ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS APLICADA AO RISCO DE INUNDAÇÕES URBANAS EM JOÃO MONLEVADE, MG

Aline Dias Lourdes Grijó[1]; José Eustáquio da Silva Júnior[2]; Rodrigo Guimarães dos Santos[3] & Fernando Neves Lima[4]

Palavras-Chave – Inundações urbanas, Análise de Árvore de Falhas, Infraestrutura verde.

INTRODUÇÃO

O Brasil permanece classificado como um dos países da América Latina mais afetados por desastres hidrológicos, com centenas de eventos severos de inundação registrados nas últimas décadas (EM-DAT, 2025). Relatórios sobre o estado do clima na América Latina e no Caribe apontam o país em posição de destaque continental em número de vítimas e de pessoas afetadas por desastres de origem hídrica (OMM, 2024), com prejuízos da ordem de dezenas de bilhões de dólares acumulados em anos de extremos climáticos (EM-DAT, 2025). As inundações e enxurradas continuam sendo a tipologia mais recorrente e danosa do país, com as regiões Sul e Sudeste concentrando historicamente mais da metade dos registros e da maior parcela dos prejuízos (CNM, 2024).

O processo de urbanização modifica de forma significativa o ciclo hidrológico natural: a substituição da vegetação por superfícies impermeáveis reduz a infiltração, aumenta o escoamento superficial e eleva os picos de vazão, favorecendo enchentes e alagamentos (Tucci, 2008). Medidas de controle podem ser estruturais, como bacias de amortecimento e canais de desvio, ou não estruturais, como zoneamento e sistemas de alerta; a literatura aponta que medidas estruturais isoladas tendem a criar falsa sensação de segurança, ao passo que a combinação de ambas reduz os prejuízos a um custo menor (Canholi, 2015).

O município de João Monlevade (MG), inserido na bacia do rio Doce, nas coordenadas geográficas 19°50'10" S e 43°07'39" W, a aproximadamente 110 km de Belo Horizonte (Silva, 2021), enfrenta alagamentos urbanos recorrentes associados a chuvas intensas, especialmente nos bairros próximos à usina siderúrgica e na área comercial do bairro Carneirinhos (Silva, 2021; Defesa, 2025).

Estudos, no entanto, não avançam para uma modelagem que relacione, de forma estruturada e quantitativa, as causas físicas do problema às suas consequências operacionais, nem que avalie formalmente a confiabilidade das barreiras de proteção disponíveis. Essa lacuna motiva o presente trabalho, que apresenta a Análise de Árvore de Falhas (FTA – Fault tree analysis), para avaliar o risco de inundação nas áreas comerciais e industriais de João Monlevade, considerando a infraestrutura verde e o sistema de alerta precoce como medidas de mitigação.

METODOLOGIA

Adotou-se abordagem quantitativa, estruturada em duas frentes complementares: (i) o Método Racional, para a estimativa comparativa do coeficiente de escoamento superficial (C) em dois cenários de impermeabilização do solo, mantendo a intensidade de chuva e a área de contribuição constantes para isolar o efeito da impermeabilização; (ii) Análise de Árvore de Falhas, técnica originária da engenharia de confiabilidade (Ferdous et al., 2009; Tixier et al., 2002).

1) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Campus Theodomiro Carneiro Santiago, Itabira/MG.
2) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Campus Theodomiro Carneiro Santiago, Itabira/MG.
3) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Campus Theodomiro Carneiro Santiago, Itabira/MG.
4) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Campus Theodomiro Carneiro Santiago, Itabira/MG.

A Análise de Árvore de Falhas é uma técnica dedutiva que parte de um evento indesejado, chamado de evento topo, e o decompõe em uma sequência lógica de eventos intermediários e básicos, conectados por portas lógicas do tipo E (AND) e OU (OR), até identificar a causa raiz do problema (Ferdous et al., 2009). A porta E representa uma condição em que todos os eventos de entrada precisam ocorrer simultaneamente para que o evento de saída se manifeste; a porta OU representa uma condição em que basta a ocorrência de qualquer um dos eventos de entrada. O resultado é uma representação gráfica que permite tanto identificar a causa raiz de uma falha já ocorrida quanto antecipar, de forma preventiva, os caminhos causais que levam a um evento adverso ainda não materializado.

Foram definidos dois cenários hidrológicos, parametrizados com base em Tucci (2008), Marchioni e Silva (2011) e Maryland (1999): um cenário atual, com impermeabilização de 75% a 100% (C = 0,85), refletindo a condição observada no eixo comercial e no entorno da usina; e um cenário proposto, com impermeabilização reduzida para 35% a 50% (C = 0,45), após a implantação hipotética de Soluções baseadas na Natureza (SbN), como pavimentos permeáveis, jardins de chuva e adensamento de arborização urbana.

A eficiência hidráulica foi calculada pela atenuação percentual pela equação:

$$H = [(C\ atual - C\ proposto) / C\ atual] \times 100 \quad (1)$$

A vazão de pico associada ao escoamento superficial foi estimada conceitualmente por meio da equação do Método Racional (Tucci, 2008):

$$Q = (C \times I \times A) / 3{,}6 \quad (2)$$

Em que Q é a vazão máxima (m³/s), C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional), I é a intensidade da chuva de projeto (mm/h) e A é a área de contribuição da bacia (km²).

A Árvore de Falhas foi estruturada a partir do evento topo “Inundação Crítica nas Áreas Comerciais e Industriais de João Monlevade”, desdobrado por porta OU em dois eventos intermediários, transbordamento do córrego Carneirinhos e saturação da drenagem urbana, ambos convergindo para o nó “perda crítica de infiltração do solo”, ao qual se atribuiu como probabilidade condicional os próprios valores de C calculados pelo Método Racional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação dos parâmetros do cenário atual resultou em C = 0,85 (15% de infiltração, 30% de evapotranspiração e 50% de escoamento direto), ao passo que o cenário proposto, com a implantação de SbN, reduziu o coeficiente para C = 0,45 (35% de infiltração, 35% de evapotranspiração e 30% de escoamento direto). A Tabela 1 resume os parâmetros adotados.

Tabela 1 – Parâmetros hidrológicos dos cenários atual e proposto.

Parâmetro	Cenário atual	Cenário proposto
Taxa de impermeabilização	75% a 100%	35% a 50%
Coeficiente de escoamento (C)	0,85	0,45
Infiltração estimada	15%	35%
Evapotranspiração estimada	30%	35%
Escoamento direto (runoff)	50%	30%

Aplicando a equação de atenuação:

$$H = [(0{,}85 - 0{,}45) / 0{,}85] \times 100 = 47{,}06\% \quad (3)$$

Obtendo-se uma redução de aproximadamente 47% no potencial de geração de escoamento superficial entre os dois cenários. Como a intensidade de chuva e a área de contribuição foram mantidos constantes, essa atenuação se traduz em redução proporcional do pico de vazão do Método Racional, sem que se possa, com os dados atualmente disponíveis, afirmar o valor absoluto de Q em

m³/s para a sub-bacia do Carneirinhos, lacuna discutida como limitação do estudo. Ainda assim, uma redução dessa magnitude tende a achatar o hidrograma de cheia, distribuindo o volume escoado ao longo de um intervalo de tempo maior.

A estrutura da Árvore de Falhas (Figura 1) mostra que o evento topo pode ser ativado por dois caminhos independentes, o transbordamento do córrego Carneirinhos que foi projetado para suportar uma vazão máxima de 62m^3/s conforme Silva (2021) e a saturação da drenagem, ambos convergindo para o mesmo conjunto de eventos básicos relacionados à perda de capacidade de infiltração do solo. Isso evidencia que a impermeabilização não é apenas um fator entre outros, mas o nó causal comum que alimenta simultaneamente as duas vias de falha: intervir sobre ela é estrategicamente mais eficiente do que atuar apenas sobre as consequências, pois interrompe simultaneamente os dois ramos da árvore.

No estudo de Silva (2021) identifica-se que chuvas com precipitação superior a 43 mm e duração acima de 3 horas e 10 minutos já são suficientes para originar inundações severas na bacia. O sistema de João Monlevade é considerado obsoleto por não suportar precipitação associadas a um tempo de retorno de 5 anos (TR 05). Uma chuva de TR 05 de 84,07 mm em 6 horas, produz vazões de pico entre 84,50 m^3/s e 138,30 m^3/s, excedendo significativamente o limite de projeto.

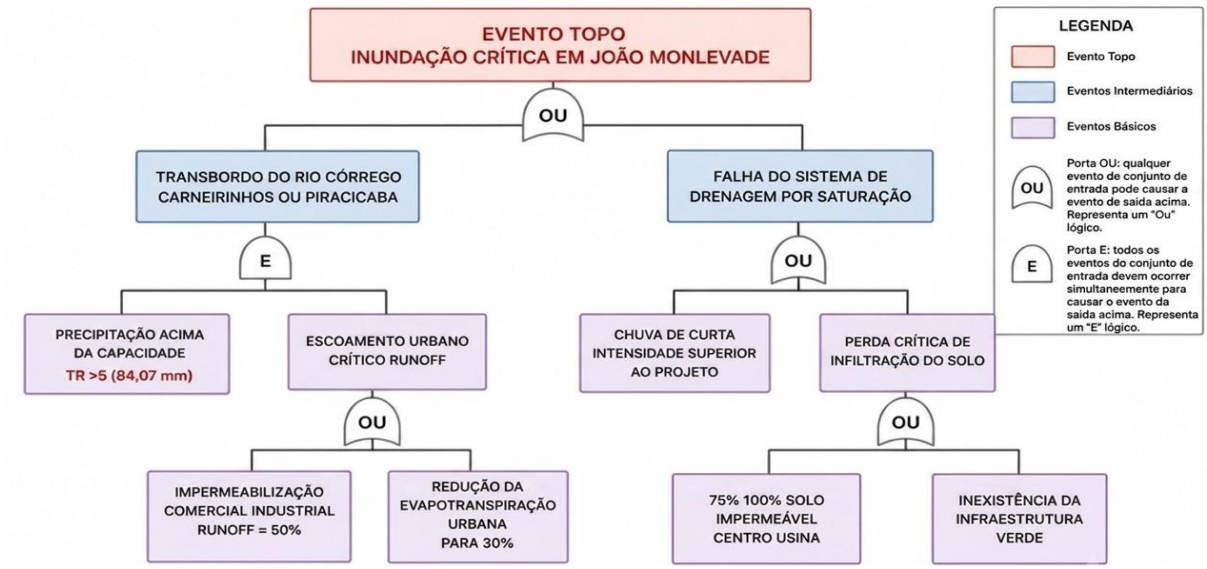


Figura 1. Árvore de Falhas para o evento topo “Inundação Crítica em João Monlevade”. Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

A impermeabilização do solo constitui a causa raiz comum aos dois caminhos de falha identificados na Árvore de Falhas, e sua redução por meio de Soluções baseadas na Natureza é capaz de diminuir em aproximadamente 47% o coeficiente de escoamento superficial.

Como limitações, destacam-se: os coeficientes de escoamento foram estimados a partir de faixas de referência da literatura, e não de medições de campo da bacia do Carneirinhos; a ausência de série fluviométrica e de levantamento topobatimétrico impediu o cálculo do pico de vazão em valores absolutos. Estudos futuros devem priorizar a calibração desses parâmetros com dados locais e a realização de simulados reais de evacuação, permitindo refinar o modelo e ampliar sua aplicação a outros municípios da bacia do rio Doce com desafios semelhantes de drenagem urbana.

REFERÊNCIAS

CANHOLI, A. P. (2015). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 384 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS - CNM. (2024). *O panorama desastres no Brasil: 2013 a 2023*. CNM, Brasília, 27 p.

DEFESA Civil mapeia mais de 100 pontos vulneráveis em Monlevade (2025). A Notícia Regional, João Monlevade, 31 jan. 2025.

EM-DAT. (2025). *The international disaster database.* Brussels: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université Catholique de Louvain.

FERDOUS, R.; KHAN, F. I.; VEITCH, B.; AMYOTTE, P. R. (2009). Methodology for computer-aided fault tree analysis. *Process Safety and Environmental Protection,* v. 87, n. 4, p. 217-226.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. (2011). *Pavimento intertravado permeável: melhores práticas.* ABCP. São Paulo/SP, 24 p.

MARYLAND (1999) *Low-impact development design strategies: an integrated design approach.* Largo: Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division, 150 p.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM (2024). *State of the climate in Latin America and the Caribbean 2023.* WMO, Geneva/Suiça, 41 p.

SILVA, J. J. R. (2021). *Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana do município de João Monlevade, MG.* Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua) – Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 164 f.

TIXIER, J.; DUSSERRE, G.; SALVI, O.; GASTON, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* v. 15, n. 4, p. 291-303.

TUCCI, C. E. M. (2008). Águas urbanas. *Estudos Avançados,* v. 22, n. 63, p. 97-112.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradecemos ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento. O(s) aluno(s) autores deste trabalho afirmam ter(em) utilizado ferramentas de Inteligência Artificial para a confecção da árvore de falhas, tendo total responsabilidade pelo conteúdo aqui utilizado, tendo total ciência de que se sujeita(m) as sanções administrativas e até criminais em caso de falsa declaração.