

NÃO ESTACIONARIEDADE DA CHUVA E IMPLICAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA DRENAGEM URBANA EM MUNICÍPIOS PAULISTAS

Abderraman R. Amorim Brandão^{1}; Maria A. R. A. Castro²; Mateo H. Sánchez¹; Marcus N. Gomes Jr.³; Igor C. M. Vaz⁴; Eneir Ghisi⁴; Jamil A. A. Anache¹; Paulo Tarso S. Oliveira^{1,5}; Eduardo M. Menciondo¹; André S. Ballarin¹*

RESUMO – A não estacionariedade dos extremos de precipitação tem desafiado o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas baseado exclusivamente em séries históricas. Este estudo avaliou, como mudanças projetadas na precipitação podem afetar os custos de implantação de bueiros celulares no Estado de São Paulo. Foram utilizadas projeções do conjunto CLIMBra, com 19 modelos climáticos CMIP6, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. As chuvas de projeto foram estimadas pela distribuição GEV e propagadas para uma bacia hipotética, com área de 3 km², CN = 98 e duração crítica de 1 h, utilizando o método NRCS-CN. Os resultados indicam que os custos de implantação apresentam resposta espacialmente heterogênea às mudanças projetadas na precipitação extrema. No cenário SSP2-4.5, os aumentos permanecem predominantemente moderados no futuro imediato, especialmente para TR = 25 anos, com 68% dos municípios apresentando acréscimos de até 10%. Sob SSP5-8.5, os impactos tornam-se mais expressivos para TR = 100 anos, com o percentil 90 das projeções indicando acréscimos iguais ou superiores a 60% em parte dos municípios. Essa diferença evidencia que a adoção de fatores uniformes de majoração pode subestimar os custos futuros em localidades mais sensíveis a precipitação.

Palavras-chave – mudanças climáticas; precipitação extrema; resiliência climática

ABSTRACT– Nonstationarity in precipitation extremes has challenged the design of hydraulic infrastructure based exclusively on historical records. This study evaluated how projected changes in precipitation may affect the construction costs of box culverts in the State of São Paulo, Brazil. Projections from the CLIMBra dataset, comprising 19 CMIP6 climate models, were used under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Design rainfall depths were estimated using the GEV distribution and propagated to a hypothetical catchment with a drainage area of 3 km², CN = 98, and a critical duration of 1 h, using the NRCS-CN method. The results indicate that construction costs vary spatially in response to projected changes in extreme precipitation. Under SSP2-4.5, cost increases remain predominantly moderate in the near future, especially for the 25-year return period, with 68% of municipalities showing increases of up to 10%. Under SSP5-8.5, impacts become more pronounced for the 100-year return period, with the 90th percentile of projections indicating increases of 60% or more in some municipalities. This difference highlights that the adoption of uniform uplift factors may underestimate future costs in locations more sensitive to changes in precipitation.

Key-words – climate change; extreme precipitation; climate resilience

¹) Universidade de São Paulo, *abderraman.brandao@usp.br

²) Universidade do Arizona

³) Universidade Stanford

⁴) Universidade Federal de Santa Catarina

⁵) Universidade da Carolina do Norte em Charlotte

INTRODUÇÃO

Mudanças recentes nos extremos hidroclimáticos têm desafiado a premissa de estacionariedade que tradicionalmente orienta o planejamento e o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas (Milly et al., 2008). Essa premissa torna-se ainda mais frágil em contextos marcados por alterações no uso e cobertura da terra, modificações em canais de drenagem e mudanças climáticas de origem antropogênica (Milly et al., 2008). Entre os principais impactos observados e projetados, destacam-se o aumento da temperatura, a intensificação de eventos extremos de precipitação, a maior frequência e severidade de inundações, secas prolongadas e alteração do ciclo hidrológico. Nessas condições, a adoção de padrões de projeto baseados exclusivamente em séries históricas pode aumentar o risco de falhas, danos econômicos e perda de funcionalidade de sistemas de infraestrutura hídrica (Neumann et al., 2015; Martel et al., 2021; Dottori et al., 2023).

Embora diversos estudos tenham proposto estratégias para incorporar mudanças climáticas ao dimensionamento hidrológico, como fatores percentuais fixos, ajustes adaptativos, escalonamento baseado na relação de Clausius–Clapeyron e curvas IDF futuras derivadas de projeções climáticas (Martel et al., 2021; Wasko et al., 2024), grande parte da literatura ainda permanece centrada na precipitação. No entanto, mudanças na intensidade da chuva não se propagam de forma linear para o escoamento superficial, a capacidade hidráulica necessária ou os custos de implantação, pois esses efeitos também dependem das características da bacia, dos processos hidrológicos e das condições locais de drenagem (Sharma et al., 2018; Wasko et al., 2019). Assim, ainda há uma lacuna importante na quantificação de como a não estacionariedade da precipitação extrema se traduz em exigências práticas de projeto hidráulico, como aumento da capacidade de condução, alteração das dimensões de bueiros e impactos nos custos de construção, especialmente em municípios brasileiros.

Nesse contexto, o Estado de São Paulo representa um caso relevante para avaliação, pois combina elevada urbanização, forte heterogeneidade hidroclimática, importância econômica e déficits persistentes em infraestrutura de drenagem urbana (Haddad; Teixeira, 2015; Mendes et al., 2024). Além disso, eventos com períodos de retorno relativamente baixos podem exceder com maior frequência a capacidade dos sistemas de drenagem sob condições climáticas futuras, reforçando a necessidade de traduzir projeções de chuva extrema em informações úteis para o planejamento. Assim, este estudo tem como objetivo realizar uma análise exploratória de primeira ordem sobre como condições não estacionárias de precipitação podem afetar requisitos de dimensionamento hidráulico e custos de construção. Para isso, utilizam-se bueiros como estruturas representativas de

drenagem urbana, considerando diferentes períodos de retorno, cenários de emissão e projeções de 19 modelos climáticos. As análises apresentadas neste resumo expandido derivam de resultados previamente publicados por Brandão et al. (2026), sendo aqui sintetizadas com foco nas implicações da não estacionariedade da precipitação para os custos de implantação de bueiros celulares.

METODOLOGIA

Área de estudo e base de dados

O estudo foi desenvolvido para o Estado de São Paulo, que possui aproximadamente 248.000 km², 645 municípios e cerca de 46 milhões de habitantes (IBGE, 2022). As projeções de precipitação foram obtidas a partir do conjunto CLIMBra (Ballarin et al., 2023), que reúne 19 modelos climáticos CMIP6 corrigidos por viés para o Brasil, considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Foram analisados três períodos: histórico e futuro distante. Para cada célula de grade e período de análise, extraíram-se os máximos anuais de precipitação diária, aos quais foi ajustada a distribuição Generalized Extreme Value (GEV), utilizada para estimar chuvas de projeto associadas aos períodos de retorno de 25 e 100 anos. Os períodos de retorno de 25 e 100 anos foram selecionados por representarem níveis contrastantes de proteção, desde condições usuais de projeto até eventos mais extremos. Os valores estimados foram posteriormente agregados para a escala municipal por média ponderada pela área. A distribuição de Gumbel também foi avaliada como referência de sensibilidade, por sua ampla utilização em práticas brasileiras de drenagem, mas os cálculos principais foram baseados na GEV.

Transformação chuva–vazão e dimensionamento hidráulico dos bueiros

Para isolar o efeito das mudanças na precipitação sobre a vazão de projeto, adotaram-se bacias hipotéticas padronizadas em todos os municípios. Essa estratégia permitiu comparar os impactos climáticos sem introduzir diferenças locais de morfometria, uso do solo ou características hidráulicas. Foram consideradas áreas de drenagem de 3 km² e valores de CN igual a 98, representando condições de bacias altamente impermeabilizadas. A transformação chuva–escoamento foi realizada pelo método NRCS-CN, adotando $\lambda = 0,05$, em consonância com evidências recentes que indicam melhor desempenho desse valor em comparação ao valor clássico de $\lambda = 0,20$ (Hawkins et al., 2009; Brandão et al., 2025). Como as projeções climáticas estavam em escala diária, as chuvas subdiárias de 1 h foram obtidas a partir de fatores de desagregação espacialmente variáveis derivados do GRIDF-BR (Gomes Júnior, 2026).

As vazões de pico foram estimadas pelo hidrograma unitário triangular do NRCS, assumindo que a duração crítica da chuva é aproximadamente igual ao tempo de concentração da bacia. Assim, para a duração de 1 h, adotou-se $T_c = D$, com tempo de retardo calculado por $T_{lag} = 0,60T_c$. Em seguida, as vazões de projeto foram utilizadas para dimensionar bueiros celulares de concreto, considerando seções quadradas comerciais com $B = H$ variando de 1,0 a 4,0 m. A declividade longitudinal foi fixada em 0,01, o coeficiente de Manning em 0,015 e a análise foi expressa por metro linear de bueiro. Quando uma única célula não atendia à vazão de projeto, permitiu-se o uso de linhas paralelas, aplicando-se uma redução conservadora de 5% na capacidade para cada linha adicional.

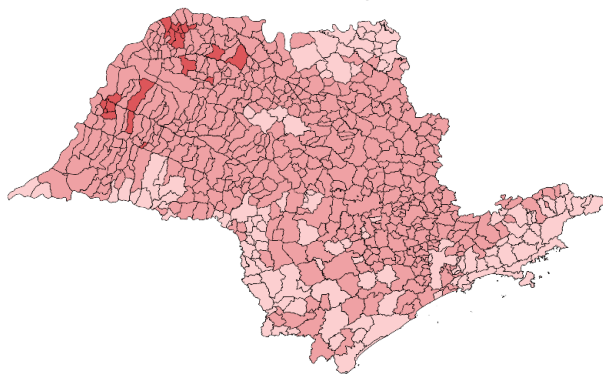
Custos de construção

Por fim, os custos de construção foram estimados com base em uma composição padronizada de serviços típicos de implantação de bueiros, expressos por metro linear. Os preços unitários foram obtidos de bases oficiais brasileiras, incluindo SINAPI, SICRO e SIURB. Aos custos diretos foi aplicado um BDI de 21,33%, conforme referência do Tribunal de Contas da União (TCU, 2013), permitindo comparar os impactos das mudanças climáticas sobre as dimensões hidráulicas requeridas e os custos associados de implantação.

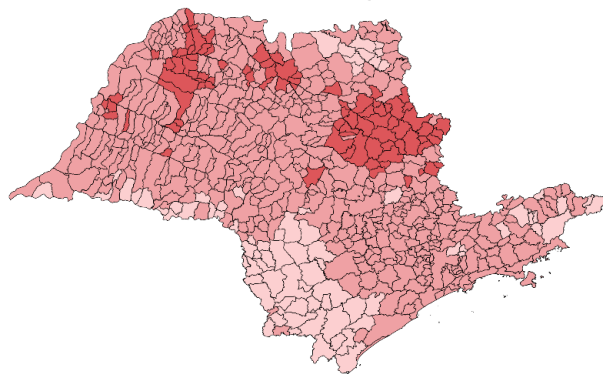
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1 e 2 é apresentado que a não estacionariedade da precipitação pode alterar os custos de implantação de bueiros celulares mesmo sob uma configuração hidrológica padronizada. A análise foi feita para uma bacia hipotética altamente impermeabilizada, com $CN = 98$, área de drenagem de 3 km² e duração crítica de 1 h, permitindo isolar a variabilidade espacial associada às projeções climáticas. Essa abordagem é coerente com estudos que utilizam bacias hipotéticas ou padronizadas para separar o sinal climático das características locais da bacia e, em seguida, propagar esse sinal para vazões de projeto, dimensões hidráulicas e custos de infraestrutura (Cook et al., 2020; Sharma et al., 2021; Doulabian et al., 2023). Além disso, a escolha de uma duração curta é relevante para drenagem urbana, pois extremos subdiários tendem a controlar o dimensionamento de estruturas menores e são particularmente sensíveis ao aquecimento climático (Ragno et al., 2018; Schlef et al., 2023; Wasko et al., 2024).

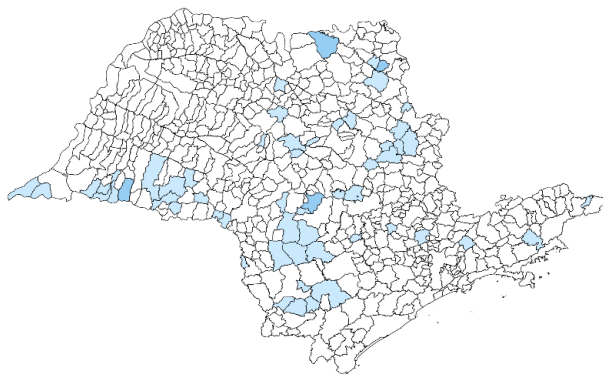
a) Média entre modelos | TR = 25 anos



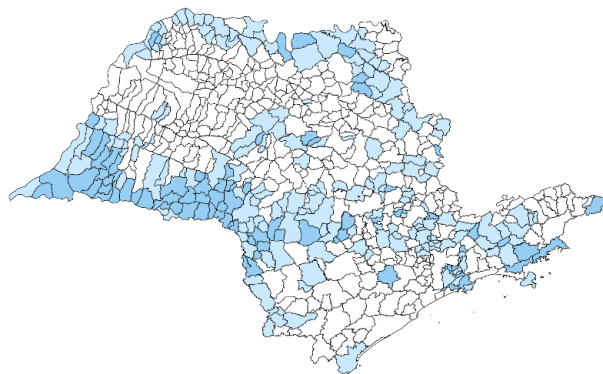
b) Média entre modelos | TR = 100 anos



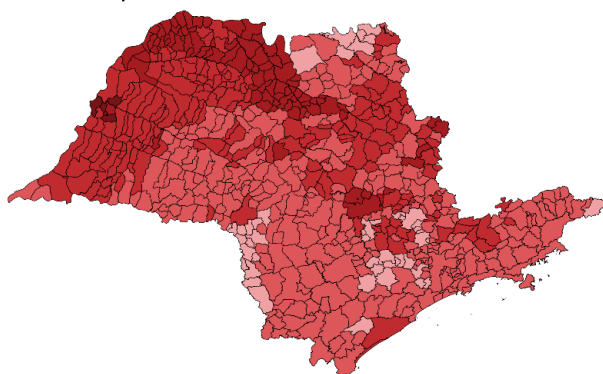
c) P10 | TR = 25 anos



d) P10 | TR = 100 anos



e) P90 | TR = 25 anos



f) P90 | TR = 100 anos

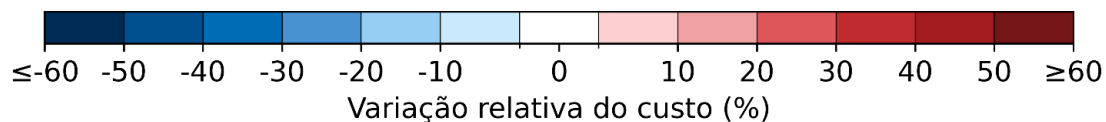
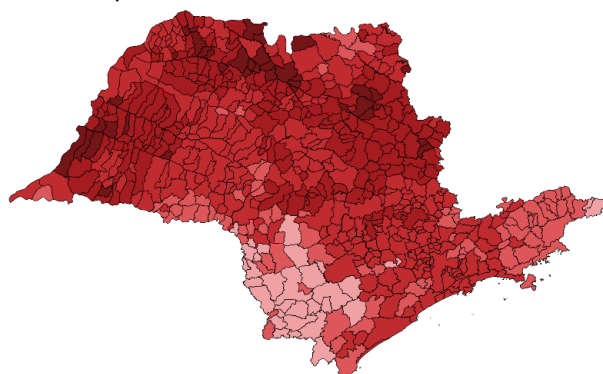
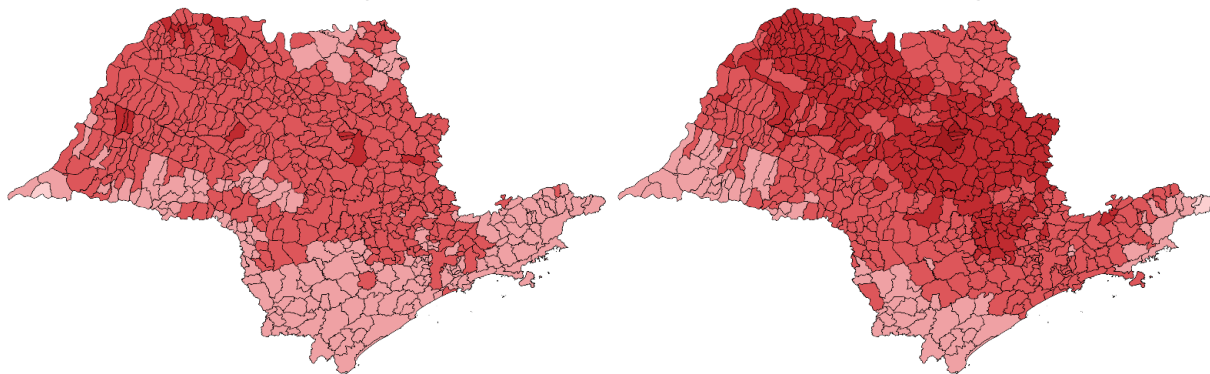


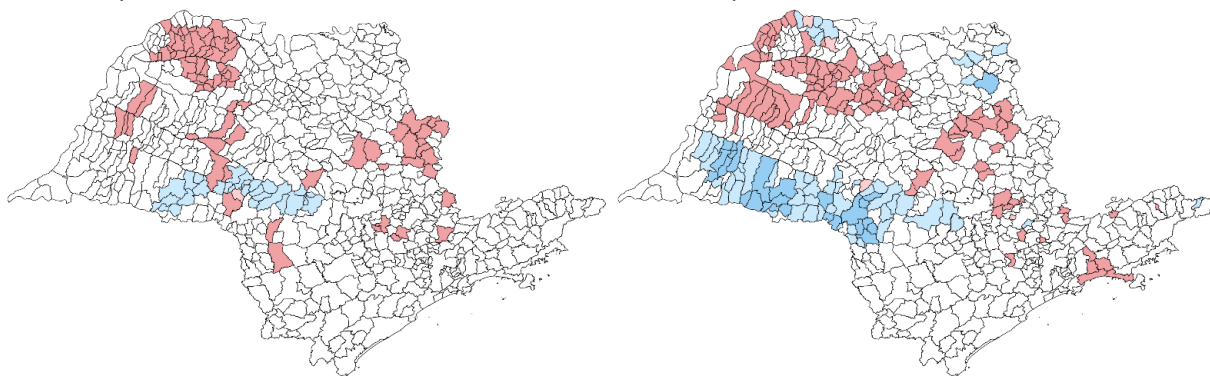
Figura 1: Variação relativa dos custos de bueiros celulares sob o cenário SSP2-4.5. Os painéis mostram a média, P10 e P90 da mudança percentual dos custos em relação ao período histórico para TR = 25 e 100 anos, considerando uma bacia hipotética altamente impermeabilizada (CN = 98, A = 3 km², duração crítica = 1 h). Tons de laranja indicam aumento de custo e tons de azul indicam redução.

a) Média entre modelos | TR = 25 anos b) Média entre modelos | TR = 100 anos



c) P10 | TR = 25 anos

d) P10 | TR = 100 anos



e) P90 | TR = 25 anos

f) P90 | TR = 100 anos

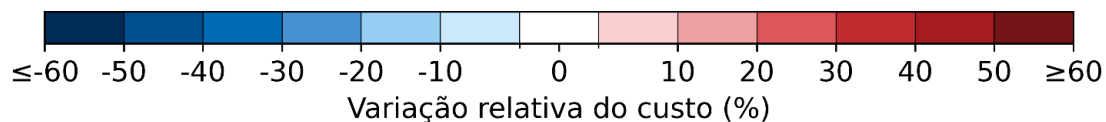
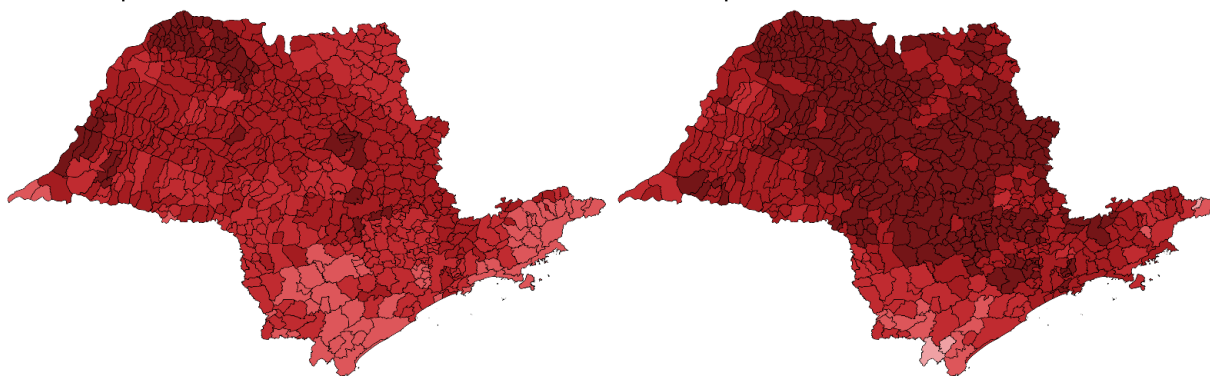


Figure 2: Variação relativa dos custos de bueiros celulares sob o cenário SSP5-8.5. Os painéis mostram a média, P10 e P90 da mudança percentual dos custos em relação ao período histórico para TR = 25 e 100 anos, considerando uma bacia hipotética altamente impermeabilizada (CN = 98, A = 3 km², duração crítica = 1 h). Tons de laranja indicam aumento de custo e tons de azul indicam redução.

No cenário SSP2-4.5, os aumentos de custo permanecem predominantemente moderados no futuro imediato, especialmente para $TR = 25$ anos. A média das projeções indica que grande parte dos municípios permanece próxima da condição histórica ou apresenta acréscimos limitados de até 10%. Esse comportamento é consistente com a interpretação de que, para períodos de retorno mais baixos ou intermediários, aumentos na vazão de projeto nem sempre são suficientes para deslocar o bueiro para uma classe comercial superior. Como o dimensionamento considera seções comerciais discretas, a resposta dos custos tende a ocorrer por limiares: mudanças hidrológicas pequenas ou moderadas podem não alterar a classe nominal, enquanto a superação de determinado limite hidráulico gera saltos no custo. Esse mecanismo explica a presença de áreas com baixa variação relativa, mesmo em um contexto de aumento projetado dos extremos de precipitação.

No cenário SSP5-8.5, a intensificação dos custos se torna mais evidente, sobretudo para $TR = 100$ anos. Os painéis de média sugerem uma ampliação das áreas com aumento de custo, enquanto o P90 evidencia uma cauda superior mais intensa, indicando que parte dos modelos climáticos projeta acréscimos $\geq 60\%$. Esse resultado está de acordo com estudos que mostram maior amplificação de extremos de precipitação em eventos raros e sob cenários de maior forçamento radiativo (Gründemann et al., 2022; Ballarin et al., 2024). Também é coerente com a interpretação física baseada na relação de Clausius–Clapeyron, segundo a qual uma atmosfera mais quente pode sustentar maior conteúdo de vapor d’água, intensificando precipitações extremas, embora a resposta final dependa também de processos dinâmicos, circulação atmosférica e escala temporal do evento (Andria et al., 2025; Wasko et al., 2024).

Os resultados também reforçam uma limitação prática dos fatores uniformes de majoração. Em diferentes países, diretrizes de adaptação têm adotado incrementos fixos ou dependentes da duração e do período de retorno para atualizar chuvas ou vazões de projeto, frequentemente na ordem de 20–40% (Niemczynowicz, 1989; Ragno et al., 2018; Martel et al., 2021; Welsh Government, 2021; Schlef et al., 2023; Paiva et al., 2024). No Brasil, ainda há poucas orientações específicas para drenagem urbana que traduzam diretamente mudanças climáticas em requisitos de projeto, embora propostas recentes indiquem acréscimos de 15% para $TR \leq 10$ anos e 20% para períodos de retorno maiores (Paiva et al., 2024). As Figuras 1 e 2 sugerem que tais fatores podem ser razoáveis para parte dos municípios, mas insuficientes para locais situados na cauda superior das projeções, especialmente sob SSP5-8.5 e $TR = 100$ anos.

Do ponto de vista de planejamento, os aumentos projetados de custo não devem ser interpretados apenas como acréscimos financeiros, mas como uma indicação do investimento necessário para reduzir a probabilidade de falha hidráulica sob clima não estacionário. Estudos que

consideram conjuntamente custos de construção e danos evitados indicam que a adaptação antecipada de infraestrutura pode reduzir perdas ao longo da vida útil dos ativos (Neumann et al., 2015; Dottori et al., 2023). Assim, os padrões espaciais observados nas Figuras 1 e 2 reforçam a necessidade de incorporar explicitamente a não estacionariedade ao dimensionamento de bueiros celulares, especialmente em estruturas com longa vida útil e em municípios onde as projeções indicam maior probabilidade de aumento dos custos de adaptação.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar, como mudanças projetadas na precipitação podem afetar os custos de implantação de bueiros celulares no Estado de São Paulo. Os resultados indicam que a não estacionariedade da precipitação pode ampliar esses custos de forma espacialmente heterogênea, mesmo sob uma configuração hidrológica padronizada. No cenário SSP2-4.5, os acréscimos permanecem predominantemente moderados no futuro imediato, com grande parte dos municípios apresentando aumentos de até 10% para períodos de retorno de até 25 anos. Entretanto, sob SSP5-8.5 e para TR = 100 anos, a cauda superior das projeções indica aumentos iguais ou superiores a 60% em parte dos municípios, evidenciando que os impactos podem ser substancialmente maiores em localidades mais sensíveis à intensificação da precipitação. Essa resposta decorre da combinação entre não estacionariedade climática e limiares discretos de dimensionamento hidráulico, nos quais alterações na vazão de projeto podem exigir a adoção de seções comerciais superiores. Portanto, fatores uniformes de majoração podem subestimar os custos futuros em municípios mais sensíveis, reforçando a importância de incorporar cenários climáticos, incerteza entre modelos e critérios regionais ao planejamento da drenagem urbana.

Referências

- ANDRIA, S.; BORGA, M.; MARANI, M. (2025). “*Thermodynamic versus large-scale controls on extreme precipitation: Temporal scale dependence and Clausius-Clapeyron scaling redefined*”. *Geophysical Research Letters* 52, e2025GL115204.
- BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. C. (2023). “*CLIMBra-climate change dataset for Brazil*”. *Scientific Data* 10, 47.
- BALLARIN, A. S.; WENDLAND, E.; ZAERPOUR, M.; HATAMI, S.; MEIRA NETO, A. A.; PPALEXIOU, S. M. (2024). “*Frequency rather than intensity drives projected changes of rainfall events in Brazil*”. *Earth’s Future* 12, e2023EF004053.

BRANDÃO, A. R. A.; CASTRO, M. A. R. A.; SÁNCHEZ, M. H.; GOMES JÚNIOR, M. N.; UCHÔA, J. G. S. M.; VAZ, I. C. M.; GHISI, E.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. C.; OLIVEIRA, P. T. S.; MENDIONDO, E. M.; BALLARIN, A. S. (2026). “*Flood Event Escalation and Urban Drainage Design Implications Under Nonstationary Rainfall in São Paulo State, Brazil*”. *Water* 18(5), 561.

BRANDÃO, A. R. A.; SCHWAMBACK, D.; BALLARIN, A. S.; RAMIREZ-AVILA, J. J.; NETO, J. G. V.; OLIVEIRA, P. T. S. (2025). “*Toward a better understanding of curve number and initial abstraction ratio values from a large sample of watersheds perspective*”. *Journal of Hydrology* 655, 132941.

COOK, L. M.; MCGINNIS, S.; SAMARAS, C. (2020). “*The effect of modeling choices on updating intensity-duration-frequency curves and stormwater infrastructure designs for climate change*”. *Climatic Change* 159, pp. 289–308.

DOTTORI, F.; MENTASCHI, L.; BIANCHI, A.; ALFIERI, L.; FEYEN, L. (2023). “*Cost-effective adaptation strategies to rising river flood risk in Europe*”. *Nature Climate Change* 13, pp. 196–202.

DOULABIAN, S.; TOUSI, E. G.; SHADMEHRI TOOSI, A.; ALAGHMAND, S. (2023). “*Non-stationary precipitation frequency estimates for resilient infrastructure design in a changing climate: A case study in Sydney*”. *Hydrology* 10, 117.

GOMES JÚNIOR, M. N. (2026). “*Gridded Bias-Corrected Intensity-Duration-Frequency Curves for Brazil Using BR-DWGD, IMERG, CHRIPS, and PERSIANN Datasets with Locally-Derived Disaggregation Coefficients*”. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=5589326>. Acesso em: 1 fev. 2026.

GRÜNDEMANN, G. J.; VAN DE GIESEN, N.; BRUNNER, L.; VAN DER ENT, R. (2022). “*Rarest rainfall events will see the greatest relative increase in magnitude under future climate change*”. *Communications Earth & Environment* 3, 235.

HADDAD, E. A.; TEIXEIRA, E. (2015). “*Economic impacts of natural disasters in megacities: The case of floods in São Paulo, Brazil*”. *Habitat International* 45, pp. 106–113.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. (eds.) (2009). *Curve Number Hydrology: State of the Practice*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

IBGE. (2022). *Censo Demográfico*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=381>. Acesso em: 1 nov. 2025.

MARTEL, J. L.; BRISSETTE, F. P.; LUCAS-PICHER, P.; TROIN, M.; ARSENAULT, R. (2021). “*Climate change and rainfall intensity–duration–frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation*”. *Journal of Hydrologic Engineering* 26, 03121001.

MENDES, A. T.; DOS SANTOS, G. R.; DE ALBUQUERQUE ALVES, C. (2024). “*Trajectory, challenges, and opportunities in Sustainable Urban Water Management in Brazil: Nature-based solutions for urban stormwater drainage*”, in *Nature-Based Solutions for Circular Management of Urban Water*. Springer Nature, Berlin/Heidelberg, pp. 295–313.

MILLY, P. C.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. (2008). “Stationarity is dead: Whither water management?”. *Science* 319, pp. 573–574.

PAIVA, R.; COLLISCHONN, W.; MIRANDA, P.; PETRY, I.; DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J.; FAN, F.; RUHOFF, A.; FAGUNDES, H. (2024). *Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

RAGNO, E.; AGHAKOUCHAK, A.; LOVE, C. A.; CHENG, L.; VAHEDIFARD, F.; LIMA, C. H. (2018). “Quantifying changes in future intensity-duration-frequency curves using multimodel ensemble simulations”. *Water Resources Research* 54, pp. 1751–1764.

SCHLEF, K. E.; KUNKEL, K. E.; BROWN, C.; DEMISSIE, Y.; LETTENMAIER, D. P.; WAGNER, A.; WIGMOSTA, M. S.; KARL, T. R.; EASTERLING, D. R.; WANG, K. J. et al. (2023). “Incorporating non-stationarity from climate change into rainfall frequency and intensity-duration-frequency (IDF) curves”. *Journal of Hydrology* 616, 128757.

SHARMA, A.; WASKO, C.; LETTENMAIER, D. P. (2018). “If precipitation extremes are increasing, why aren’t floods?”. *Water Resources Research* 54, pp. 8545–8551.

SHARMA, S.; LEE, B. S.; NICHOLAS, R. E.; KELLER, K. (2021). “A safety factor approach to designing urban infrastructure for dynamic conditions”. *Earth’s Future* 9, e2021EF002118.

TCU. (2013). *Acórdão n.º 2622/2013*. Tribunal de Contas da União, Brasília – DF. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 20 out. 2025.

WASKO, C.; SHARMA, A.; LETTENMAIER, D. P. (2019). “Increases in temperature do not translate to increased flooding”. *Nature Communications* 10, 5676.

WASKO, C.; WESTRA, S.; NATHAN, R.; PEPLER, A.; RAUPACH, T. H.; DOWDY, A.; JOHNSON, F.; HO, M.; MCINNES, K. L.; JAKOB, D. et al. (2024). “A systematic review of climate change science relevant to Australian design flood estimation”. *Hydrology and Earth System Sciences* 28, pp. 1251–2024.

WELSH GOVERNMENT. (2021). *Climate Change Allowances and Flood Consequence Assessments*. Disponível em: <https://www.gov.wales/climate-change-allowances-and-flood-consequence-assessments>. Acesso em: 1 set. 2025.

AGRADECIMENTOS – O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) (processo 88887.184632/2025-00).