crescimento populacional	Efeito das mudanças climáticas e crescimento populacional	Análise de como as tendências futuras podem influenciar os riscos	Avaliação de diferentes estratégias
			Análises de incerteza	Validação de metodologias
Uso Social	Fundos de socorro em desastres	Programa de seguro nacional	Priorização de investimentos	Avaliação de medidas específicas
	Análise de risco de portfólio de seguros	Comunicação e conscientização	Apoio ao planejamento	Otimização de investimentos

Característica	Supra-nacional (continental)	Macro (nacional)	Meso (regional)	Micro (local)
	Cadeia de produção	Controle do desenvolvimento local	Comunicação e conscientização	Apoio à gestão e planejamento local

Fonte: Adaptado De Moel et al. (2015)