

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

TEMPO DE RESPOSTA HIDROLÓGICA ENTRE PRECIPITAÇÃO E NÍVEL DO RIBEIRÃO DO CHÁPEU EM SÃO LUIZ DO PARAITINGA - SÃO PAULO

Josielton da Silva Santos¹; Milena Pereira Dantas¹; Vitória Amélia Lemes Gonçalves¹; Rafael Grinberg Chasles¹; Helen Graciane Ruela Machado¹; Brisa Maria Fregonesi¹; Diego Monteiro¹; Diego Freitas de Souza¹; André Luis Navarro¹; Samir Edgar Marques; Gré de Araújo Lobo¹; Anderson Barboza Esteves¹.

Abstract: The objective of this study is to estimate the response time between precipitation and river level in the Ribeirão do Chapéu, which crosses the district of Catuçaba and flows into the Paraitinga River (São Paulo, Brazil). Data from rain and river gauge stations were used, covering the period from 2013 to 2024. After removing outliers, critical events were selected based on atypical river level values. Cross-correlation analysis was applied to estimate the time lag between precipitation and river level response. The results indicate an average response time of 5.5 hours between stations E2-055 (rain gauge) and 172 (river gauge), and approximately 2 hours between rain gauge stations 878 and E2-055. The results highlighted the importance of real-time hydrological monitoring for disaster prevention in areas prone to river overflows and flooding.

Resumo: O objetivo desse trabalho é estimar o tempo de resposta entre precipitação e nível de rio no Ribeiro do Chapéu, que atravessa o distrito de Catuçaba e deságua no Rio Paraitinga (SP). Foram utilizados dados de estações pluviométricas e fluviométrica entre 2013 e 2024. Após a remoção de outliers, foram selecionados os eventos críticos com base em valores atípicos de nível de rio. Foi aplicada Análise de Correlação Cruzada para estimar o tempo de defasagem (*lag*) entre precipitação e resposta do nível do rio. Os resultados indicam um tempo médio de resposta de 5,5 horas entre as estações E2-055 (pluviométrica) e 172 (fluviométrica), e em torno de 2 horas entre as estações pluviométricas 878 e E2-055. Os resultados evidenciam a importância do monitoramento hidrológico em tempo real para a prevenção de desastres em regiões suscetíveis a extravasamento de rios e inundações.

Palavras-Chave – correlação cruzada, eventos críticos, Catuçaba, São Luiz do Paraitinga

INTRODUÇÃO

O monitoramento hidrológico é fundamental para gestão de recursos hídricos, bem como para prevenção e mitigação de desastres. Dados em tempo real sobre níveis de rios e precipitação ajudam

¹) SP-ÁGUAS – Agência de Águas do Estado de São Paulo. Rua Boa Vista – n° 175, 1º andar/ São Paulo – SP. jssantos@spaguas.sp.gov.br

na antecipação de eventos críticos, como extravasamentos de rios e inundações, permitindo a implementação de medidas preventivas (FONSECA, 2021).

Eventos críticos ocorrem com certa frequência ao longo dos rios e estão relacionados com a intensidade e o volume das precipitações, além de características da região. Um exemplo histórico é a inundaçāo registrada em São Luiz do Paraitinga (SLP) em janeiro de 2010, em que uma enchente causada pela elevação do rio Paraitinga afetou 9 mil moradores e causou danos em aproximadamente 300 edificações no município, a principal causa foi o grande volume de chuva em toda região (MEDEIROS e BARROS, 2013). O distrito de Catuçaba, pertencente a SLP, também enfrenta episódios frequentes de chuvas intensas e inundações, como o ocorrido em 12 de fevereiro de 2023, em que o Ribeirão do Chapéu transbordou e inundou, atingindo 182 residências, afetando 700 pessoas (ALLUCCI, 2024).

O objetivo deste trabalho é estimar o tempo médio de resposta entre a ocorrência de chuvas registradas pelas estações pluviométricas e o consequente aumento do nível d'água observado na estação fluviométrica no Ribeirão do Chapéu. Esse curso d'água atravessa o distrito de Catuçaba e deságua no Rio Paraitinga, ambos associados aos eventos de extravasamento e inundações que afetam o distrito de Catuçaba e o município de São Luiz do Paraitinga.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo está situada na região do Vale do Paraíba e abrange três estações (Figura 1) ao longo do Ribeirão do Chapéu: a estação pluviométrica 878 (Quebra Prato), a estação pluviométrica E2-055 no distrito de Catuçaba e a estação fluviométrica 172 (Ribeirão do Chapéu) (Tabela 1). A estação 878 está posicionada entre cursos d'água do Ribeirão do Chapéu e Rio Pinga. A estação E2-055 está situada na confluência desses dois cursos d'água, que se unem e seguem em direção à estação 172. Esse curso d'água compõe o Ribeirão do Chapéu, que, após passar pela estação 172, deságua no Rio Paraitinga (Figura 1).

Tabela 1 – Características das estações pluviométricas e fluviométrica.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	TIPO	LATITUDE (°)	LONGITUDE (°)	ALTITUDE (m)
878	Quebra Prato	Pluviométrica	-23,22	-45,17	904
E2-055	Catuçaba	Pluviométrica	-23,25	-45,20	838
172	Ribeirão do Chapéu	Fluviométrica	-23,25	-45,28	812

Catuçaba é um distrito que pertence ao município de SLP, ambos são historicamente afetados por inundações, especialmente em período com grandes volumes de chuvas. Em Catuçaba, as inundações costumam ocorrer devido à rápida elevação do nível dos rios na confluência monitorada pela estação E2-055. Já SLP, especialmente durante o verão, volumes de chuva acima da média ou eventos extremos podem levar ao rápido aumento do nível do Rio Paraitinga e seus afluentes, assim como aconteceu em 2010 (ALLUCCI, 2024). A Figura 2 ilustra os impactos causados pela elevação dos níveis dos rios em SLP e Catuçaba, com base em registros jornalísticos (G1, 2024; REVISTA EMERGÊNCIA, 2024; JORNAL UNESP, 2021).

Figura 1 – Localização da área de estudo

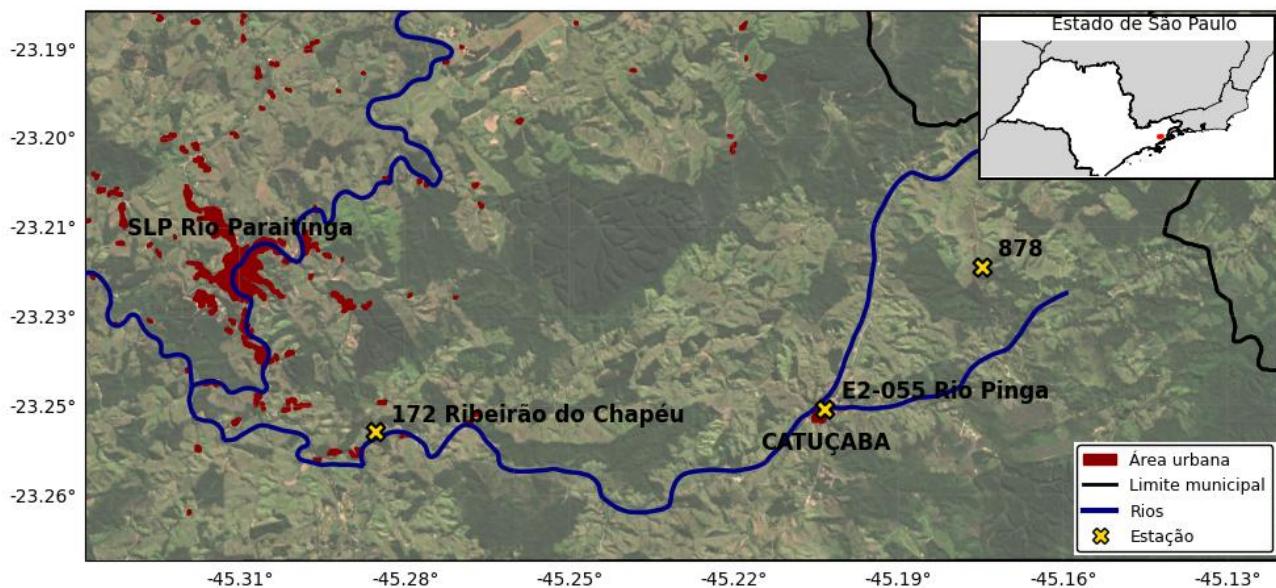


Figura 2 – Desastres causados pelas elevações dos níveis do (a) rio Piratininga e (b) Ribeirão do Chapéu.

(a) São Luiz do Paraitinga



FONTE: G1 (2024) e JORNAL UNESP (2021)

(b) Catuçaba



FONTE: G1 (2024) e REVISTA EMERGÊNCIA (2024)

Dados e identificação de eventos críticos

Os dados observados são provenientes de estações pluviométricas e fluviométrica pertencentes a SP-ÁGUAS (estação E2-055) e ao Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP) (estações 878 e 172). Inicialmente, foi realizada a remoção de *outliers* dos conjuntos de dados, na estação 172 foram descartados os dados com valores inferiores a 70 cm e superiores a 700 cm. Já nas estações pluviométricas foram eliminados valores negativos. Em seguida, foram selecionadas as datas em que o nível do rio (estação 172) atingiu valores atípicos. Para cada um desses eventos, foi extraído o volume de precipitação acumulado no dia anterior e no dia posterior à data do evento.

Análise por correlação cruzada

Levando em consideração que o sentido do curso do rio parte de 878 para 172, foi avaliada as relações entre as estações 878 e E2-055 (chuva x chuva) e E2-055 e 172 (chuva x nível). Para isso utilizou-se da análise por correlação cruzada, é uma medida estatística que quantifica o grau de similaridade entre duas séries temporais, enquanto desloca uma das séries no tempo. Essa análise permite identificar se existe alguma relação entre as variáveis e qual a defasagem temporal (*lag*) em que essa relação é mais forte (ZHA *et al.* 2022). A função de correlação cruzada entre dois sinais discretos $x(n)$ e $y(n)$, deslocado por um atraso τ (Equação 1). Em que, $y^*(n-\tau)$ representa o conjunto de $y(n-\tau)$.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y^*(n-\tau) \quad (1)$$

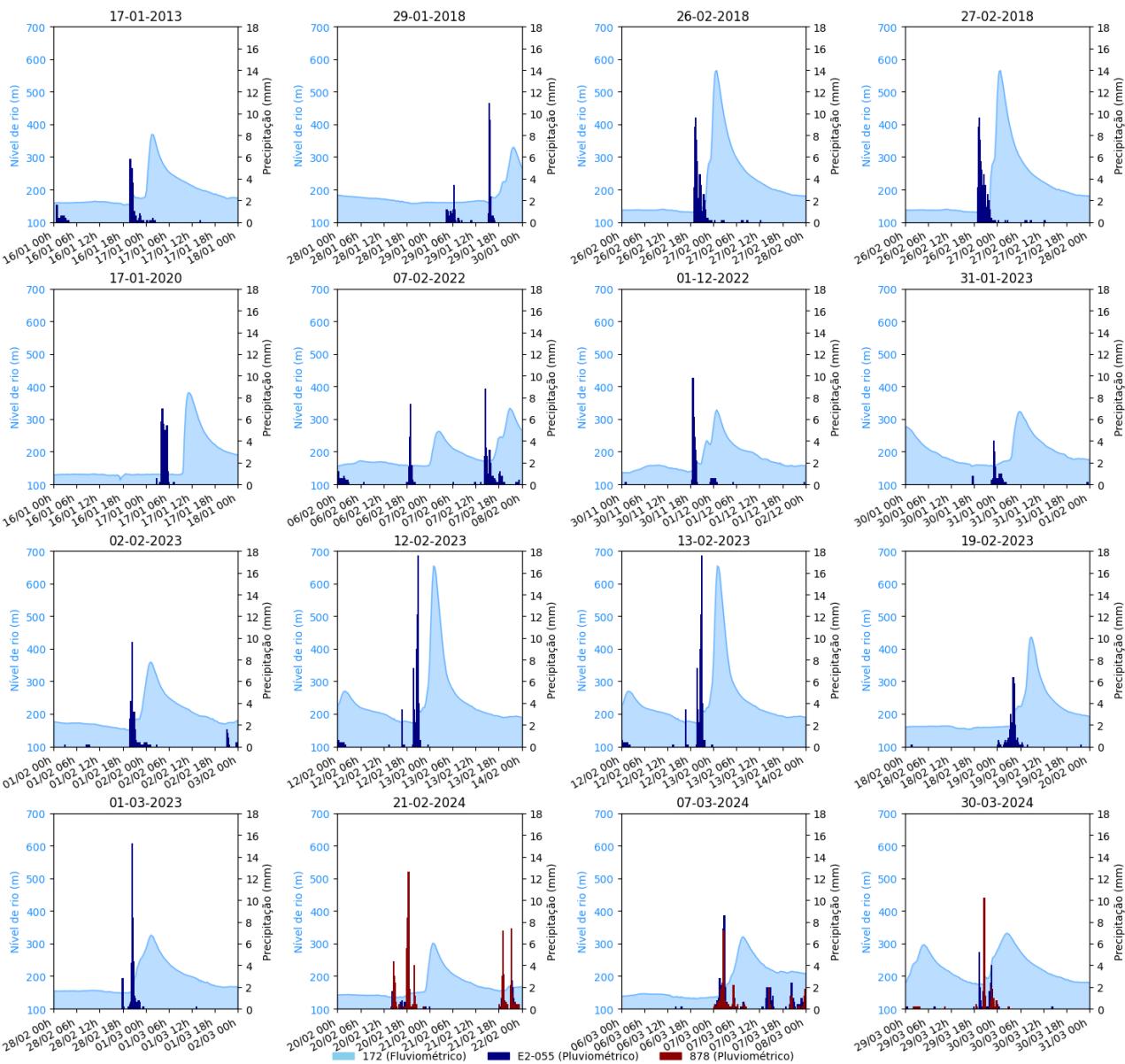
RESULTADOS

O monitoramento das chuvas e níveis de rios é crucial para a prevenção de desastres naturais, como extravasamentos e inundações. A rápida resposta do rio às chuvas intensas destaca a vulnerabilidade da região, sendo importante a existência de um bom sistema de alerta precoce, infraestrutura de drenagem urbana e planejamento urbano. A Figura 3 apresenta 16 gráficos com os eventos críticos registrados durante 2013 e 2024, mostrando a relação entre precipitação e nível do rio. Observa-se que a ocorrência de eventos críticos se intensifica nos anos mais recentes, como 2023 e 2024, o que pode estar relacionado às mudanças climáticas (PAIVA *et al.*, 2024). O ano de 2023 foi o que mais apresentou eventos críticos, isso pode estar relacionado a um melhor monitoramento, um aumento de instalação e manutenção de sensores ou uma maior frequência de eventos críticos (KAEWUNRUEN *et al.*, 2022).

Em todos os casos, observa-se uma relação significativa entre a ocorrência de chuva e o aumento do nível do rio, a resposta do rio ocorre poucas horas depois dos picos de precipitação, evidenciando uma bacia com tempo de resposta relativamente curto. Os eventos do dia 01-03-2023, 12-02-2023, 13-02-2023 e 21-02-2024 apresentam picos de precipitação e de nível de rio, com chuvas superiores a 12 mm/10min e níveis ultrapassando 500 cm. O dia 13-02-2023 apresenta o maior valor do nível de rio em um curto intervalo de tempo do pico da chuva, indicando potencial de extravasamento e inundações.

Com a análise da correlação cruzada, foi possível identificar quanto tempo o rio (estação 172) leva para reagir após uma chuva registrada em Catuçaba (estação E2-055). Também foi possível observar o atraso entre o pico da chuva na estação 878 e quando ela é percebida em Catuçaba (estação E2-055) (Figura 4). Nos eventos analisados, observa-se uma correlação positiva de moderada a forte com *lag* variando entre 1:00h e 06:50h. No dia 13-02-2023, o evento crítico apresentou uma correlação forte com *lag* de 4:40h, reforçando o risco de extravasamento em caso de grande volume de precipitação. No dia 21-02-2024 é apresentado duas correlações que mostram que o *lag* foi de 6:50 h (E2-055 vs 172) e 4:00h (E2-055 vs 878), evidenciando a importância de uma rede de monitoramento bem posicionada para sistemas de alerta precoce.

Figura 3 – Comportamento da precipitação e do nível de rio para cada evento registrado.



A Tabela 2 apresenta um resumo dos eventos críticos monitorados entre 2013 e 2024, destacando as datas dos eventos, os níveis máximos registrados do rio e os tempos médios de defasagem (*lag*) entre a chuva e a resposta no nível do rio. No que se refere ao tempo de resposta hidrológica, a estação E2-055 apresentou um *lag* médio de aproximadamente 5 horas e 30 minutos entre o pico da chuva local e o aumento do nível do rio (chuva x nível). Já na comparação entre as estações 878 e E2-055, foi analisada apenas a defasagem entre os picos de precipitação (chuva x chuva), indicando tempos de resposta mais curtos e variáveis, com média de 2 horas e desvio-padrão de 1 hora e 24 minutos.

O tempo de resposta entre as estações E2-055 e 172 é relativamente curto, o que confirma que a bacia hidrográfica tem uma resposta hidrológica rápida, com potencial para extravasamentos e inundações em caso de chuvas intensas. Já o tempo médio de resposta entre as estações 878 e E2-055, considerando apenas a defasagem entre os picos de chuva, é ainda menor, variando entre 1 e 4 horas. No entanto, como a estação 878 possui registros mais recentes e limitados, é necessário ampliar o período de coleta de dados e intensificar o monitoramento na região para obter análises mais robustas.

Figura 4 – Análise da correlação cruzada entre as estações E2-055 vs 172 e 878 vs E2-055.

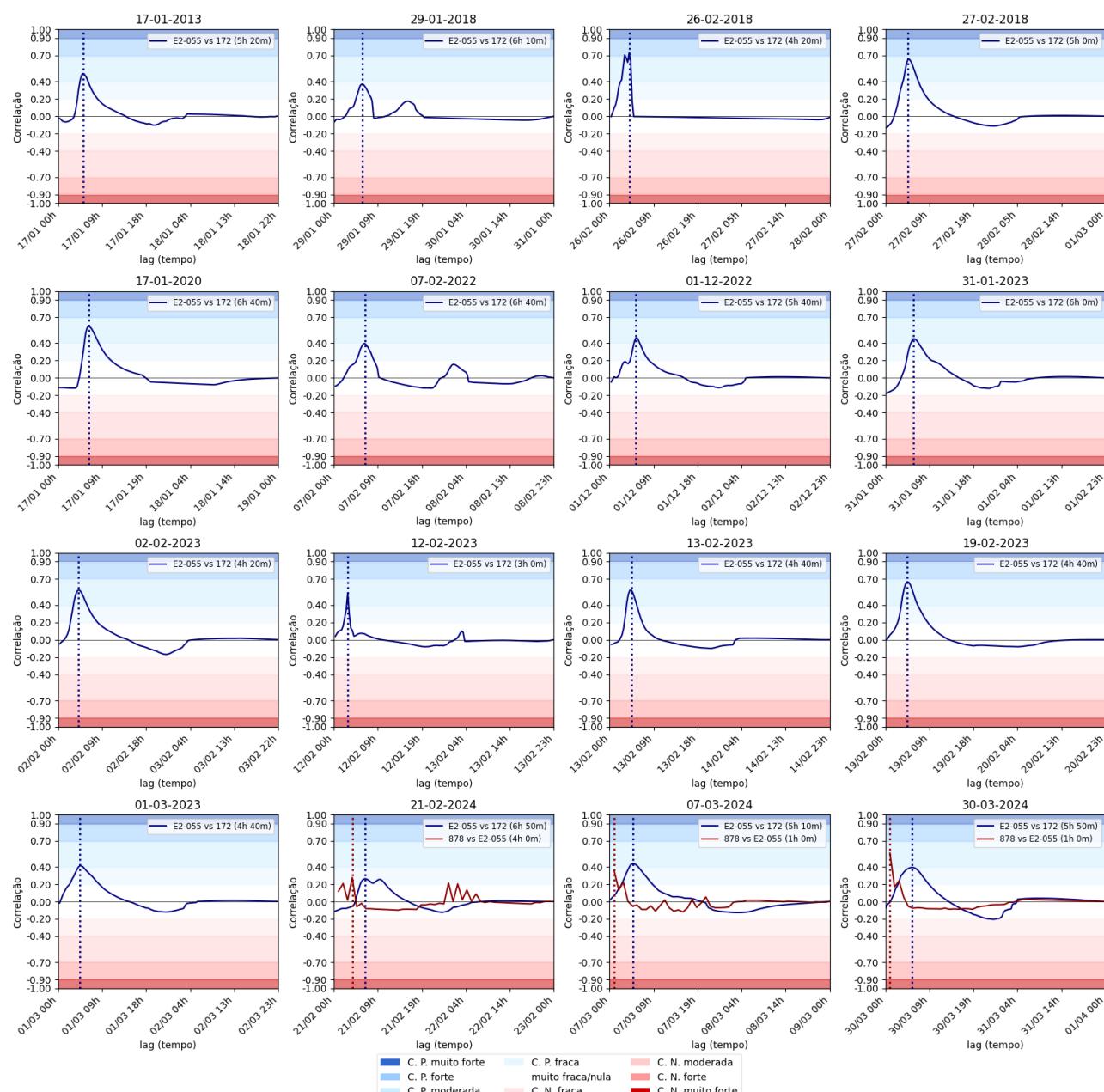


Tabela 2 – Data de ocorrência de eventos críticos e *lag* entre as estações pluviométricas e fluviométrica.

DATA	HORA	NÍVEL MÁXIMO REGISTRADO (cm)	E2-055 vs 172 (lag)	878 vs E2-055 (lag)
17-01-2013	01:50 h	370,8	05:20 h	-
29-01-2018	21:50 h	329,9	06:10 h	-
26-02-2018	00:00 h	441,9	04:20 h	-
27-02-2018	00:50 h	567,3	05:00 h	-
17-01-2020	11:10 h	381,3	06:40 h	-
07-02-2022	20:50 h	333,3	06:40 h	-
01-12-2022	00:50 h	328,9	05:40 h	-
31-01-2023	05:40 h	323,8	06:00 h	-
02-02-2023	01:20 h	359,7	04:20 h	-
12-02-2023	00:00 h	318,9	03:00 h	-
13-02-2023	01:00 h	654,7	04:40 h	-
19-02-2023	08:50 h	436,9	04:40 h	-
01-03-2023	01:20 h	326,3	04:40 h	-
21-02-2024	01:00 h	301,8	06:50 h	04:00 h
07-03-2024	07:40 h	321,1	05:10 h	01:00 h
30-03-2024	02:30 h	322,2	05:50 h	01:00 h
MÉDIA		363,9	~ 05:30 h	02:00 h
DESVIO-PADRÃO		98,6	~ 01:03 h	01:24 h
VALOR MÍNIMO		301,8	03:00 h	01:00 h
VALOR MÁXIMO		654,7	06:50 h	04:00 h

CONCLUSÃO

Os resultados evidenciaram a importância do monitoramento hidrológico em tempo real para a prevenção de desastres em regiões suscetíveis a extravasamento de rios e inundações, como Catuçaba e São Luiz do Paraitinga - SP. Os eventos críticos entre 2013 e 2024 demonstraram que episódios de chuvas intensas tem uma influência direta no nível dos rios, com tempo de resposta relativamente curto. Através da análise da correlação cruzada, concluiu-se que o tempo médio de resposta entre as estações pluviométricas 878 e E2-055 foi de 2 horas enquanto entre a estação

pluviométrica E2-055 e a estação fluviométrica 172 foi de aproximadamente 5 horas e 31 minutos. Esses resultados indicam que o Ribeirão do Chapéu apresenta uma resposta hidrológica rápida, o que pode elevar o nível do rio rapidamente e, consequentemente, a ocorrência de extravasamentos e inundações repentinas.

Em São Luiz do Paraitinga, foi instalada uma sirene automatizada integrada ao sistema de monitoramento dos rios, resultado de uma parceria entre a Defesa Civil e a SP-ÁGUAS, permitindo o acionamento imediato de alertas sonoros em situações de risco, garantindo que a população seja informada com horas de antecedência. No caso analisado, idealmente entre 5h31min antes do pico do nível do rio, esse tempo de antecedência é suficiente para permitir ações de evacuação segura, reduzindo danos materiais e, principalmente, preservando vidas.

Além disso, a SP Águas será responsável pela instalação de novos instrumentos para monitoramento pluviométrico e fluviométrico, além de dois sensores temporários (réguas eletrônicas), que serão posicionados no Pinga e Catuçaba. O pluviômetro da estação 878 será repositionado com o objetivo de ampliar o alcance do monitoramento. Com essas melhorias, o sistema poderá emitir alertas com maior precisão, baseando-se no comportamento hidrológico em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SP-ÁGUAS pelo fornecimento das diretrizes que orientaram esta análise e ao consórcio HCC3 pelo apoio ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALLUCCI, R. R., & DA SILVA SCHICCHI, M. C. (2024). São Luiz do Paraitinga: o rio e os cenários pós-enchentes. *Revista CPC*, 19(37), 35-61.
- FONSECA, A. L. D. (2021). Análise hidrometeorológica e modelagem hidráulica e hidrológica para simulação da mancha de inundação: estudo de caso na bacia do rio Quitandinha-Petrópolis-RJ.
- G1. Temporal alaga casas e deixa distrito isolado em São Luiz do Paraitinga. G1, 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-pariba-regiao/noticia/temporal-alaga-casas-e-deixa-distrito-isolado-em-sao-luiz-do-paraitinga.ghtml>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- G1. São Luiz do Paraitinga será a primeira cidade de SP a receber novo sistema de alerta de enchentes. G1, 5 jun. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-pariba-regiao/noticia/2024/06/05/so-luiz-do-paraitinga-sera-a-primeira-cidade-de-sp-a-receber-novo-sistema-de-alerta-de-enchentes.ghtml>.

regiao/noticia/2024/06/05/sao-luiz-do-paraitinga-sera-a-primeira-cidade-de-sp-a-receber-novo-sistema-de-alerta-de-enchentes.ghtml. Acesso em: 10 jun. 2025.

JORNAL UNESP. São Luiz do Paraitinga inaugura via urbana projetada por especialista da Unesp. Jornal UNESP, 27 ago. 2021. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2021/08/27/sao-luiz-do-paraitinga-inaugura-via-urbana-projetada-por-especialista-da-unesp/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

KAEWUNRUEN, S., ABDELHADI, M., KONGPUANG, M., PANSUK, W., & REMENNIKOV, A. M. (2022). Digital twins for managing railway bridge maintenance, resilience, and climate change adaptation. *Sensors*, 23(1), 252.

MEDEIROS, V. S.; BARROS, M. T. L. Metodologia para classificação de eventos extremos de precipitação em São Luiz do Paraitinga - SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20. 2013, 17-22 nov., Bento Gonçalves-RS. Anais...2013. p. 1–8. Disponível em: Acesso em: 13 jul. 2016.

PAIVA, R. C. D. *et al.* Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: subprojeto Clima: impacto de mudanças climáticas em extremos de vazão (cheias e estiagens): relatório final. 2024.

REVISTA EMERGÊNCIA. Defesa Civil do Estado de São Paulo realiza simulado de inundação em distrito de São Luiz do Paraitinga. Revista Emergência, 2024. Disponível em: <https://revistaemergencia.com.br/destaque/defesa-civil-do-estado-de-sao-paulo-realiza-simulado-de-inundacao-em-districto-de-sao-luiz-do-paraitinga/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ZHA, X., XIONG, L., CHEN, J., KIM, J. S., LIU, D., & WANG, G. (2022). Estimating multisite precipitation by a stepwise NHMM-VAR model considering the spatiotemporal correlations of precipitation amounts. *Journal of Hydrology*, 612, 128065.