

ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS IDF DA RMBH: COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE PINHEIRO E NAGHETTINI (1998) E UM MODELO BAYESIANO COM PROCESSOS MAX-STABLE

Luiza Virgínia Duarte¹; Priscilla Macedo Moura¹ & Veber Afonso Figueiredo Costa¹

Palavras-Chave – Dependência espacial; Regionalização de extremos.

INTRODUÇÃO

A estimativa de eventos extremos de precipitação é fundamental para o planejamento urbano e dimensionamento de sistemas de drenagem, especialmente em áreas urbanas vulneráveis como a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (Costa *et al.*, 2024). Este estudo compara duas abordagens para a obtenção de curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF): (i) o método regional baseado em momentos-L proposto por Pinheiro e Naghettini (1998) e um modelo Bayesiano hierárquico com dependência espacial, fundamentado em processos *max-stable* e no princípio da invariância de escala.

MATERIAL E MÉTODOS

A RMBH, com 34 municípios e cerca de 9.468 km², apresenta forte variabilidade topográfica e climática, fatores que afetam significativamente os padrões de precipitação. Foram utilizadas séries de precipitação de 8 estações com resolução temporal de 5 minutos, posteriormente acumuladas para 11 durações distintas: 10, 15, 30 e 45 minutos e 1, 2, 3, 4, 8, 14 e 24 horas conforme descrito em Rodrigues *et al.* (2023). O método de Pinheiro e Naghettini (1998) – P&N – aplica a técnica *Index-flood* com momentos-L, considerando a precipitação anual média como covariável. Já o modelo proposto (*max-stable*) adota uma estrutura Bayesiana com três níveis hierárquicos: dados, processos e distribuições a priori, incorporando dependência espacial explícita com o processo *max-stable* e *partial pooling* para estimar parâmetros marginais da GEV com maior robustez em estações com dados escassos.

O modelo hierárquico Bayesiano utilizou o processo *max-stable* proposto por Reich e Shaby (2012) e aprimorado por Stephenson *et al.*, (2016), com o objetivo de incorporar a dependência espacial entre extremos de precipitação ao longo da RMBH. A formulação considera três níveis principais: nível dos dados, nível dos processos e nível das distribuições a priori.

A comparação das curvas IDF geradas por ambos os modelos foi realizada a partir dos quantis estimados e das métricas: erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (RMSE), viés percentual médio (PBIAS) e coeficiente de eficiência Kling-Gupta (KGE), com base nos máximos anuais observados no período de 1990-2009 (mesmo período utilizado na calibração do modelo *max-stable*).

RESULTADOS

A calibração do modelo Bayesiano hierárquico com processos *max-stable* permitiu estimar os parâmetros da distribuição GEV para cada estação da RMBH. O parâmetro de forma (ξ) apresentou valores positivos entre 0,1 e 0,25, indicando caudas pesadas, indicando maior propensão à ocorrência de eventos extremos. Mesmo em estações com séries curtas, como Ponte Raul Soares, o uso de *partial pooling* permitiu melhorar a precisão das estimativas ao compartilhar informação entre postos.

1) Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901. e-mails: luizavirginiad@ufmg.br, priscilla.moura@ehr.ufmg.br, veber@ehr.ufmg.br.

Na comparação entre os modelos, de forma geral, o método P&N apresentou menor erro médio e maior eficiência global. No entanto, o modelo *max-stable* mostrou melhor desempenho em estações específicas (Caeté, Caixa de Areia e Pedro Leopoldo) e em durações curtas (≤ 30 minutos), capturando com mais fidelidade os quantis empíricos associados a eventos convectivos. Nas durações intermediárias, o método P&N teve menor erro, mas com viés negativo, indicando subestimação.

A partir da comparação gráfica entre as curvas IDF estimadas e os quantis empíricos observados, verifica-se que, para o TR = 10 anos, o modelo *max-stable* apresenta melhor aderência na maior parte das estações e durações analisadas. Esse desempenho reflete a capacidade do modelo em incorporar a dependência espacial e ajustar de forma mais flexível os parâmetros marginais da distribuição GEV. Em estações com séries curtas, como Ponte Raul Soares, com apenas seis anos de dados, a limitação amostral compromete a confiabilidade dos quantis empíricos, tornando-os menos representativos e influenciando nas métricas, favorecendo o modelo P&N, que tende a produzir estimativas mais conservadoras. Para o TR = 50 anos, o modelo *max-stable* estima quantis superiores mais elevados, o que está em conformidade com as propriedades teóricas da distribuição ajustada, caracterizada por caudas pesadas. Esse comportamento não deve ser interpretado como superestimação, mas como reflexo da maior atribuição de probabilidade a eventos extremos raros.

CONCLUSÕES

A integração de processos *max-stable* a uma estrutura Bayesiana hierárquica demonstrou potencial para aprimorar as estimativas de quantis extremos, especialmente em contextos de escassez de dados e alta variabilidade espacial. Embora o modelo de P&N ainda apresente boa performance, do ponto de vista prático, os resultados obtidos no modelo *max-stable* reforçam a utilidade da abordagem proposta na atualização de curvas IDF para o dimensionamento de infraestrutura hidráulica, contribuindo para estratégias de adaptação urbana mais alinhadas à intensificação de eventos extremos observados nas últimas décadas.

AGRADECIMENTOS Os autores agradecem, ao CNPQ pelo financiamento da pesquisa com a bolsa de estudo, à CAPES à FAPEMIG, à UFMG pelo amparo concedido para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema e ao Dr. Alec G. Stephenson pelo fornecimento dos códigos utilizados na simulação do modelo *max-stable*.

REFERÊNCIAS

- COSTA, V., SAMPAIO, J., FERNANDES, W., E NEIVA, G. (2024) *Assessing the unexpectedness of a very large observed rainfall event in the metropolitan region of Belo Horizonte, Brazil*. Natural Hazards, 120(4), 3979–3994.
- GUIMARÃES, M., E NAGHETTINI, M. (1998) *Análise Regional de Freqüência e Distribuição Temporal das Tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 3(4), 73–88.
- REICH, B. J., E SHABY, B. A. (2012) *A hierarchical max-stable spatial model for extreme precipitation*. The Annals of Applied Statistics, 6(4).
- RODRIGUES, G., FERNANDES, W., COSTA, V., E PINTO, E. (2023) *Utilizing the Scale Invariance Principle for Deriving a Regional Intensity-Duration-Frequency Relationship in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil*. Journal of Hydrologic Engineering, 28(7), 05023010.
- STEPHENSON, A. G., LEHMANN, E. A., E PHATAK, A. (2016) *A max-stable process model for rainfall extremes at different accumulation durations*. Weather and Climate Extremes, 13, 44–53.