

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS EM JUIZ DE FORA (MG)

Jordanna M. M. dos Anjos¹; Tiago V. da Silva²; Bárbara C.M. Reis³; César F. Barella⁴; Aline

A. Nunes⁵

Abstract: Historically, the relationship between urban centers and water bodies has always been close, as rivers offered favorable conditions for human development, such as water supply, transportation facilities, and support for agriculture. However, the disorderly growth of cities and the lack of adequate infrastructure for stormwater management have had serious impacts on the urban environment, such as the intensification of flooding events. Given this scenario, the present study aimed to analyze the susceptibility to flooding and inundation in the municipality of Juiz de Fora (MG). To this end, the parameters of land use and occupation, soil types, slope, and hypsometry were mapped in the hydrographic basin that covers the extent of the municipality's urban planning. Based on these data, the multi-criteria AHP (Analytic Hierarchy Process) method was applied, which allowed the generation of a risk map of susceptibility to flooding and waterlogging. The results demonstrated that the methodology is effective for this type of analysis, since it considers physical and anthropic factors relevant to the occurrence of floods. Thus, AHP presents itself as a strategic tool for urban management, assisting in disaster prevention and planning improvements to the drainage system, especially in areas with greater vulnerability.

Resumo: Historicamente, a relação entre os centros urbanos e os corpos hídricos sempre foi estreita, já que os rios ofereciam condições favoráveis ao desenvolvimento humano, como abastecimento de água, facilidades para o transporte e suporte à agricultura. No entanto, o crescimento desordenado das cidades e a ausência de infraestrutura adequada para o manejo das águas pluviais revelaram sérios impactos no ambiente urbano, como a intensificação dos eventos de inundação. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a suscetibilidade a inundações e alagamentos no município de Juiz de Fora (MG). Para isso, foram mapeados os parâmetros de uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade e hipsometria na bacia hidrográfica que abrange a extensão do planejamento urbano do município. A partir desses dados, aplicou-se o método multicriterial AHP (Processo de Análise Hierárquica), que permitiu a geração de um mapa de suscetibilidade a inundações e alagamentos. Os resultados demonstraram que a metodologia é eficaz para esse tipo de análise, uma vez que considera fatores físicos e antrópicos relevantes na ocorrência de cheias. Assim, o AHP se apresenta como uma ferramenta estratégica para a gestão urbana, auxiliando na prevenção de desastres e no planejamento de melhorias no sistema de drenagem, especialmente em áreas com maior vulnerabilidade.

Palavras-Chave – Bacias hidrográficas, Método Multicriterial AHP, Drenagem urbana

1) Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Engenheira Urbana pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), jordannamisson@ufmg.br;

2) Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Engenheira Urbana pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), tiagovs@ufmg.br;

3) Prof.a . Dr a . UFOP – Departamento de Engenharia Urbana, barbara.reis@ufop.edu.br;

4) Prof. Dr . UFOP - Departamento de Engenharia ambiental, cesarbarella@ufop.edu.br

5) Prof a . Dr a . UFOP - Departamento de Engenharia Urbana, aline.nunes@ufop.edu.br

INTRODUÇÃO

As configurações de desenvolvimento urbano desordenado e acelerado associadas aos municípios brasileiros têm impactado a dinâmica do ciclo hidrológico das bacias hidrográficas em que se situam, promovendo a ocorrência de eventos extremos de precipitação, gerando prejuízos econômicos, sociais, ambientais e humanos (Samanta *et al.*, 2018).

O intenso processo de urbanização nas últimas décadas tem impactado negativamente e de forma expressiva na quantidade e qualidade dos recursos hídricos. As mudanças na capacidade dos canais e nos processos fluviais - reflexo dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos - provocam o aumento do pico de descarga e assoreamento dos rios, bem como a deposição incorreta de resíduos urbanos, contribuindo para o aumento de enchentes e inundações em meio urbano (Carvalho *et al.*, 2017).

O município de Juiz de Fora, Minas Gerais, enfrenta diversos registros e problemáticas associadas a inundações que ocorrem devido a sua ocupação desordenada que se originou inicialmente no rio Paraibuna. A submersão de áreas que não estão inseridas nos limites normais dos cursos d'água são consequências das fortes chuvas que assolam o município e se agravam pelo processo de urbanização, conforme ocorrido no início de 2022 e em anos anteriores, sobretudo na inundaçao histórica de 1940 (G1, 2022).

Uma ferramenta fundamental para a gestão municipal em relação a ocorrências desses eventos é o mapeamento de suscetibilidade a inundações, no qual diferentes métodos de análises multicritério vem sendo aplicados para sua produção, como o IDRISI, o Height the Nearest Drainage (HAND) e o Analytic Hierarchy Process (AHP), ou Processo Analítico Hierárquico (Goerl *et al.*, 2017; Dias *et al.*, 2021; Saaty, 1980). Esse mapeamento também é uma exigência aos Planos Diretores Municipais, instrumento central de gestão e planejamento das cidades, conforme estabelecido pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Essa medida permite implementar medidas preventivas para o uso e ocupação do solo, criação de zonas de preservação ambiental e áreas de risco e ações de gestão de riscos por parte da Defesa Civil. Nesse sentido, o estudo objetiva avaliar a suscetibilidade a inundações e alagamentos no município de Juiz de Fora, Minas Gerais, de modo a subsidiar a gestão de riscos e a defesa civil municipal.

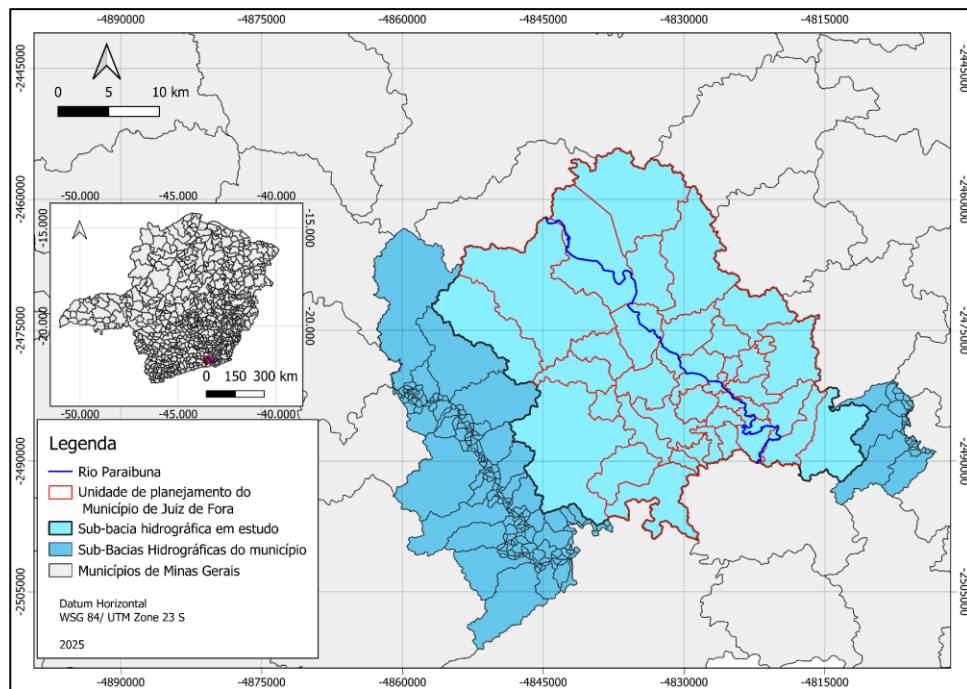
METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

O município de Juiz de Fora está localizado na região sudeste do estado de Minas Gerais, na Zona da Mata. Com área territorial de 1.435,749 km², o município contava, em 2022, com uma população de 540.756 habitantes e densidade demográfica de 376,64 hab./km² (IBGE, 2025), apresentando um acelerado processo de crescimento urbano nos últimos anos. O clima predominante é o tropical de altitude (Cwa), segundo a classificação de Köppen (1970), caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos mais secos e amenos (Juiz de Fora, 2021).

O relevo local é bastante dissecado, composto por colinas côncavo-convexas e vales, com altitudes variando entre 700 e 900 metros, típicas do Vale do Paraíba do Sul e dos contrafortes da Serra da Mantiqueira (Juiz de Fora, 2021). Do ponto de vista hidrológico, o rio Paraibuna é o principal corpo d'água que recebe os dejetos provenientes do município de Juiz de Fora (Souza e Ribeiro, 2020). Em sequência, na Figura 1, são apresentadas as sub-bacias delimitadas conforme o mapeamento da prefeitura de Juiz de Fora, segundo a extensão de planejamento do município.

Figura 1- Bacias hidrográficas de Juiz de Fora e delimitação da bacia em estudo



Análise de suscetibilidade a inundações e alagamentos: método AHP

O método AHP é uma metodologia amplamente utilizada na identificação das áreas suscetíveis à inundações e alagamentos pois fundamenta-se na álgebra linear e na geometria analítica para obter resultados ponderados que refletem, de forma coerente, a importância relativa de diversos fatores associados ao evento. O método desenvolvido por Thomas Lorie Saaty, na década de 70 busca formalizar a compreensão intuitiva de problemas complexos por meio da construção de uma estrutura conceitual hierárquica (Tedesco *et al.*, 2021). Nesse sentido, em sequência é apresentada a estruturação do estudo.

Definição dos critérios de avaliação

Definir os fatores de influência na suscetibilidade a inundações e alagamentos é a peça chave para a aplicação do método e dessa maneira, deve-se embasar na opinião de especialistas. Dessa forma, uma ampla revisão bibliográfica foi conduzida com a finalidade de identificar os fatores mais utilizados em trabalhos acadêmicos, no qual destacaram-se: (i) hipsometria, (ii) declividade, (iii) uso do solo e (iv) tipo de solo. Assim, estes foram definidos como fatores de mais influência para a ocorrência de inundações e alagamentos em Juiz de Fora.

Para a aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica em estudo, foi utilizada a base de dados do United States Geological Survey (USGS), com resolução espacial de 30 metros. Após a inserção do MDE no ambiente do QGIS, foram gerados o mapa de hipsometria e o raster de declividade, por meio da ferramenta Slope. Quanto aos dados de uso e ocupação do solo, foram utilizados raster disponibilizados pela plataforma MapBiomass. Já os dados referentes ao tipo de solo foram obtidos através do IDE-Sisema, a partir do mapa de solos de Minas Gerais, elaborado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), com escala de 1:650.000. Esse mapeamento permitiu a identificação macro das tipologias de solo presentes na sub-bacia hidrográfica analisada.

Em conformidade com as etapas do método AHP, a priori foram atribuídos pesos às classes de cada fator no software QGIS, variando de 0 a 1. Nessa escala, valores próximos de 0 indicam que a classe apresenta baixa influência ou contribuição para a ocorrência de inundações, enquanto valores próximos de 1 representam maior favorecimento à ocorrência desse fenômeno. Para essa atribuição, foi utilizada a ferramenta "Reclassify" disponível no menu Spatial Analyst do QGIS. O critério adotado para a definição dos pesos baseou-se em uma revisão bibliográfica, com destaque para os estudos de Rezende (2023) e Campos e Ribeiro (2020).

Construção da matriz pareada e sua normalização

Como segunda etapa da aplicação do método, os fatores condicionantes foram organizados em uma matriz de comparação pareada, na qual cada critério foi comparado diretamente com os demais. O preenchimento dessa matriz baseia-se em julgamentos comparativos conforme a metodologia proposta por Saaty (1977), que adota uma escala de valores predefinida (Tabela 1) para representar diferentes níveis de importância relativa entre os critérios.

Tabela 1 - Escala Fundamental de Importâncias dos critérios julgados pelo método AHP

Intensidade da importância (J)	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos os fatores contribuem igualmente para o fenômeno
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente um fator sobre o outro
5	Forte Importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente um fator sobre o outro
7	Importância muito forte	Um fator é muito fortemente favorecido em detrimento de outro; sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta ou extrema importância	A evidência favorecendo uma atividade sobre a outra é da mais alta ordem possível de afirmação
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma solução de compromisso entre duas definições

Fonte: adaptado de Saaty (1977)

Uma vez construída a matriz pareada, esta passa pelo procedimento de normalização para que os critérios adotados estejam em uma mesma escala. O procedimento consiste em efetuar a soma das colunas e, posteriormente, a dividir os valores de cada elemento pela soma de sua respectiva coluna, obtendo dessa forma a matriz normalizada.

Determinação do autovetor e cálculo do autovalor

De forma sequencial, calculou-se o autovetor (w), que representa, em forma matricial, os pesos atribuídos a cada critério conforme sua importância relativa na ocorrência de eventos de cheia. Para a obtenção do autovetor, é necessário o cálculo da média dos valores de cada linha da matriz normalizada. Essa etapa é essencial, pois o vetor resultante foi utilizado para combinar as camadas raster correspondentes a cada critério, possibilitando a geração do mapa de áreas suscetíveis a inundações e alagamentos. Além disso, para verificar a consistência lógica dos julgamentos realizados na matriz de comparação pareada, estima-se que o autovalor máximo (λ_{\max}) deve ser

aproximadamente igual ao número de linhas (n) da matriz, conforme demonstrado na Equação 1 a seguir:

$$\lambda_{\max} = T \times w \quad (1)$$

Em que T representa os pesos de grau de importância atribuídos à matriz, e w é o autovetor obtido.

Determinação da razão de consistência (RC)

O cálculo da razão de Consistência, prevista no método, permite avaliar se as comparações realizadas entre os critérios foram logicamente consistentes. Para calcular a RC, utiliza-se a razão entre o Índice de Consistência (IC) e o Índice Randômico (IR), conforme demonstrado na Equação 2 a seguir:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

O IC foi obtido por meio do produto vetorial da matriz de comparação pareada com o autovetor seguido do cálculo do Lambda (λ) através da razão entre o produto vetorial e o peso das variáveis (autovetor) e o cálculo do λ_{\max} descrito anteriormente e, finalmente pela aplicação da equação 3.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - N^{\circ} \text{ de critérios}}{N^{\circ} \text{ de critérios} - 1} \quad (3)$$

O valor do IR é obtido por meio da Tabela 2, que padroniza o índice conforme o número de fatores adotados (Saaty, 1991).

Tabela 2 - Índice randômico correspondente a ordem da matriz

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: adaptado de Saaty (1991)

Mapa de suscetibilidade a inundações e alagamentos

Para a confecção do mapa de suscetibilidade a inundações e alagamentos para o município de Juiz de Fora, o software QGIS foi novamente empregado, sendo feito o somatório de todos os raster dos fatores multiplicados pelos seus respectivos pesos de importância, utilizando a ferramenta raster calculator, conforme a Equação 4.

$$MR = (H \times w_h) + (D \times w_d) + (U \times w_u) + (T \times w_t) \quad (4)$$

Em que MR é o mapa resultante, H é a hipsometria, D se refere a declividade, U ao uso e ocupação do solo , T ao tipo de solo e w_h, w_d, w_u e w_t são os pesos de importância atribuídos a cada fator.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapa hipsométrico (Figura 2) mostra altitudes entre 717 e 842 metros, com áreas mais elevadas (até 966 m) no sul e leste da sub-bacia, caracterizadas por baixa declividade e propensas a alagamentos. As altitudes mais baixas (409 a 593 m), ao longo do rio Paraibuna, coincidem com áreas

urbanizadas e menor declividade, aumentando o risco de inundações. O mapa de declividade (Figura 3) revela predominância de relevo forte-ondulado (20 a 45%). As áreas mais planas concentram cursos d'água, represas e grande parte da zona urbana, especialmente o centro de Juiz de Fora, sendo mais vulneráveis a alagamentos, sobretudo nas zonas de expansão urbana.

O mapa de tipologia de solos (Figura 4) indica que três dos seis tipos identificados na sub-bacia de Juiz de Fora são mais propensos a inundações. Na área urbana, predominam os latossolos vermelho-amarelo distróficos (LVAd58, LVAd593) e o latossolo amarelo distrófico (LAd4), este último pertencente ao grupo hidrológico C, mais suscetível a alagamentos (Ageitec, 2021). Os LVAd ocorrem em terrenos bem drenados e planos a ondulados, enquanto os LAd têm boa retenção de umidade. Já os cambissolos hápicos (Cxbd) estão associados a relevo ondulado a montanhoso (Ageitec, 2021). Com relação ao mapa de uso e ocupação do solo (Figura 5), há predominância de áreas agropecuárias na sub-bacia analisada. A grande mancha de infraestrutura urbana apresenta alto peso de importância e as áreas florestadas, sobretudo próximas à mancha urbana, contribuem para a infiltração e redução do escoamento superficial, diminuindo o potencial de ocorrência de eventos de inundações e alagamentos. A distribuição espacial reforça a influência do uso do solo nos processos de escoamento e risco de inundações.

Figura 2 - Mapa hipsométrico do município de Juiz de Fora, Minas Gerais

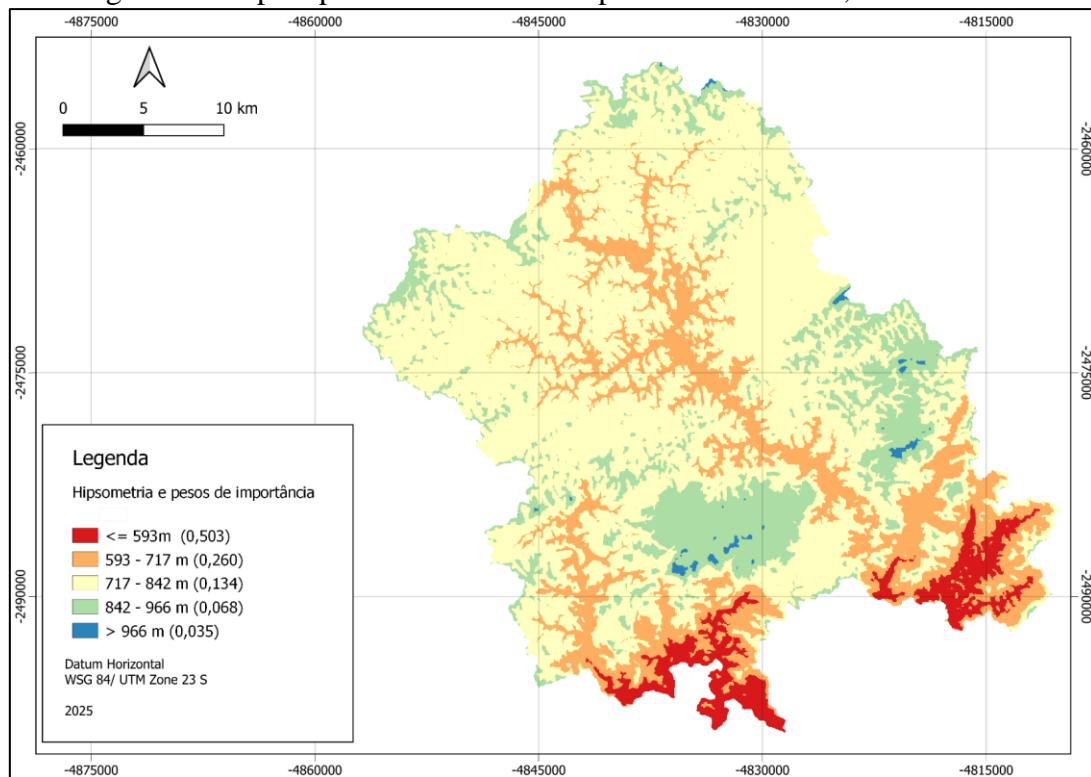


Figura 3 - Mapa da declividade do município de Juiz de Fora, Minas Gerais

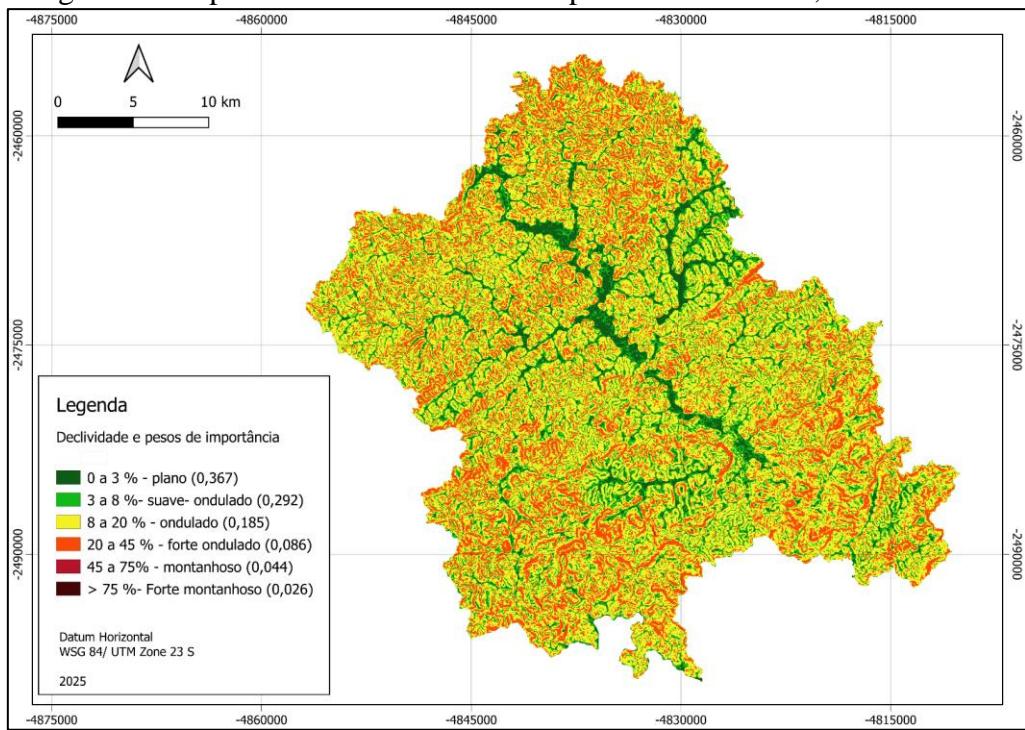


Figura 4 - Mapa da tipologia de solos do município de Juiz de Fora, Minas Gerais

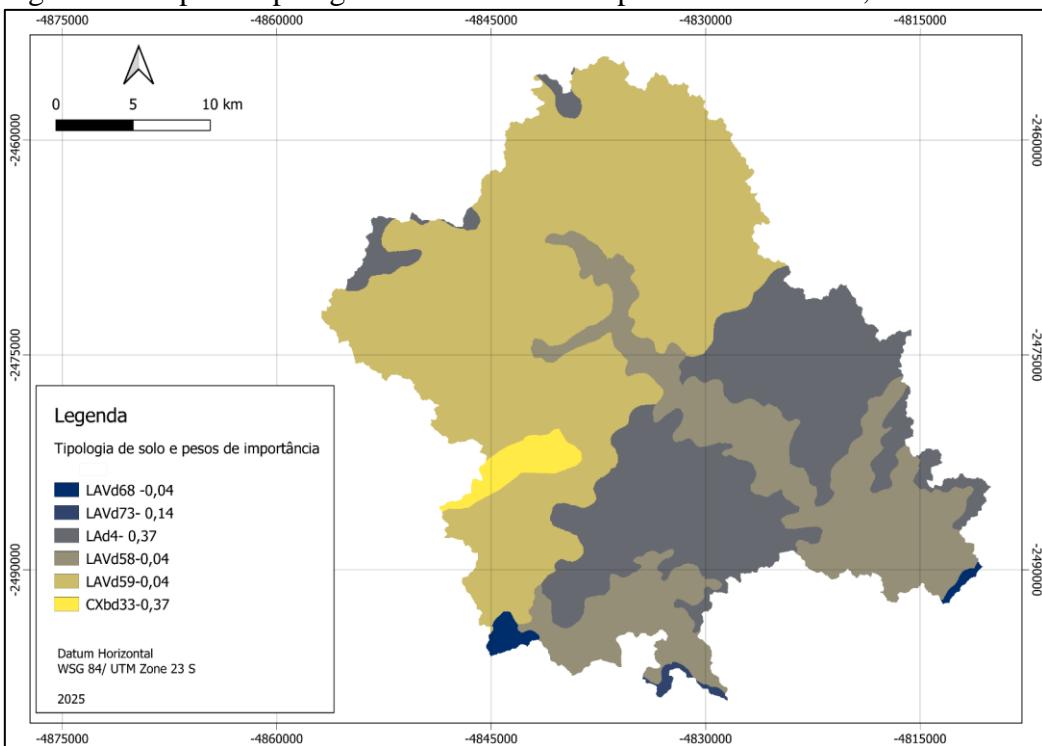
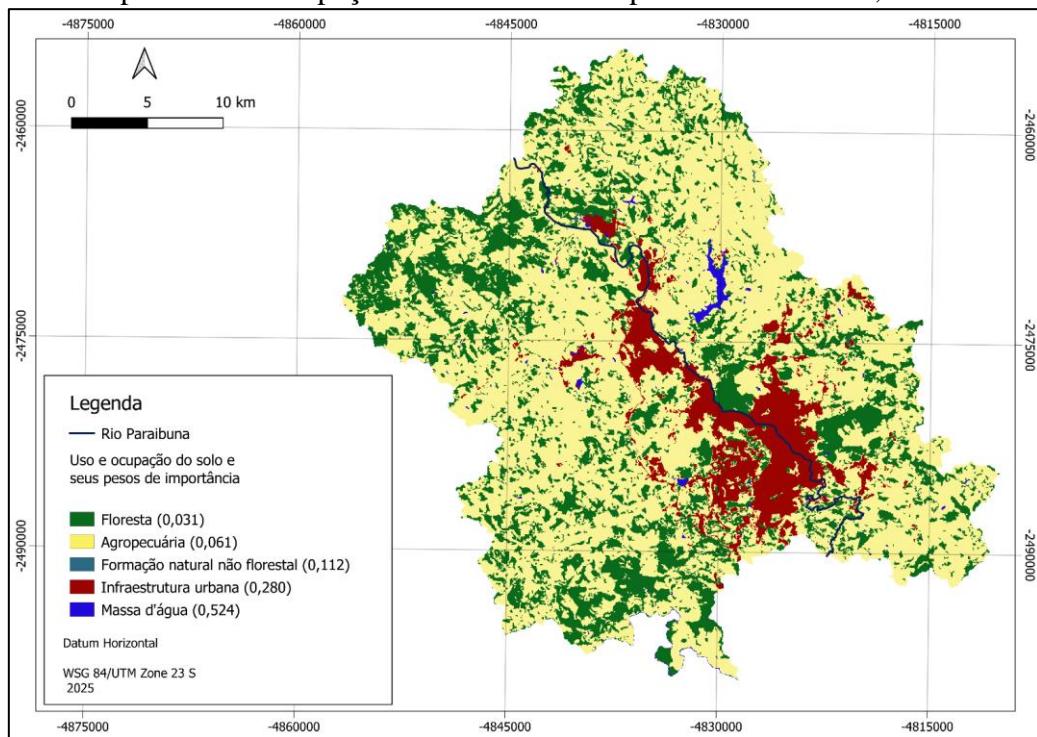


Figura 5 - Mapa de uso e ocupação do solo do município de Juiz de Fora, em Minas Gerais



Matriz pareada e autovetores determinados

Segundo a metodologia adotada, utilizou-se a matriz de comparação pareada elaborada por Rezende (2023) para avaliar os relacionamentos entre os fatores considerados. Essa matriz, apresentada na Tabela 4, inclui também a soma das colunas, etapa necessária para o cálculo dos pesos relativos. A partir dela, foram aplicados os procedimentos descritos na metodologia, cujos resultados estão organizados nas Tabelas 5, 6 e 7, representando, respectivamente, os pesos normalizados, equacionamentos para conferência da consistência dos julgamentos e o índice de consistência da análise.

Tabela 4 - Matriz pareada com a soma dos valores de cada uma de suas colunas

Inundação	Hipsometria	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo
Hipsometria	1	0,17	0,25	3
Declividade	6	1	0,50	8
Uso do solo	4	2	1	8
Tipo de solo	0,33	0,13	0,13	1
Soma	11,33	3,30	1,18	20

Tabela 5 - Matriz pareada normalizada

Inundação	Hipsometria	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo
Hipsometria	0,09	0,05	0,13	0,15
Declividade	0,53	0,30	0,27	0,40
Uso do solo	0,35	0,61	0,53	0,40
Tipo de solo	0,03	0,04	0,07	0,05
Soma	1	1	1	1

Tabela 6 - Equacionamentos para conferência de consistência dos julgamentos

Inundação	Autovetor	Produto vetorial	λ	λ máximo	Índice de consistência
Hipsometria	0,11	0,43	4,05	4,19	
Declividade	0,37	1,62	4,33		
Uso do solo	0,47	2,02	4,27		
Tipo de solo	0,05	0,19	4,09		
Soma	1				0,06

Tabela 7 - Resultado da razão de consistência

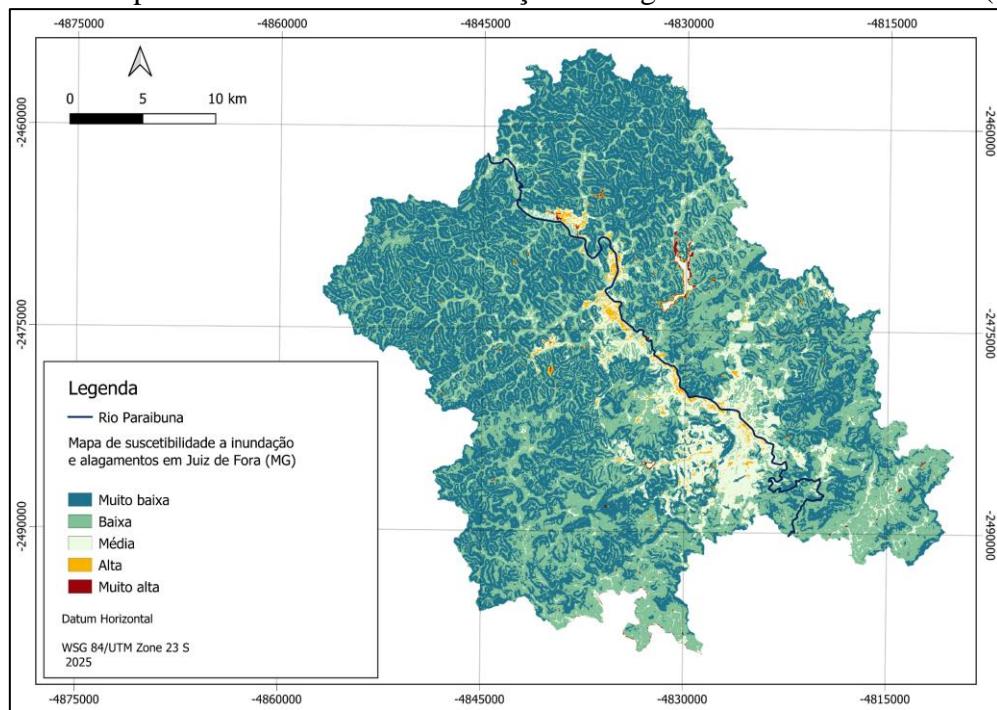
Lambda máximo	IC	IR	RC
4,19	0,06	0,9	0,06

A razão de consistência obtida foi inferior a 0,1, o que, de acordo com a literatura, indica que os julgamentos realizados são consistentes e apropriados para a análise proposta (Saaty, 1991)

Mapa de suscetibilidade a inundações e alagamentos

A análise das cinco classes de suscetibilidade a inundações, apresentadas na Figura 6, revela que as áreas com alta e muito alta suscetibilidade estão concentradas principalmente na cidade de Juiz de Fora, com destaque para a região central e os locais com presença de represas. Esses resultados estão em consonância com os mapas dos fatores analisados, especialmente o de declividade, que aponta a predominância de áreas com baixa inclinação nessas regiões. As áreas com suscetibilidade média predominam na parte central (urbana), bem como nas porções sul e leste da sub-bacia. Já as regiões com baixa e muito baixa suscetibilidade distribuem-se amplamente, também ao sul e leste, com destaque para sua expressiva presença na porção noroeste da sub-bacia. Constatase, portanto, que a ocupação urbana de Juiz de Fora ocorre em uma área fisicamente predisposta a inundações, agravada pelo avanço da urbanização e pela impermeabilização do solo.

Figura 6 - Mapa de suscetibilidade à inundações e alagamentos em Juiz de Fora (MG)



CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia AHP mostrou-se eficaz no mapeamento de áreas de suscetibilidade a inundações e alagamentos em Juiz de Fora (MG), por adotar uma abordagem multicriterial que incorpora fatores antrópicos relevantes na dinâmica de ocorrência de cheias. Nesse sentido, destaca-se seu potencial como ferramenta de apoio à gestão e à prevenção de eventos hidrológicos extremos em áreas urbanas, além de auxiliar na identificação de regiões prioritárias para intervenções e aprimoramento do sistema de drenagem urbana.

REFERÊNCIAS

- AGEITEC – Agência Embrapa de Informação Tecnológica. (s.d.). *Árvore do Conhecimento: Solos Tropicais. Cambissolos Háplicos*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos%20tropicais/sibcs/chave-do-sibcs>. Acesso em: 07 fev. 2025.
- CAMPOS, P.A.; RIBEIRO, C.R. (2020). *Avaliação da qualidade ambiental urbana da Bacia de contribuição da Represa de São Pedro – município de Juiz de Fora (MG)*. Monografia. Rede de Ensino Doctum, Unidade Juiz de Fora Dom Orione.
- DIAS, M.B.; GALINA, N.R.; ALVES, C.N. (2021). “Mapeamento da suscetibilidade a inundações em áreas urbanas: estudo de caso no município de Marabá, Sudeste do estado do Pará, Região Norte do Brasil”. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(6), pp. 347–359.
- G1. (2022). *Chuva em Juiz de Fora: temporal causa transtornos e alagamentos em vários bairros*. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2022/02/15/chuva-em-juiz-de-fora-temporal-causa-transtornos-e-alagamentos-em-varios-bairros.ghtml>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- GOERL, R.F.; MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M. (2017). “Mapeamento de áreas susceptíveis a inundações com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais”. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(1), pp. 61–69.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Cidades*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 fev. 2025.
- JUIZ DE FORA. Prefeitura Municipal de. (2021). *A cidade*. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/institucional/cidade/caracteristicas.php>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- KÖPPEN, W. (1970). *Roteiro para classificação climática*. Mimeo. 6 p.
- REZENDE, M.E.F.S. (2023). *Análise de suscetibilidade à inundação no município de Itabirito - MG*. Monografia (Graduação em Engenharia Urbana), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG.
- SAATY, T.H. (1977). “A scaling method for priorities in hierarchical structures”. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp. 234–281.
- SAATY, T.L. (1980). “The analytic hierarchy process (AHP)”. *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), pp. 1073–1076.
- SAATY, T.L. (1990). “How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process”. *European Journal of Operational Research*, pp. 9–26.
- SAATY, T.L. (1991). “Some mathematical concepts of the analytic hierarchy process”. *Behaviormetrika*, 18(29), pp. 1–9.
- SOUZA, C.D.S.; RIBEIRO, C.R. (2020). *Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do ribeirão das Rosas – Juiz de Fora (MG)*. Monografia. Rede de Ensino Doctum, Unidade Juiz de Fora.
- TEDESCO, A.M.; OLIVEIRA, G.A.; TROJAN, F. (2021). “Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 26, pp. 401–407.