

MONITORAMENTO E PREVENÇÃO DE INUNDAÇÕES COM CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS (CEP): UMA ABORDAGEM INTEGRADA COM R, PYTHON E DADOS DO SNIRH

Nicolly de Lima Barbosa ¹; João Victor Stófel Maia ² & André Luiz Teixeira ³

RESUMO – O Controle Estatístico de Processo (CEP) é amplamente utilizado no monitoramento de sistemas produtivos e tem ganhado relevância na gestão de recursos hídricos. Este estudo avalia sua aplicação na prevenção de enchentes por meio da detecção de anomalias em séries temporais hidrológicas. Foram utilizados 25 anos de dados históricos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), processados em R e Python, para desenvolver um framework automatizado baseado em Controle Estatístico Multivariado de Processo (Hotelling T^2) e análise de capacidade do processo (Cpk). Os resultados demonstraram a eficácia do gráfico T^2 na identificação dos eventos hidrológicos mais críticos entre 2000 e 2025, permitindo analisar a contribuição da precipitação e da vazão para cada alerta. O índice Cpk de 2,45 indicou elevada capacidade operacional da bacia, fornecendo uma medida quantitativa de resiliência. A análise de correlação cruzada identificou o tempo de resposta hidrológica, enquanto a análise de resíduos permitiu detectar alterações na relação chuva-vazão associadas à saturação do solo. Os resultados confirmam o potencial do CEP como ferramenta complementar para previsão de enchentes, monitoramento em tempo real e apoio à gestão de riscos baseada em dados.

Palavras-Chave – Controle Estatístico de Processos (CEP), Monitoramento e prevenção de Inundações, Análise de Dados Hidrológicos.

ABSTRACT– Statistical Process Control (SPC) is a widely adopted methodology for monitoring production systems and has recently gained attention in water resource management. This study explores the application of SPC in flood prevention, focusing on the detection of anomalies in hydrological time series. Using 25 years of historical data from the Brazilian National Water Resources Information System (SNIRH) and open-source tools (R/Python), we developed an automated framework integrating Multivariate SPC (Hotelling's T^2) and Process Capability (Cpk) analysis. The results demonstrate the effectiveness of the T^2 chart in identifying the 50 most critical hydrological events between 2000 and 2025, decomposing the contribution of precipitation and river discharge to each alert. A process capability study revealed a Cpk of 2.45 for the basin's operational limits, providing a quantitative metric for resilience. Furthermore, Cross-Correlation Analysis (CCF) successfully identified the hydrological lag time, essential for early warning precision. The integration of SPC with residual analysis from regression models proved capable of detecting "model ruptures" caused by soil saturation. These findings confirm that SPC is a powerful complementary tool for flood forecasting, providing scalable, real-time situational awareness for public authorities and contributing to data-driven, resilient disaster risk management strategies.

Key-words – Statistical Process Control (SPC), Flood Forecasting and Prevention, Hydrological Time Series Analysis.

1) Graduanda em Administração pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA), São Bernardo do Campo – SP, Brasil. E-mail: nicollylimab1@gmail.com

2) Graduando em Administração pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA), São Bernardo do Campo – SP, Brasil. E-mail: stofel.maia@gmail.com

3) Professor Doutor em Administração. Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA), São Bernardo do Campo – SP, Brasil. E-mail: andtex823@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Conforme descrito por Chagas et al. (2022a) e por Alves et al. (2024), as enchentes estão entre os desastres naturais mais recorrentes e impactantes do Brasil, gerando prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Segundo destacado por Kumar et al. (2023) e Falcão et al. (2017), a prevenção e a gestão desses eventos dependem do monitoramento contínuo de variáveis hidrológicas e meteorológicas, tornando necessária a adoção de métodos capazes de identificar anomalias e alterações no comportamento dos sistemas hídricos.

O uso de abordagens baseadas em Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina para a gestão de enchentes vem crescendo consideravelmente (Kumar et al., 2023), porém tais métodos enfrentam limitações pela dependência de grandes volumes de dados e pela perda de precisão em eventos extremos inéditos (Kumar et al., 2023; Piadeh et al., 2022). Em contrapartida, a modelagem tradicional — que utiliza leis físicas para simular a transformação da chuva em vazão (modelos hidrológicos) e o movimento da água no canal (modelos hidráulicos) — exige alta capacidade computacional e dados físicos detalhados da bacia, o que dificulta a geração de alertas em tempo real (Guo et al., 2021; Qi et al., 2021). Tais restrições e a complexidade de calibração comprometem a agilidade necessária para o suporte operacional imediato em situações de crise (Qi et al., 2021).

Nesse contexto, conforme apontado por Mohd Shafie et al. (2025) e Kandari et al. (2018), o Controle Estatístico de Processo (CEP) apresenta potencial para aplicação no monitoramento hidrológico, contribuindo para a detecção antecipada de eventos críticos. Associado ao uso de ferramentas computacionais como R e Python e aos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o CEP possibilita a análise automatizada de séries temporais e o desenvolvimento de sistemas de apoio à tomada de decisão na gestão de riscos de enchentes.

1.1 Problema de Pesquisa e Justificativa

A crescente frequência de eventos extremos reforça a necessidade de métodos eficazes para prevenção de enchentes, conforme argumentam Chagas et al. (2023). Nesse contexto, a aplicação do Controle Estatístico de Processo (CEP) ao monitoramento hidrológico permite identificar padrões críticos e anomalias antes da ocorrência de eventos extremos, valendo-se da capacidade das cartas de controle em gerar alertas precoces ao detectar níveis fluviais anormais (Mohd Shafie et al., 2025).

Ao integrar conceitos de engenharia da qualidade, estatística e ciências ambientais, o framework proposto busca apoiar a gestão de riscos e o processo decisório, pautando-se na premissa de que inferências científicas rigorosas são indispensáveis para assegurar tomadas de decisão

fundamentadas em evidências (Schreiber et al., 2022), através de uma abordagem escalável e orientada por dados.

1.2 Objetivos da Pesquisa

O objetivo deste estudo é avaliar a aplicação do Controle Estatístico de Processo (CEP) na prevenção de enchentes utilizando dados hidrológicos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) processados em R e Python. Para isso, foram empregadas técnicas de Controle Estatístico Multivariado de Processo (MSPC), análise de resíduos e análise de capacidade do processo (Cpk), visando identificar anomalias hidrológicas, avaliar a resiliência da bacia e fornecer subsídios para sistemas de alerta antecipado e gestão de riscos baseada em dados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos do Controle Estatístico de Processo (CEP)

A base teórica do Controle Estatístico de Processo (CEP) está fundamentada na distinção entre causas comuns e causas especiais de variação, conforme estabelecido por Shewhart (1931) e posteriormente desenvolvido para a engenharia moderna por Montgomery (2020). O CEP utiliza gráficos de controle para monitorar a estabilidade de processos e detectar anomalias antes que estas atinjam níveis críticos.

No monitoramento hidrológico, a escolha dos gráficos depende da natureza dos dados: variáveis (dados contínuos) ou atributos (contagens discretas). Embora tradicionalmente associado ao ambiente industrial, estudos recentes realizados por Schreiber *et al.* (2022) demonstram que os gráficos de controle são ferramentas robustas para identificar padrões não aleatórios em séries temporais ambientais.

2.2 Contexto Hidrológico e Monitoramento de Enchentes

As enchentes urbanas são fenômenos complexos associados a precipitações intensas e limitações dos sistemas de drenagem, conforme discutido por Alves *et al.* (2024). No Brasil, a frequência e a intensidade desses eventos têm aumentado nas últimas décadas, evidenciando a necessidade de estratégias de mitigação e sistemas de alerta antecipado, conforme observado por Chagas *et al.* (2022) e RS (2024).

Nesse contexto, técnicas de Controle Estatístico de Processo (CEP) podem ser aplicadas ao monitoramento de variáveis hidrológicas, contribuindo para a identificação precoce de eventos críticos e para a prevenção de desastres naturais (Lima *et al.*, 2019).

2.3 Fontes de Dados e Ferramentas Computacionais

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), administrado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), fornece dados de precipitação, vazão e

nível dos rios utilizados neste estudo. O processamento e a análise das séries temporais foram realizados em ambiente integrado utilizando as linguagens R e Python.

Para garantir a consistência das análises ao longo do período de 2000 a 2025, foram selecionadas apenas estações com pelo menos 95% de completude dos registros, reduzindo os impactos de dados ausentes no desenvolvimento do modelo de Controle Estatístico de Processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento do Estudo e Aquisição de Dados

Esta pesquisa emprega uma abordagem quantitativa aplicada, utilizando um conjunto de dados históricos de 25 anos (2000–2025), obtido por meio da plataforma Hidroweb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). A área de estudo concentra-se em bacias hidrográficas com histórico recorrente de enchentes.

Os critérios de seleção dos dados incluíram estações com mais de 20 anos de registros e, no mínimo, 95% de completude dos dados, garantindo robustez estatística para as análises realizadas.

Tabela 1 – Resumo Estatístico do Conjunto de Dados Hidrológicos do SNIRH

Categoria dos dados	Total Estações	Mediana (Anos)	Média (Anos)	Mín. (Anos)	Máx. (Anos)
Pluviometria	12.188	26,5	31,6	0,0	80,0
Escala (Nível/Cota)	6.020	12,9	23,3	0,0	80,0
Vazão	4.604	11,6	23,8	0,0	80,0
Climatológica	691	49,5	53,2	0,2	80,0
Qualidade da Água	5.456	9,8	13,4	0,0	80,0
Sedimentos	2.052	5,6	10,8	0,0	54,1
Telemetria	10.849	4,1	6,5	0,0	25,1

Fonte: SNIRH (2025)

Nota: Os valores mínimos apresentados para Vazão e Sedimentometria representam artefatos dos metadados brutos do banco de dados do SNIRH, frequentemente associados a estações em fase inicial de testes. Para este estudo, foi aplicado um processo rigoroso de filtragem, selecionando apenas estações de monitoramento com histórico contínuo e positivo de 25 anos (2000–2025), garantindo a longevidade e consistência necessárias para a construção da linha de base do modelo CEP.

As principais variáveis analisadas foram:

- Nível do Rio (m) e Vazão (m^3/s): indicadores do estado físico e do volume do curso d'água;
- Precipitação Acumulada (mm): principal variável de entrada responsável pela geração dos eventos de enchente.

3.2 Processamento e Padronização dos Dados

Em razão da alta frequência dos dados hidrológicos, o pré-processamento incluiu a aplicação de interpolação linear para o preenchimento de pequenas lacunas e a sincronização temporal das séries

de dados. Para viabilizar a análise multivariada, as variáveis foram padronizadas por meio do método do escore Z:

$$Z = (x - \mu) / \sigma \quad (1)$$

Onde x representa o valor observado, μ corresponde à média histórica, σ representa o desvio-padrão do período considerado sob controle (períodos sem ocorrência de enchentes extremas).

3.3 Framework de Controle Estatístico Multivariado de Processo (MSPC)

A metodologia proposta adota uma abordagem multivariada para analisar conjuntamente a precipitação e a resposta hidrológica da bacia. O framework foi estruturado em quatro etapas complementares: monitoramento por meio do gráfico T^2 de Hotelling para identificação de anomalias multivariadas, análise de contribuição das variáveis para determinação dos fatores associados aos alertas, monitoramento dos resíduos de um modelo de regressão linear para detecção de alterações na relação chuva-vazão e análise da capacidade do processo (Cpk) para quantificação da margem de segurança da bacia em relação ao nível de transbordamento.

A abordagem apresenta elevada eficiência computacional e potencial de aplicação em larga escala na rede do SNIRH, sem exigir parâmetros físicos específicos da bacia. Entretanto, por possuir caráter empírico, o framework é proposto como uma ferramenta complementar aos modelos hidrológicos tradicionais para monitoramento e alerta de eventos extremos.

3.4 Validação e Métricas de Desempenho

O framework foi validado por meio da comparação entre os alertas estatísticos gerados e os registros históricos de enchentes. O desempenho foi avaliado com base na capacidade do sistema de identificar Verdadeiros Positivos (enchentes efetivamente detectadas como pontos fora de controle) e na análise do Tempo de Defasagem (Lag Time) por meio da Função de Correlação Cruzada (CCF), permitindo determinar o tempo de antecedência fornecido pelos alertas gerados pelo CEP para fins de sistemas de alerta antecipado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Detecção Multivariada de Anomalias e Análise da Variabilidade Conjunta

O gráfico de controle T^2 de Hotelling (Figura 1) permitiu monitorar conjuntamente a precipitação e o nível do rio. Na série histórica de 2000 a 2025 (722 subgrupos), foi determinado um Limite Superior de Controle (LSC) de 10,38, sendo identificados 25 eventos críticos com valores máximos de T^2 próximos de 60,0.

A análise de contribuição indicou que a precipitação foi o principal fator associado aos desvios observados, evidenciando a sensibilidade da bacia a eventos meteorológicos intensos e o potencial do monitoramento multivariado para apoio a sistemas de alerta.

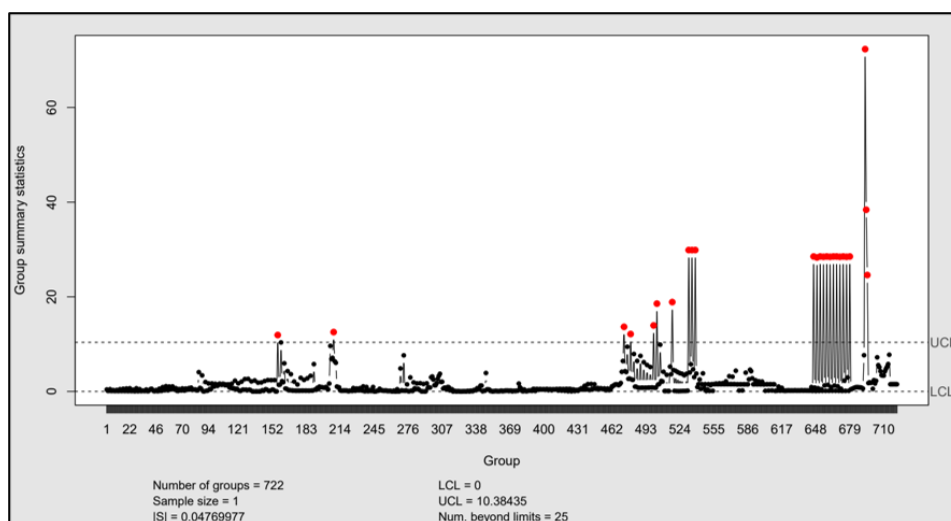


Figura 1 – Gráfico de Controle T^2 para precipitação e nível do rio.

4.2 Decomposição das Anomalias: Análise de Contribuição das Variáveis

Embora a estatística T^2 permita identificar desvios multivariados, a análise de contribuição das variáveis (Figura 2) auxilia na compreensão dos mecanismos associados aos eventos detectados. O gráfico apresenta os 50 maiores picos de T^2 registrados entre 2000 e 2025, evidenciando a influência relativa da precipitação e do nível do rio em cada alerta.

Os resultados mostram que a precipitação foi o principal fator responsável por mais de 80% dos eventos identificados, indicando elevada sensibilidade da bacia a chuvas intensas. Em contrapartida, os eventos com maior contribuição do nível do rio estiveram associados à manutenção prolongada de elevados volumes de água, frequentemente relacionados à saturação do solo ou a efeitos de represamento.

Essa análise permite diferenciar eventos provocados por precipitações extremas daqueles decorrentes de alterações graduais no comportamento hidrológico da bacia, ampliando a utilidade do framework como ferramenta de monitoramento e apoio à tomada de decisão.

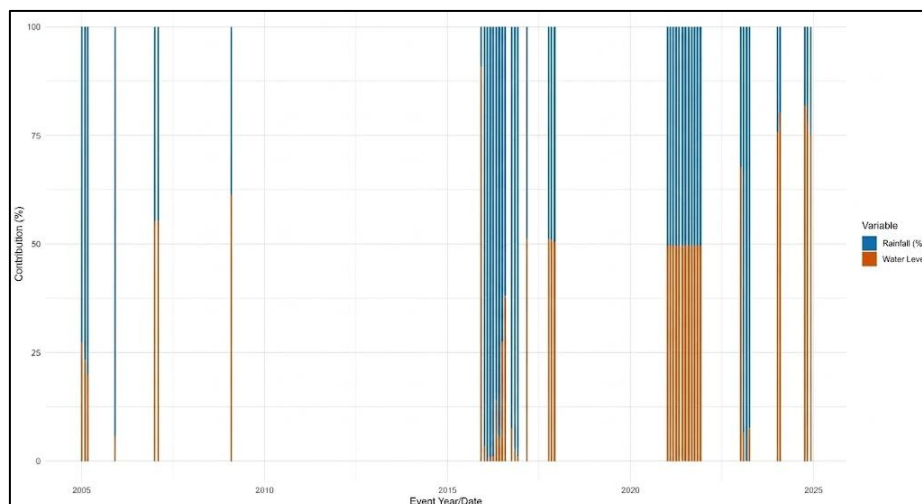


Figura 2 – Análise de contribuição de precipitação e nível do rio para os 50 alertas mais críticos.

Nota: Cada barra representa o peso relativo das variáveis quando o limite T^2 foi ultrapassado. Os segmentos azuis indicam anomalias impulsionadas pela intensidade da precipitação, enquanto os segmentos laranja representam eventos nos quais o nível do rio já se encontrava em condição crítica, frequentemente em decorrência da saturação do solo ou de elevadas vazões a montante.

4.3 Avaliação Quantitativa da Resiliência da Bacia por meio da Capacidade do Processo (Cpk)

A análise de capacidade do processo (Figura 3) resultou em um índice Cpk de 2,45, indicando elevada capacidade da bacia em absorver variações hidrológicas sob condições normais de operação. Os dados de nível do rio foram avaliados em relação a um Limite Superior de Especificação (LSE) de 3,0, adotado como referência para condições críticas de transbordamento.

Aproximadamente 2,2% das observações ultrapassaram o LSE, correspondendo aos eventos extremos registrados na série histórica. Esses resultados demonstram o potencial do índice Cpk como ferramenta complementar para avaliação da resiliência da bacia e apoio à gestão de riscos de enchentes.

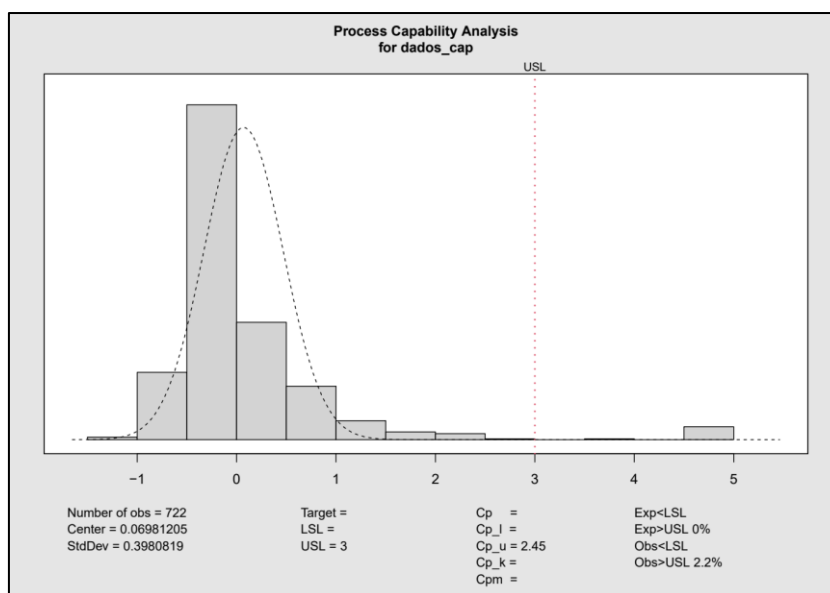


Figura 3 – Histograma de Capacidade do Processo (Cpk).

4.4 Análise de Resíduos e Monitoramento de Rupturas do Modelo

O gráfico de controle dos resíduos (Figura 4) foi utilizado para identificar “rupturas do modelo”, ou seja, situações em que a relação entre precipitação e resposta hidrológica deixa de representar adequadamente o comportamento da bacia.

A análise identificou 44 rupturas significativas e 270 sequências de violações dos limites de controle ($\pm 0,491$), indicando mudanças persistentes no comportamento hidrológico. Esses eventos estiveram associados principalmente à saturação do solo, condição em que o nível do rio se eleva de forma desproporcional à precipitação observada.

Os resultados demonstram o potencial do monitoramento dos resíduos para identificação antecipada de condições críticas da bacia e apoio a sistemas de alerta.

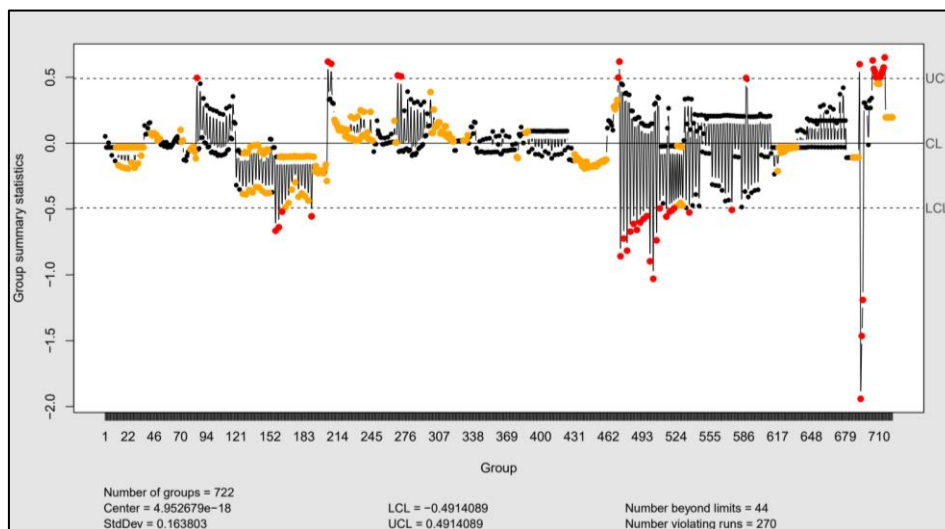


Figura 4 – Gráfico de Controle dos Resíduos.

4.5 Tempo de Defasagem Hidrológica e Janela de Alerta Antecipado

O componente final do framework consistiu na aplicação da Função de Correlação Cruzada (Cross-Correlation Function – CCF) entre os escores Z da precipitação e do nível do rio (Figura 5), visando quantificar a defasagem temporal entre a ocorrência da chuva e a resposta hidrológica da bacia.

Os resultados indicaram um pico significativo de correlação para defasagens entre 6 e 12 horas, representando o intervalo médio necessário para que a precipitação influencie o nível do rio. Essa janela temporal fornece tempo adicional para a adoção de medidas preventivas por órgãos de defesa civil e gestores de recursos hídricos, contribuindo para o aprimoramento dos sistemas de alerta.

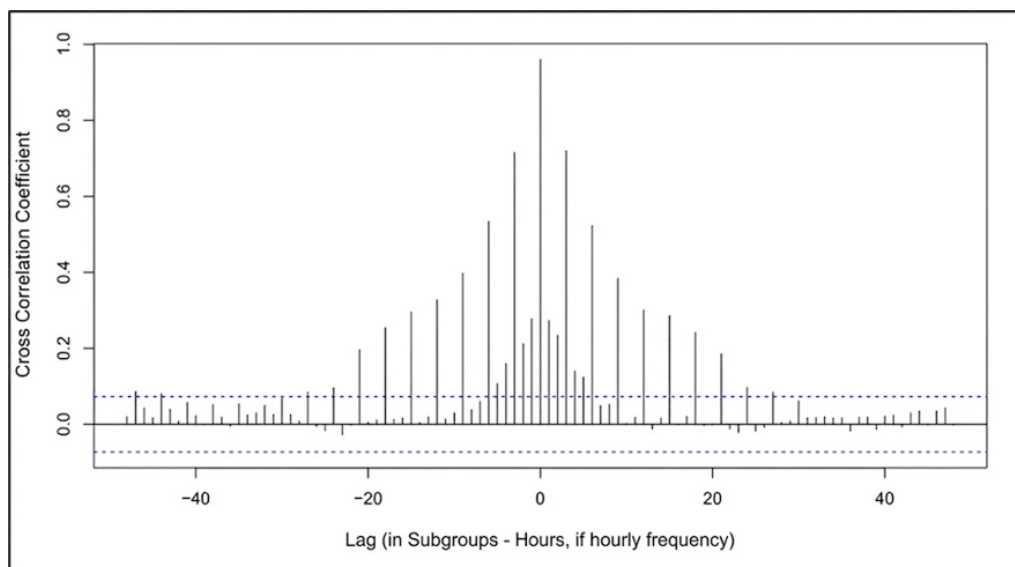


Figura 5 – Análise de Correlação Cruzada entre precipitação e nível do rio.

A aplicação prática do framework foi concebida para apoiar Sistemas de Suporte à Decisão utilizados por órgãos de Defesa Civil e instituições responsáveis pela gestão de bacias hidrográficas. Ao utilizar alertas baseados em desvios estatísticos, o sistema permite identificar alterações relevantes no comportamento hidrológico antes da ocorrência de inundações.

A estatística T^2 , resultante da padronização dos dados e da análise multivariada, mostrou-se eficiente na redução de falsos positivos e na identificação de eventos críticos. Além disso, a análise de correlação cruzada indicou uma janela preditiva de 6 a 12 horas, fornecendo tempo adicional para adoção de medidas preventivas e mobilização de equipes.

Esses resultados demonstram o potencial do framework como ferramenta de monitoramento e apoio à tomada de decisão, contribuindo para o aumento da resiliência frente a eventos hidrológicos extremos.

5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou o potencial do Controle Estatístico de Processo (CEP) como ferramenta complementar para monitoramento e prevenção de enchentes utilizando dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). A aplicação do Controle Estatístico Multivariado de Processo (MSPC), por meio dos gráficos T^2 de Hotelling, permitiu identificar eventos hidrológicos críticos e monitorar alterações no comportamento da bacia hidrográfica.

Os resultados evidenciaram a capacidade do framework em detectar anomalias associadas a eventos extremos, avaliar a resiliência da bacia por meio do índice Cpk (2,45) e fornecer uma janela preditiva de 6 a 12 horas para sistemas de alerta antecipado. A análise dos resíduos também permitiu identificar alterações na relação chuva-vazão associadas à saturação do solo.

A integração entre CEP, R, Python e dados do SNIRH mostrou-se uma abordagem eficiente e escalável para monitoramento hidrológico, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão e para a adoção de estratégias preventivas de gestão de riscos. Dessa forma, o framework apresenta potencial para ampliar a resiliência de bacias hidrográficas frente ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J.; *et al.* (2024). “Global monitoring of urban flooding: Challenges and opportunities in data-scarce regions”. *Journal of Flood Risk Management*, 17(1), e12940.
- CHAGAS, V.B.P.; CHAFFE, P.L.B.; BLÖSCHL, G. (2022). “Effects of land use and climate change on Brazilian river flows”. *Journal of Hydrology*, 608, 127621.
- CHAGAS, V.B.P.; CHAFFE, P.L.B.; BLÖSCHL, G. (2022a). “Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle”. *Nature Communications*, 13, 5136.
- CHAGAS, V.B.P.;

- CHAFFE, P.L.B.; BLÖSCHL, G. (2023). “Variações cíclicas das cheias no Brasil de 1940 a 2020”. Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- FALCÃO, L.C.; *et al.* (2017). “A aplicação de ferramentas do geoprocessamento para a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Mearim- MA”. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis.
- GUO, Z.; *et al.* (2021). “Data-driven flood emulation: Speeding up urban flood predictions by deep convolutional neural networks”. Journal of Flood Risk Management, 14, e12684.
- KANDARI, P.N.A.; *et al.* (2018). “Flood Risk Pattern Recognition Analysis in Klang River Basin”. International Journal of Engineering & Technology, 7 (4.34), 86-90.
- KUMAR, V.; *et al.* (2023). “Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances”. Hydrology, 10, 141.
- LIMA, J.P.; *et al.* (2019). “Statistical process control applied to the management of water resources: A case study in Southern Brazil”. Brazilian Journal of Water Resources (RBRH), 24, e32.
- MOHD SHAFIE, S.N.A.; *et al.* (2025). “A Comparison of Various Residual-Based Control Charts for Detecting and Monitoring Abnormal River Water Levels”. Journal of Quality Measurement and Analysis, 21, 253-265.
- MONTGOMERY, D.C. (2020). Introduction to Statistical Quality Control. 9ª ed. Wiley, New York.
- REIS JR., D.S.; *et al.* (2023). “Computational tools for hydrological time series analysis: Applications in R and Python”. Hydrological Sciences Journal, 68(4), pp. 589–604.
- PIADEH, F.; BEHZADIAN, K.; ALANI, A.M. (2022). “A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems”. Journal of Hydrology, 607, 127476.
- QI, W.; MA, C.; XU, H.; CHEN, Z.; ZHAO, K.; HAN, H. (2021). “A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies”. Natural Hazards, 108, 31–62.
- SCHREIBER, S.G.; *et al.* (2022). “Statistical tools for water quality assessment and monitoring in river ecosystems – a scoping review and recommendations for data analysis”. Water Quality Research Journal, 57, 40.
- SHEWHART, W.A. (1931). Economic Control of Quality of Manufactured Product. D. Van Nostrand Company, New York.

SITES CONSULTADOS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <http://www.ana.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.