

VULNERABILIDADE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA FRENTE A RUPTURAS EM TRAVESSIAS POR EVENTOS DE CHEIA

Ricardo Domingos dos Santos Junior¹ ; Gustavo Lima de Barros²; Weslle da Rocha Silva³; Tainan Rodrigues Corrêa⁴; Ianca Peixoto Miranda⁵; Luís Eduardo Cintra⁶; Maria Mercedes Gamboa-Medina⁷

RESUMO - Eventos extremos de cheia podem comprometer sistemas de abastecimento de água, especialmente em travessias sujeitas a processos erosivos e instabilidades estruturais que podem levar a sua ruptura. Neste trabalho é proposta a avaliação da vulnerabilidade relativa desses elementos frente a rupturas, considerando tanto os impactos no abastecimento de água quanto o nível de ameaça em eventos de cheia. A metodologia proposta integra modelagem hidráulica em EPANET, modelagem hidrodinâmica em HECRAS, geoprocessamento e análise de decisão multicriterial com método AHP. Quatro critérios de vulnerabilidade são calculados para cada cenário de falha e o resultado é sintetizado em um Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH). É apresentada uma aplicação para um município brasileiro, para o qual os resultados permitiram identificar travessias prioritárias. Os resultados demonstram a importância da integração de diferentes critérios para avaliação de vulnerabilidade e da análise da propagação de impactos dos eventos extremos na infraestrutura de abastecimento de água.

Palavras-chave: Redes de distribuição, vulnerabilidade, infraestrutura urbana.

ABSTRACT - Extreme flood events can compromise water supply systems, especially in crossings subject to erosion and structural instabilities that can lead to their rupture. This paper proposes an assessment of the relative vulnerability of these elements to ruptures, considering both the impacts on water supply and the level of flood threat. The proposed methodology integrates hydraulic modeling in EPANET, hydrodynamic modeling in HECRAS, geoprocessing, and multicriteria decision analysis using the AHP method. Four vulnerability criteria are calculated for each failure scenario, and the result is synthesized into a Hydraulic Vulnerability Index (HVI). An application to a Brazilian municipality is presented, for which the results allowed the identification of priority crossings. The results demonstrate the importance of integrating different criteria for vulnerability assessment and analyzing the propagation of impacts of extreme events on water supply infrastructure.

Keywords: Distribution networks, vulnerability, urban infrastructure.

INTRODUÇÃO

Os eventos extremos, cuja ocorrência e intensidade aumentam no contexto de mudanças climáticas, constituem uma preocupação fundamental que requer estratégias de mitigação e adaptação, especialmente em áreas urbanas (WALSH *et al.*, 2011). A importância dos eventos extremos para a população de áreas urbanas não se restringe às afetações diretas, mas também ao potencial de impacto na infraestrutura urbana (ARRIGHI *et al.*, 2017), incluindo infraestrutura crítica como a de abastecimento de água. Ao analisar os tipos de eventos extremos, encontra-se que as enchentes afetam o maior número de pessoas em todo o mundo (UNISDR, 2015), e este trabalho tem como foco o impacto desses eventos sobre a infraestrutura de abastecimento de água urbana.

^{1,2,3,4,5,6,7} Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. São Carlense, 400 - Centro, São Carlos, 13566-590, São Paulo, Brasil. E-mails: ricardo.domingos.santos@usp.br, gustavo.barros@usp.br, rochaweslle@gmail.com, tainan@usp.br, iancapmiranda@usp.br, luis.cintradu@usp.br, mmgamboa@usp.br

Durante enchentes, é possível que aconteça a desestabilização dos solos, gerando deslocamentos diferenciais que promovem esforços nas tubulações. Dentre as consequências estão rupturas, vazamentos e possíveis eventos de contaminação da rede, que afetam a distribuição em áreas maiores do que as diretamente atingidas. De particular interesse são os trechos de tubulação que cruzam transversalmente cursos d'água.

A resiliência urbana requer a compreensão da vulnerabilidade das infraestruturas da rede, seu funcionamento e potencial de falha em caso de desastres naturais (ELEUTÉRIO; HATTEMER; ROZAN, 2013). Os recursos disponíveis para os gestores dos sistemas de abastecimento são limitados, portanto é necessário estar ciente dos riscos aos quais eles estão submetidos, de modo a alocar os recursos de forma eficiente (EIDSVIG; KRISTENSEN; VANGELSTEN, 2017). A identificação dos elementos do sistema mais vulneráveis e os impactos em caso de sua falha permite que seja feito um planejamento preventivo, adequando a infraestrutura ou desenvolvendo planos de emergência (ARRIGHI; PREGNOLATO; CASTELLI, 2021). Para o melhor entendimento da rede de abastecimento de água, o envolvimento de operadores e equipe técnica responsável é fundamental, mas têm limitações, sendo que a incorporação da modelagem computacional pode contribuir de forma decisiva.

A utilização de informação georreferenciada permite a junção de informações sobre os efeitos de cenários de eventos extremos com a informação da infraestrutura, uma estratégia importante para produzir análises que auxiliem ações para reduzir a vulnerabilidade do sistema (ELEUTÉRIO; HATTEMER; ROZAN, 2013). Especificamente, os resultados da modelagem hidrodinâmica de diferentes cenários de enchentes podem ser associados à localização dos componentes do sistema de abastecimento de água (BOWERING; PECK; SIMONOVIC, 2014). Dessa forma, a análise dos riscos que uma enchente pode trazer ao sistema de abastecimento de água requer análises em diversos níveis e modelos para capturar as dependências entre forças ambientais e os componentes do sistema de abastecimento, além das dependências internas do sistema de abastecimento (ARRIGHI *et al.*, 2017).

O presente trabalho apresenta uma análise sobre como rupturas em travessias potencialmente vulneráveis a eventos de cheia de cursos d'água podem afetar a distribuição de água, considerando a propagação dos impactos ao longo da rede de abastecimento. Para exemplificar a metodologia desenvolvida, ela é aplicada a um município brasileiro, com área de aproximadamente 1.000km^2 e população de cerca de 250.000 habitantes. Os cenários simulados representam condições extremas e conservadoras, adotadas com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade relativa dos elementos do sistema frente à falha de componentes, não devendo ser interpretados como previsões da ocorrência real das rupturas.

METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada para integrar modelagem hidrodinâmica, geoprocessamento e modelagem hidráulica, além de análise de decisão multicriterial, permitindo avaliar a vulnerabilidade de elementos do sistema de abastecimento de água frente a eventos extremos de cheia considerando possíveis rupturas em travessias da rede de distribuição de água.

Neste trabalho, a aplicação para um município brasileiro tem o objetivo de apresentar a metodologia, mas não de elaborar conclusões sobre a vulnerabilidade do sistema específico estudado, pelo qual detalhes particulares são deliberadamente omitidos. Adicionalmente, os cenários avaliados representam condições hipotéticas extremas, e os resultados não devem ser interpretados como previsão de ocorrência real das rupturas simuladas.

Modelagem do sistema de abastecimento

Para apresentar a metodologia proposta, o estudo foi aplicado ao sistema de abastecimento de água de um município brasileiro, cujo modelo hidráulico foi desenvolvido em trabalhos anteriores (BERNARDONI, 2025). O modelo está no formato de EPANET, e representa 1510km de tubulações, 29 mil junções, 3 captações superficiais, 68 reservatórios, 23 poços e 63 estações elevatórias.

Com base no modelo e na informação cartográfica, foram definidos 31 locais em que as tubulações da rede de abastecimento de água cruzam transversalmente acima de corpos de água, configurando travessias aéreas com potencial de ruptura, distribuídas ao longo do sistema de abastecimento. Foram analisados 31 cenários hidráulicos distintos, cada um contendo entre uma e seis rupturas simultâneas devido à ocorrência de travessias compostas por múltiplas tubulações (foram simuladas rupturas em um total de 49 tubulações). Os cenários hidráulicos foram gerados por meio de rotinas desenvolvidas em Python utilizando a biblioteca WNTR, produzindo arquivos hidráulicos no formato EPANET para cada condição simulada.

A representação hidráulica das rupturas foi realizada pela remoção do trecho original da tubulação e sua substituição por dois segmentos remanescentes conectados a um reservatório virtual de descarga por meio de válvulas de retenção unidirecionais. O reservatório foi posicionado na mesma cota do rio, simulando uma condição de descarga livre para a atmosfera. Essa configuração permitiu representar simultaneamente a saída de vazão pela ruptura, a perda de carga adicional nos trechos montante e a interrupção do abastecimento nos trechos jusante.

As simulações hidráulicas foram executadas utilizando o modo PDA (Pressure Driven Analysis), visando representar o comportamento da rede sob condições de baixa pressão, e simulação estática com consumos base médios nos nós. Para a avaliação dos impactos, as pressões nodais obtidas em cada cenário de ruptura foram comparadas às pressões da rede em operação normal (sem rupturas). Foram considerados afetados os nós que originalmente apresentavam pressão superior a 10mca e que, com a ruptura simulada, passaram a apresentar pressão inferior a esse limite, abaixo do qual não há garantia de atendimento pleno da demanda:

$$Afetado_i = VERDADEIRO \quad Se \quad (P_{base,i} > 10mca \quad e \quad P_{ruptura,i} < 10mca) \quad (1)$$

A comparação entre os cenários foi realizada por meio de rotinas desenvolvidas em Python, e os nós afetados foram posteriormente espacializados em ambiente SIG utilizando suas coordenadas originais.

Modelagem dos eventos de cheia

A modelagem hidrológico-hidráulica foi desenvolvida no HEC-RAS 2D utilizando o método de chuva diretamente aplicada sobre a malha computacional (Rain-on-Grid), usando informação do Modelo Digital de Terreno (MDT) do município obtido de trabalhos anteriores (BERNARDONI, 2025).

Foi considerado um evento de precipitação com período de retorno (TR) de 100 anos, adotando-se o mesmo TR utilizado no Plano de Drenagem Urbana existente para o município. A precipitação foi determinada pela formulação do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Governo do Estado de São Paulo (DAAE-CTH, 2018), adotando tempo de duração crítica de chuva igual 810 minutos, obtendo uma precipitação total de 123,0mm. A distribuição temporal da precipitação foi estabelecida com base na metodologia proposta de Huff adotando-se o padrão correspondente ao primeiro quartil. A chuva efetiva total foi estimada em 30,74mm, considerando perdas iniciais de 65mm, determinadas pelo método do Curve Number. Para essa estimativa, foi utilizado um valor ponderado de CN igual a 65, representativo das condições hidrológicas da área de estudo.

Dentre os principais resultados dessa modelagem estão a extensão da mancha de inundação e a distribuição das velocidades. Adotou-se o pressuposto de que maiores velocidades tendem a intensificar processos erosivos e esforços hidráulicos sobre as estruturas, aumentando potencialmente a suscetibilidade dessas infraestruturas a danos durante eventos extremos de cheia. Com isso, foram extraídas as velocidades máximas no trecho correspondente a cada uma das travessias analisadas, sendo esta a principal variável correlacionada com a estabilidade da estrutura.

Critério de avaliação da vulnerabilidade

A análise de vulnerabilidade aqui proposta tem como resultado principal a comparação entre as travessias analisadas, que pode orientar a priorização de estudos detalhados ou intervenções. Para permitir essa comparação, é proposto um Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH) (Eq. 4), calculado para cada travessia a partir da combinação de variáveis derivadas da hidráulica do sistema com variáveis resultantes da hidrodinâmica do evento de cheia. O índice permite sintetizar, em um único parâmetro adimensional, a severidade potencial dos impactos decorrentes das falhas nas travessias e o nível de ameaça de ruptura ao qual estariam expostas por eventos de cheia. O índice considerou quatro componentes principais, indicados na Tabela 1.

O índice de vulnerabilidade é definido pela combinação linear das quatro variáveis consideradas, seguindo o método de Análise Hierárquica de Processos, AHP. As variáveis utilizadas no índice foram previamente padronizadas pelo método Min-Max, ficando em uma escala adimensional entre 0 e 1 segundo a relação entre o valor observado em cada cenário e os valores mínimos e máximos obtidos para a variável entre todos os 31 cenários simulados, conforme apresentado na Equação 2.

$$X_{n,i} = \frac{X_i - X_{min,i}}{X_{max,i} - X_{min,i}} \quad (2)$$

Tabela 1: Variáveis utilizadas no Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH).

Variável	Descrição	Unidade
Área afetada (A)	Mancha de potencial desabastecimento, corresponde ao menor polígono que contém todos os nós afetados (eq. 1).	km ²
Economias afetadas (E)	Unidades consumidoras impactadas, que se encontram dentro das manchas de potencial desabastecimento	un
Vazão perdida (Q)	Vazão descarregada a través da ruptura, obtida na simulação hidráulica	L/s
Velocidade do escoamento (V)	Velocidade no curso d'água na seção da travessia, obtida por meio da modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS	m/s

em que X_n representa o valor padronizado da variável, X o valor observado no cenário analisado, X_{min} o menor valor observado e X_{max} o maior valor observado para a variável considerada.

Após a padronização das variáveis, foi aplicado o método AHP (Analytic Hierarchy Process), permitindo estabelecer diferentes níveis de importância entre os critérios analisados. Os pesos relativos foram definidos a partir de comparações por pares entre as variáveis consideradas no índice, utilizando a escala de importância proposta por Saaty (1980), na qual valores maiores indicam maior relevância relativa de um critério em relação aos demais. A Tabela 2 a seguir apresenta a matriz de comparação pareada utilizada no método AHP, bem como os pesos finais obtidos para cada variável considerada na composição do Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH).

Tabela 2: Matriz de comparação pareada e pesos finais obtidos pelo método AHP.

Critério	Vazão (Q)	Velocidade (V)	Economias (E)	Área (A)	Peso final
Vazão (Q)	1	0,2	0,2	3	0,106
Velocidade (V)	5	1	1	7	0,421
Economias (E)	5	1	1	7	0,421
Área (A)	0,333	0,143	0,143	1	0,052

Para verificar a consistência dos valores adotados, calculou-se a razão de consistência (RC), através da Equação 3.

$$RC = \frac{IC}{RI} = \frac{\lambda_{max} - n}{RI(n - 1)} \quad (3)$$

Sendo IC o índice de consistência e RI o índice de aleatoriedade, cujo valor é predeterminado com base no número de variáveis analisadas (n). Para este estudo foram analisadas 4 variáveis, portanto $RI = 0,9$. Já λ_{max} é o autovalor da matriz normalizada. Para os coeficientes utilizados, obtém-se um resultado final de $RC = 0,03$. Como o resultado é menor que 0,10, considera-se que a matriz está consistente.

A equação final do Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH), obtida a partir dos pesos cal-

culados pelo método AHP, foi definida conforme apresentado na Equação 4, em função das variáveis descritas na Tabela 1.

$$IVH = 0,052A + 0,421E + 0,106Q + 0,421V \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta foi aplicada para o município selecionado, mencionado na seção anterior. Salienta-se que essa aplicação é analisada como um caso para exemplo, e não é o objetivo neste trabalho obter conclusões sobre a vulnerabilidade desse sistema mas sobre a metodologia para quantificar o índice que permite priorizar os elementos de travessia.

Para cada cenário de ruptura foram determinadas a área afetada (A), economias afetadas (E), vazão perdida (Q), e velocidade de escoamento do rio (V). A Tabela 3 indica as estatísticas descritivas para a série de cada uma dessas variáveis, composta pelos resultados dos 31 cenários de ruptura. A seguir são brevemente comentados os resultados de cada tipo de modelagem, e posteriormente dos Índices de Vulnerabilidade calculados.

Tabela 3: Estatísticas descritivas para as variáveis analisadas nos 31 cenários de ruptura.

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Área afetada (km ²)	0,11	5,13	1,80	1,30
Economias afetadas (un)	90	6873	2791,42	2385,26
Vazão perdida (L/s)	5,73	661,66	144,04	140,81
Velocidade do escoamento (m/s)	0,15	5,84	1,99	1,38

Resultados da modelagem dos eventos de cheia

Como principal resultado da modelagem hidrodinâmica, a Figura 1 a seguir apresenta as manchas de inundação, bem como as velocidades máximas do escoamento nos pontos de travessia, obtidas a partir da modelagem hidrodinâmica desenvolvida no HEC-RAS.

Os resultados evidenciaram, além do comportamento geral esperado quanto a manchas de inundação e velocidades, a influência das retenções hidráulicas promovidas pelos barramentos existentes, que contribuíram para a atenuação local do escoamento superficial e para alterações no padrão de propagação das lâminas d'água. A distribuição espacial das velocidades apresentou elevada variabilidade ao longo da área modelada, comportamento associado tanto a aspectos numéricos quanto físicos/hidráulicos do modelo.

As travessias consideradas nos cenários de ruptura apresentaram associação predominante com regiões de maior velocidade do escoamento. Em 5 dos cenários foram observadas velocidades superiores a 3,0m/s, indicando maior potencial de erosão e instabilidade estrutural nas travessias associadas. O cenário R016 apresentou a maior velocidade do conjunto analisado (5,84m/s). Apesar disso, verificou-se que velocidades elevadas não implicaram necessariamente nos maiores impactos operaci-

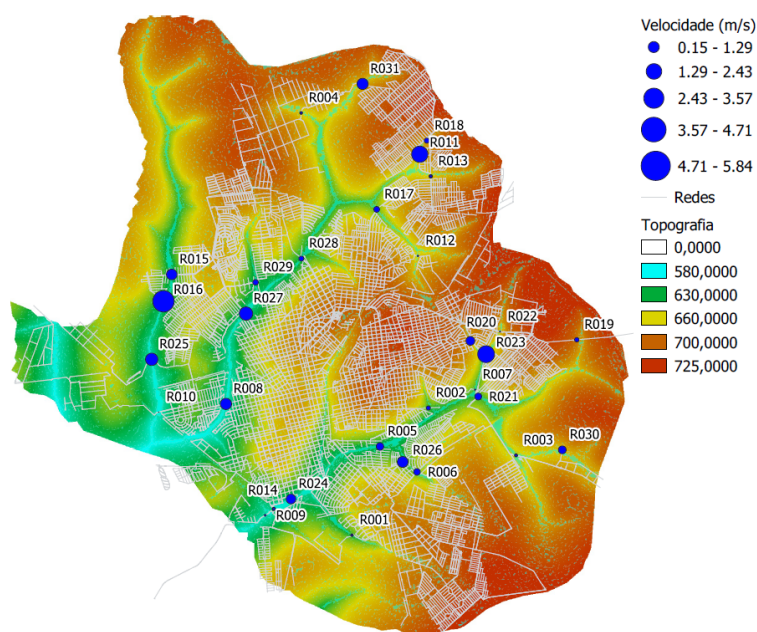


Figura 1: Manchas de inundação e velocidades nas travessias

onais, evidenciando que a vulnerabilidade do sistema depende também do funcionamento hidráulico do elemento na rede de abastecimento.

Resultados da modelagem do sistema de abastecimento

A Figura 2a apresenta as manchas potenciais de desabastecimento obtidas para os cenários simulados e a área associada, e a Figura 2b o número de economias afetadas em cada cenário. Ressalta-se que a região indicada em 2a é a sobreposição das manchas de desabastecimento para cada um dos 31 cenários de ruptura simulados individualmente, e não a mancha de desabastecimento caso todas as rupturas ocorressem simultaneamente.

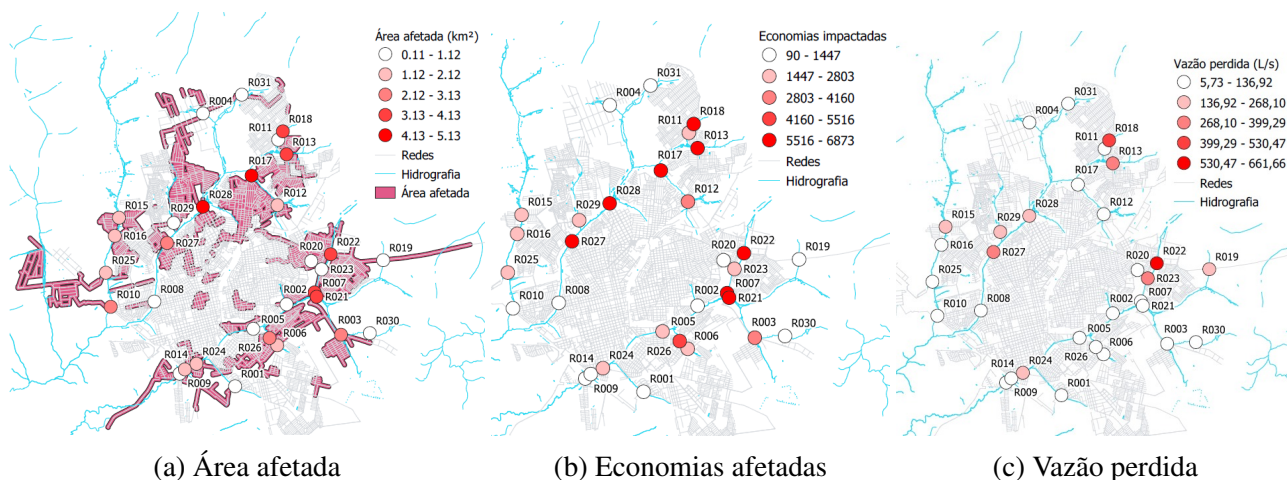


Figura 2: Variáveis obtidas usando os resultados da simulação hidráulica para todos os cenários de ruptura

Os resultados de área e número de economias afetadas são simultaneamente altos em alguns dos cenários. O cenário R017, por exemplo, apresentou o maior número de economias afetadas (6.873 unidades) e também o segundo maior valor de área ($4,2\text{km}^2$). Em outros casos, porém, essa correspondência não aparece, por conta de grandes diferenças na densidade de ocupação. Observou-se ainda concentração das maiores manchas de desabastecimento em regiões centrais do sistema.

Quanto à vazão perdida pela ruptura, alguns cenários apresentaram elevada vazão descarregada sem resultar em grandes áreas de desabastecimento. Por exemplo, o cenário R002, associado à ruptura de uma adutora de grande porte, apresentou a maior vazão descarregada entre todos os cenários simulados ($661,7\text{L/s}$), porém com reduzida área afetada ($0,14\text{km}^2$) e baixo número de economias impactadas (166un). Apesar da reduzida mancha inicial observada, rupturas dessa natureza podem comprometer significativamente o abastecimento em períodos prolongados de operação, especialmente devido à possibilidade de esgotamento progressivo de reservatórios. Por utilizar simulações estáticas, os resultados apresentados neste trabalho não contemplam esses efeitos posteriores.

Índice de Vulnerabilidade Hidráulica

Aplicando a Equação 4, o Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH) foi calculado para cada um dos 31 cenários de falha. A Figura 3 apresenta a distribuição espacial dos valores obtidos para todos os cenários analisados.

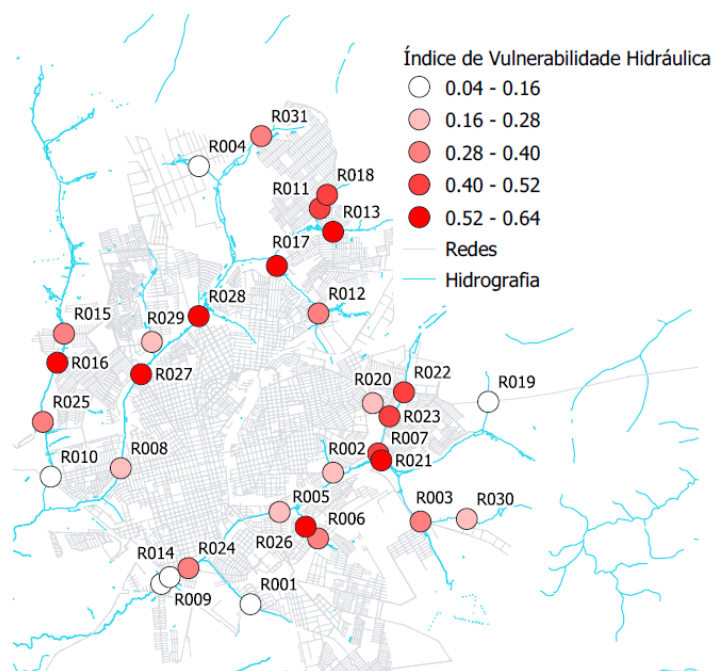


Figura 3: Índice de Vulnerabilidade Hidráulica

Os maiores valores do IVH foram observados nos cenários R027 (0,642), R016 (0,622) e R021 (0,615). Esses resultados evidenciam que diferentes combinações entre impacto operacional e intensidade da ameaça podem produzir elevados níveis de vulnerabilidade. O cenário R027 apresentou um comportamento equilibrado, combinando o oitavo maior número de economias afetadas com a

quarta maior velocidade de escoamento. O cenário R016 destacou-se por apresentar a maior velocidade entre todos os casos analisados, enquanto o cenário R021 apresentou o terceiro maior número de economias afetadas. Esses resultados reforçam que o IVH não depende exclusivamente do maior valor de uma única variável, mas da combinação dos diferentes critérios considerados no índice.

O efeito de cada uma das variáveis está determinado, como esperado, pelos resultados do método AHP, que destaca uma das variáveis relativa ao impacto operacional da possível ruptura (número de economias afetadas) e uma variável relacionada com o grau de ameaça que a travessia enfrenta em relação a enchentes (velocidade do escoamento).

É interessante observar, porém, que um alto valor em qualquer das quatro variáveis não corresponde necessariamente com um maior índice de vulnerabilidade. Somado à não correlação absoluta entre as variáveis, esse resultado permite observar que o IVH carrega adequadamente informações sobre a vulnerabilidade tanto pelo impacto da ruptura quanto pelo nível de ameaça.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma metodologia integrada para avaliação da vulnerabilidade de redes de abastecimento de água frente a rupturas em travessias relacionadas a eventos extremos de cheia, combinando modelagem hidrodinâmica, modelagem hidráulica, geoprocessamento e análise de decisão multicriterial. Foi mostrado que a aplicação da metodologia permite identificar travessias relativamente mais vulneráveis e analisar a propagação espacial dos impactos decorrentes da falha dessas infraestruturas.

Os resultados demonstraram que a vulnerabilidade das travessias não depende exclusivamente da magnitude das rupturas e nem da magnitude do curso d'água que atravessam, mas principalmente da configuração (conectividade e operação) da rede de abastecimento em combinação com as características do escoamento durante os eventos extremos.

A utilização do Índice de Vulnerabilidade Hidráulica (IVH) mostrou-se adequada para sintetizar diferentes critérios hidrodinâmicos, hidráulicos, geográficos e operacionais em um único indicador, permitindo comparar cenários e identificar travessias prioritárias para estudos detalhados, ações preventivas, monitoramento e planejamento operacional. Os resultados também evidenciaram a importância da incorporação de variáveis hidrodinâmicas associadas aos cursos d'água, considerando que velocidades elevadas de escoamento estão relacionadas ao aumento da suscetibilidade estrutural das travessias.

Por fim, destaca-se que os cenários simulados representam condições hipotéticas extremas e conservadoras, não devendo ser interpretados como previsões de falha, que requereriam outros estudos mais detalhados. A abordagem proposta constitui uma ferramenta para apoiar estratégias de adaptação e aumento da resiliência de sistemas de abastecimento frente a eventos hidrológicos extremos, contribuindo para o planejamento preventivo e para a gestão de infraestruturas críticas urbanas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ARRIGHI, C.; PREGNOLATO, M.; CASTELLI, F. Indirect flood impacts and cascade risk across interdependent linear infrastructures. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 21, n. 6, p. 1955–1969, jun. 2021. ISSN 1561-8633. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/21/1955/2021/>>.
- ARRIGHI, C. *et al.* Flood impacts on a water distribution network. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, n. 12, p. 2109–2123, dez. 2017. ISSN 1561-8633. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/17/2109/2017/>>.
- BERNARDONI, B. **Modelagem hidráulica do sistema completo de abastecimento de água do município de Araraquara (SP) integrada em sistemas de informação geográfica (SIG)**. 2025. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2025.
- BOWERING, E. A.; PECK, A. M.; SIMONOVIC, S. P. A flood risk assessment to municipal infrastructure due to changing climate part I: methodology. **Urban Water Journal**, v. 11, n. 1, p. 20–30, jan. 2014. ISSN 1573-062X, 1744-9006. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2012.758293>>.
- DAAE-CTH. **PRECIPITAÇÕES INTENSAS NO ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo, 2018.
- EIDSVIG, U. M. K.; KRISTENSEN, K.; VANGELSTEN, B. V. Assessing the risk posed by natural hazards to infrastructures. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 481–504, mar. 2017. ISSN 1561-8633. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/17/481/2017/>>.
- ELEUTÉRIO, J.; HATTEMER, C.; ROZAN, A. A systemic method for evaluating the potential impacts of floods on network infrastructures. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 4, p. 983–998, abr. 2013. ISSN 1561-8633. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/13/983/2013/>>.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1980.
- UNISDR. **The Human Cost of Weather Related Disasters 1995–2015**. Geneva: [s.n.], 2015. Acesso em: 15 maio 2026. Disponível em: <https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf>.
- WALSH, C. L. *et al.* Assessment of climate change mitigation and adaptation in cities. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning**, v. 164, n. 2, p. 75–84, jun. 2011. ISSN 1755-0793, 1755-0807. Disponível em: <<http://www.emerald.com/jurdp/article/164/2/75-84/411737>>.