

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **A HIDROLOGIA POR TRÁS DA PONTE INTERDITADA**

*Tiago Gomes da Silva<sup>1</sup>; Walkyria Barreto Montanha De Oliveira<sup>2</sup>; Manoel Camilo Moleiro  
Cabrera<sup>3</sup> & Camilla Maria Torres Pinto<sup>4</sup>*

**Abstract:** In May 2025, the bridge over the Jequitinhonha River on BR-101 (Bahia, Brazil) was closed for structural inspection due to concerns about the exposure and potential deterioration of its foundations. This study aims to investigate changes in the local hydrological regime and identify their possible causes, analyzing the influence of both regional climatic trends and the operation of the Itapebi Hydroelectric Power Plant (HPP), commissioned upstream in 2002. Monthly time series (1980–2010) of hydrological (streamflow and river stage) and climatological (precipitation, temperature, evapotranspiration, etc.) data were analyzed using the Mann-Kendall trend test with trend-free pre-whitening (TFPW) and the Mann-Whitney U test to compare pre- and post-dam periods. Results revealed statistically significant decreasing trends in all hydrological variables over the full period. While no trends were identified in precipitation, a consistent warming pattern was observed, including increases in temperature, solar radiation, and evapotranspiration, along with reduced relative humidity. The Mann-Whitney test confirmed significant differences between pre- and post-HPP periods for all river stage metrics and for minimum streamflow. The findings suggest that the bridge's structural deterioration is associated with an altered hydrological regime, likely driven by a combination of regional warming and operational impacts from the HPP, which together contributed to intensified low-flow conditions and greater foundation exposure.

**Resumo:** A interdição da ponte sobre o Rio Jequitinhonha (BR-101/BA) em maio de 2025, devido a problemas estruturais associados à exposição de suas fundações, motivou este estudo. O objetivo foi investigar as alterações no regime hidrológico local e identificar suas possíveis causas, analisando a influência de tendências climáticas e da operação da Usina Hidrelétrica (UHE) de Itapebi, instalada a montante em 2002. Foram analisadas séries mensais (1980-2010) de dados hidrológicos (vazão e cota) e climatológicos (precipitação, temperatura, evapotranspiração, etc.), através dos testes de Mann-Kendall (TFPW) e Mann-Whitney (pré e pós-usina). Os resultados indicaram tendências de queda significativas para todas as variáveis hidrológicas na série completa. A análise climática não revelou tendência na precipitação, mas um significativo aquecimento da bacia, com aumento da temperatura e da evapotranspiração. O teste de Mann-Whitney mostrou uma diferença estatisticamente significativa entre os períodos pré e pós-usina para todas as métricas de cota e para a vazão mínima. Conclui-se que a deterioração da ponte está associada a um regime hidrológico alterado, cujas causas prováveis são uma combinação da tendência de aquecimento da bacia, com os impactos diretos da UHE, que coincidem com a intensificação das vazões de estiagem.

**Palavras-Chave** – regime hidrológico, obras de arte especiais, mudanças climáticas.

1) Graduando em Engenharia Civil, DEC, UESC. E-mail: [tgsilva.egc@uesc.br](mailto:tgsilva.egc@uesc.br)

2) Graduando em Engenharia Civil, DEC, UESC. E-mail: [wbmoliveira.egc@uesc.br](mailto:wbmoliveira.egc@uesc.br)

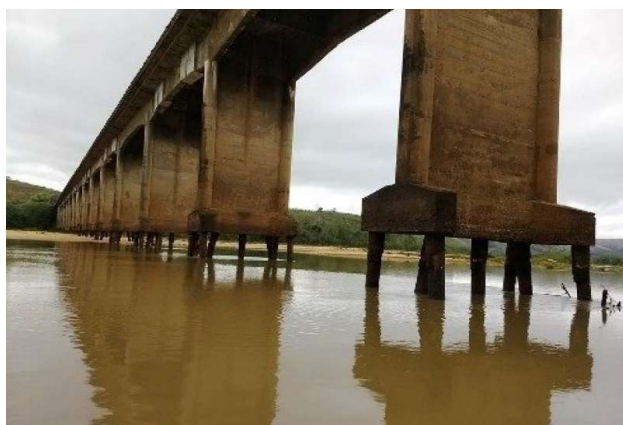
3) Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) – Departamento de Engenharias e Computação (DEC), E-mail: [mcmcabrera@uesc.br](mailto:mcmcabrera@uesc.br)

4) Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) – Departamento de Engenharias e Computação (DEC), E-mail: [cmtppinto@uesc.br](mailto:cmtppinto@uesc.br)

## INTRODUÇÃO

No dia 05 de maio de 2025, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) interditou a ponte sobre o Rio Jequitinhonha, localizada no km 661 da BR-101, em Itapebi (BA) a rodovia é uma das mais movimentadas do país sendo a principal forma de ligação entre as cidades costeiras. A ação foi motivada pela visível deterioração na fundação da estrutura (Figura 1), comprometendo sua função de suporte ao tráfego rodoviário na região. Após ensaios técnicos e inspeções estruturais, com o objetivo de avaliar o grau de comprometimento da ponte, o DNIT classificou a estrutura com nível 1 (em uma escala de risco de 1 a 5), optando por sua demolição e substituição por uma nova ponte.

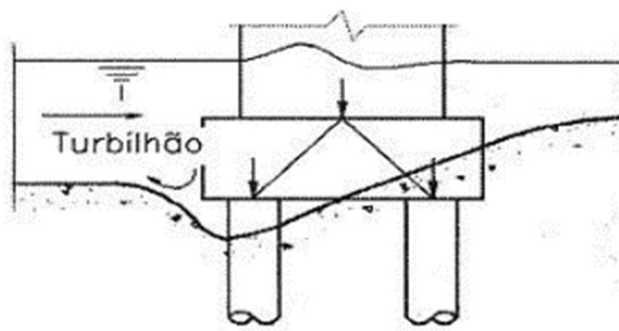
Figura 1 – Fundação da ponte parcialmente exposta



Fonte: Farol da Bahia, 2025

A Figura 1 mostra parte da fundação da ponte exposta, acima do nível d'água, sujeita às intempéries e ao ciclo de molhagem e secagem, um dos fatores que contribuem significativamente para a deterioração de estruturas de concreto armado, devido à sensibilidade do concreto às variações de umidade. Esse processo de erosão localizada, que ocorre em fundações de Obras de Arte Especiais (OAE) como pontes, o socavamento (Figura 2), está relacionado à ação da água corrente, especialmente em rios com variações significativas de vazão e instabilidade no leito (BRASIL, 2004).

Figura 2 - Efeitos da erosão localizada nas fundações de uma ponte



Fonte: Adaptado de Gusmão Filho, 2003

As vazões do rio Jequitinhonha nas proximidades da ponte são indutoras de modificações no nível de água (cota) e leito do canal, as alterações nas vazões da bacia podem estar relacionadas, entre outras, tanto às mudanças do balanço hídrico (água no solo, precipitação e evapotranspiração) e uso e ocupação da bacia (criação de reservatório e mudança cobertura vegetal). Em 2003, foi inaugurada a Usina Hidrelétrica de Itapebi (UHE Itapebi), reservatório com área inundada 61,58 km<sup>2</sup>, vazão média 406 m<sup>3</sup>/s e localizada a aproximadamente 3,8 km a montante da ponte. Empreendimentos hidrelétricos são conhecidos por alterar o regime fluvial e reter sedimentos, intensificando processos de erosão a jusante. A erosão em fundações de pontes, ou socavamento, é a principal causa de falhas estruturais em escala global (Pizarro et al., 2020), e já foi documentada como consequência de alterações antrópicas em bacias hidrográficas, como no caso do rio Sava, na Croácia (Gilja et al., 2010).

Mudanças no regime pluviométrico também podem resultar em vazões menores, afetando a dinâmica fluvial, estabilidade das margens e alterações no leito — fatores críticos para a durabilidade de infraestruturas. Adicionalmente, UHE Itapebi, tem contribuído para a retenção de sedimentos no reservatório, podendo agravar a erosão à jusante do barramento no local da ponte (Syvitski, et al., 2009; Nienhuis et al., 2013).

Diante desse panorama, torna-se essencial compreender a existência de alterações hidrológicas na bacia antes e após a construção do reservatório da UHE Itapebi. O estudo busca, de forma integrada, compreender se tais alterações hidrológicas podem ter contribuído para o processo de deterioração da ponte da BR-101.

## **METODOLOGIA**

Foram utilizadas análises com variáveis meteorológicas e hidrológicas, para investigação da existência de mudanças no regime hidrológico do rio Jequitinhonha, que podem ter contribuído para o agravamento da deterioração da ponte da BR – 101, e a possível influência da UHE Itapebi na promoção dessas mudanças.

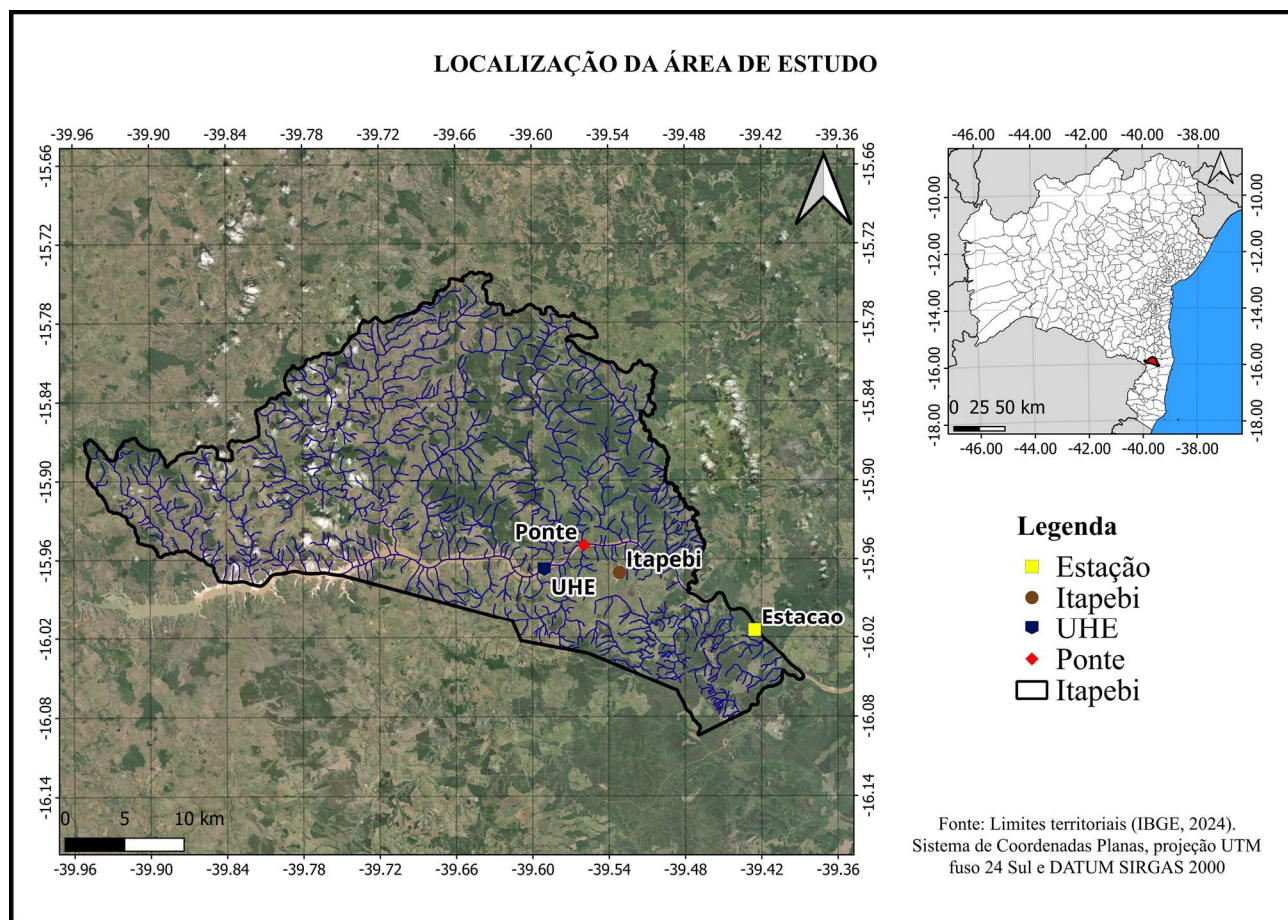
Inicialmente, foram obtidos dados climáticos do CABra dataset: precipitação, umidade relativa, radiação solar, evapotranspiração (estimada pelo método Penman-Monteith), temperaturas máximas e mínimas. Em seguida, foram extraídas informações da estação fluviométrica 54950000, da plataforma Hidroweb, a qual disponibiliza os dados hidrológicos de vazão e cota.

Os dados climáticos foram organizados em uma escala mensal, no período de janeiro de 1980 a dezembro de 2010. Já, para os dados de cota e vazão, janeiro de 1980 a dezembro de 2011. Posteriormente, foram aplicados dois testes estatísticos não paramétricos. Para todos os índices climatológicos e hidrológicos, foi aplicado o teste de Mann-Kendall com pré-branqueamento sem tendência (TFPW – Trend-Free Pre-Whitening), desenvolvido por Yue et al. (2002), o qual avalia a presença de tendências de aumento ou queda em uma série histórica; e, somente para os índices hidrológicos, foi aplicado o teste de Mann-Whitney (MU), desenvolvido por Mann e Whitney (1947), o qual avalia a existência de uma diferença estatisticamente significativa entre duas amostras: no caso, os períodos pré-usina (1980-2002) e pós-usina (2003 – 2010).

A Figura 3 mostra a área de estudo.



Figura 3 – Área de estudo



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Estudos hidrológicos

Os resultados os testes de MK e MW são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados estatísticos para índices hidrológicos

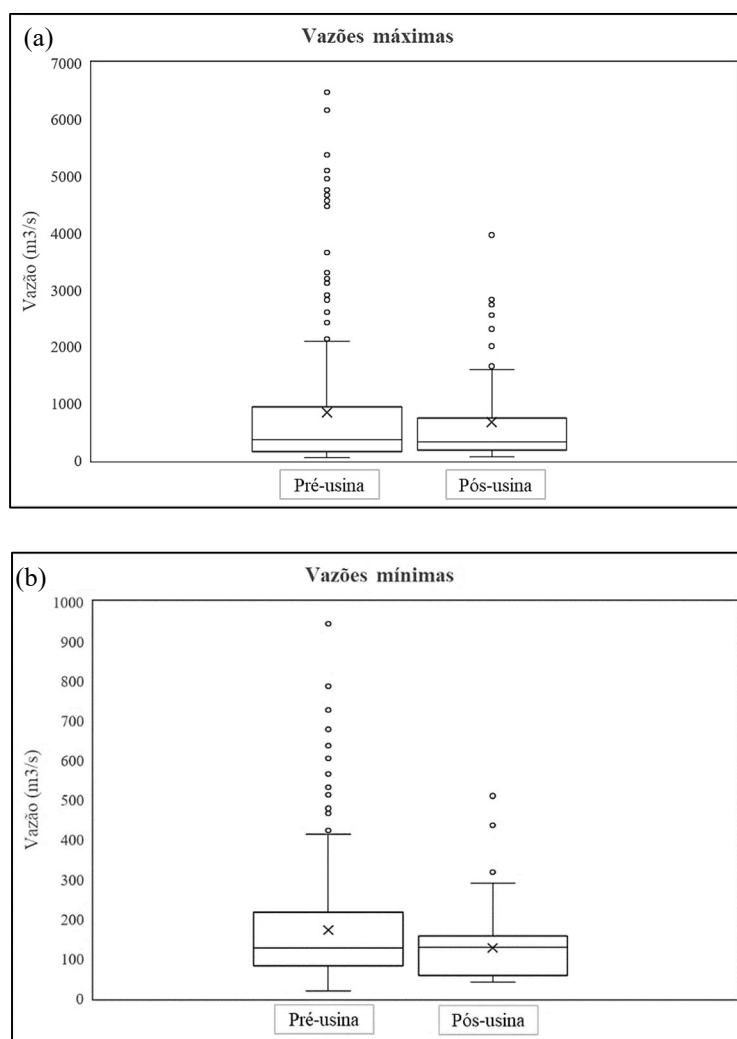
Índice	Tendência (MK)	Valor-p (MK)	Resultado (MU)	Valor-p (MU)
Cotas médias	Diminuição	$p < 0,001$	Diferença significativa	$p = 0,0036$
Cotas mínimas	Diminuição	$p < 0,001$	Diferença significativa	$p < 0,001$
Cotas máximas	Diminuição	$p < 0,001$	Diferença significativa	$p = 0,0165$
Vazões médias	Diminuição	$p < 0,001$	Não há diferença significativa	$p = 0,3142$
Vazões máximas	Diminuição	$p = 0,0024$	Não há diferença significativa	$p = 0,9675$
Vazões mínimas	Diminuição	$p < 0,001$	Diferença significativa	$p = 0,0103$

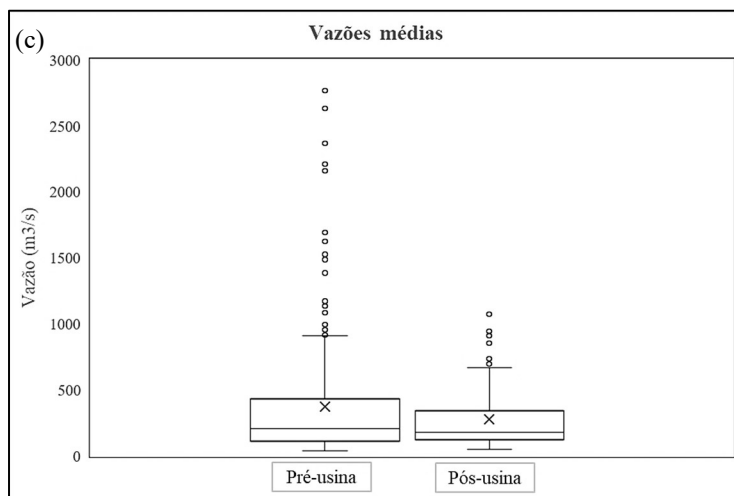
Os resultados para vazão e cota na estação fluviométrica indicam uma diminuição de todos os índices ao longo do período analisado, mostrando indícios de uma mudança hidrológica do rio, que pode ter sido causada tanto por questões de mudanças climáticas na região, quanto por modificações antropogênicas na bacia.

Para a investigação da influência da UHE Itapebi, o teste MU mostrou diferenças significativas entre os períodos pré e pós-usina para todas os índices de cotas, evidenciando assim a possível alteração nas características do rio que passa pelas proximidades da ponte, que vai de encontro com as imagens observadas anteriormente, com parte da fundação exposta. Para as vazões, foi identificada diferença estatística apenas para a vazão mínima, que aliado ao resultado de MK, demonstra uma intensificação das secas na região.

A Figura 4 mostra os boxplots para as vazões estudadas.

Figura 4 – Boxplot para vazões (a) máximas (b) mínimas e (c) médias

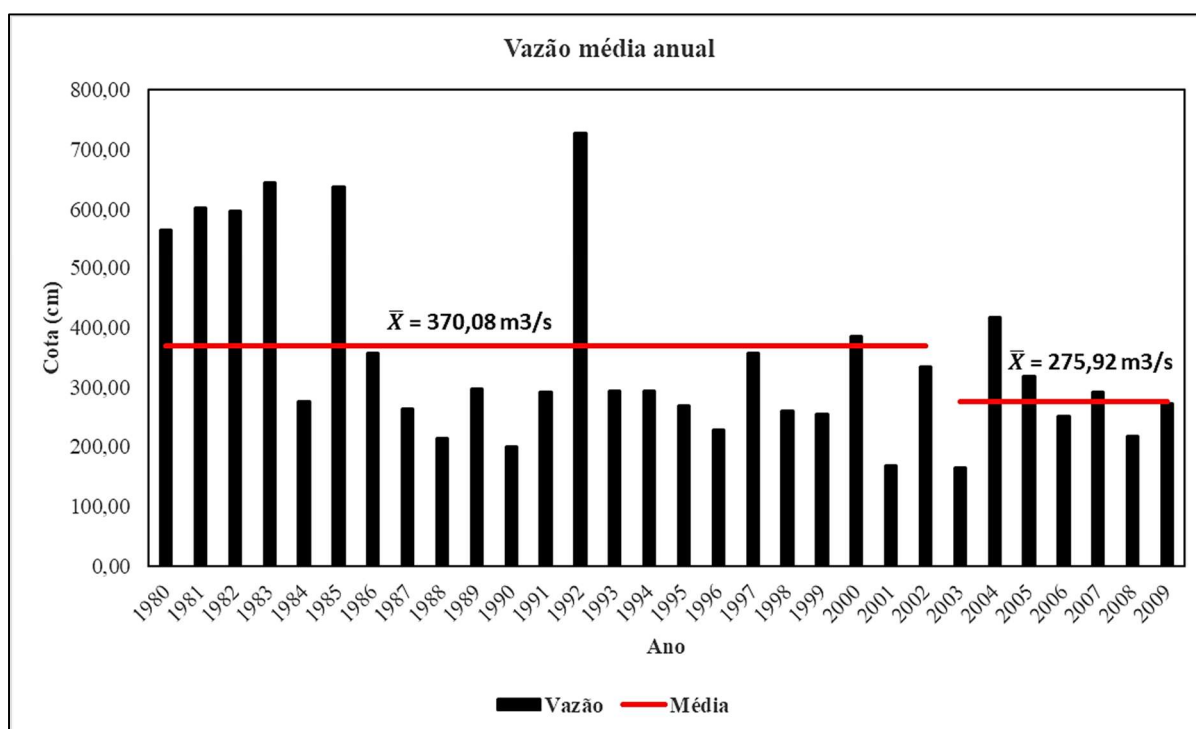




Em todos os gráficos fica evidente a redução em relação aos valores anteriores a formação do reservatório, no período pós-usina tem-se uma aproximação dos limiares superiores e inferiores, e também uma diminuição do número de outliers, provavelmente devido a regularização das vazões promovida pela barragem. Com o aspecto visual fica claro a tendência encontrada no teste de MK para as vazões mínimas, onde é possível notar uma grande redução nas suas estatísticas, com queda em quase todos os fatores, com exceção da mediana, que continuou bem próxima para os dois períodos.

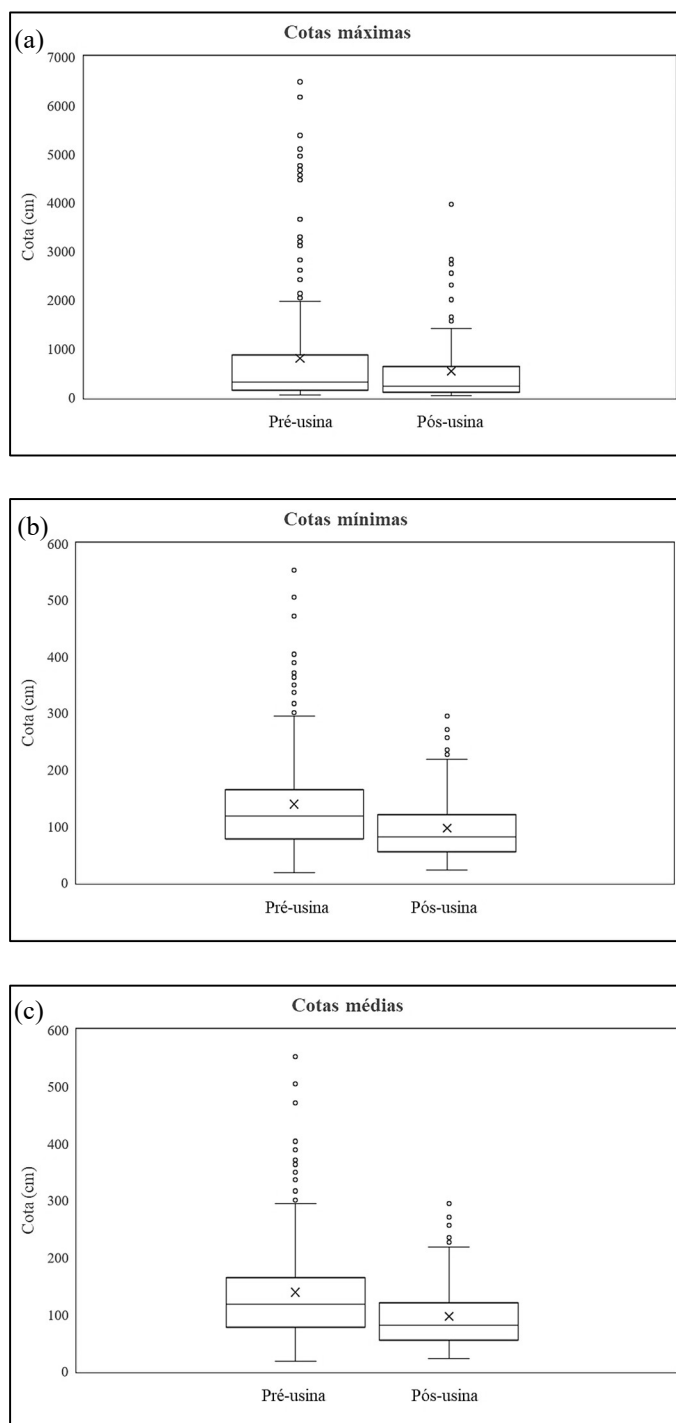
Olhando exclusivamente para a média entre os períodos antes e depois da construção da UHE Itapebi, vemos uma redução no valor, como é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Vazão média do rio Jequitinhonha entre 1980 a 2009.



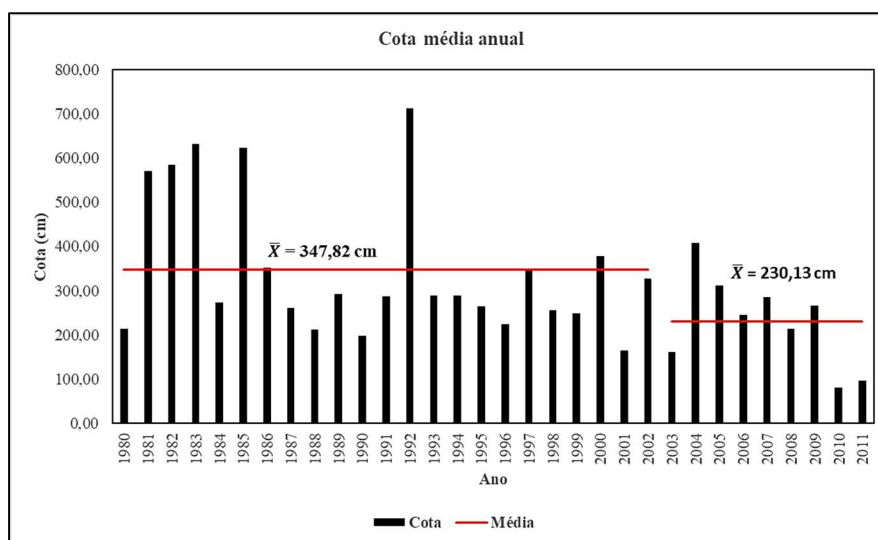
Como é observado no gráfico da Figura 5, houve uma redução de 94,15 m<sup>3</sup>/s na vazão média entre os períodos pré e pós-usina, o que corresponde a uma queda de aproximadamente 25%. A Figura 6 mostra os boxplots para as cotas estudadas.

Figura 6 - Boxplot para as cotas (a) máximas (b) mínimas e (c) médias na estação fluviométrica a jusante do barramento e distante cerca de 3,8 km da ponte da BR101



O mesmo efeito de regularização de vazões pode ser observado nas cotas da Figura 5, com uma aproximação dos limiares e diminuição da presença de outliers. Mas diferente do índice anterior, em todos os gráficos houve uma queda na média, mediana e demais quartis, mostrando assim, uma redução expressiva do nível do rio. A Figura 7 mostra a variação anual da cota média.

Figura 7 – Cota média do rio Jequitinhonha entre 1980 a 2011.



Como é observado no gráfico da Figura 7, houve uma redução de 117,69 cm na cota média entre os períodos pré e pós-usina, cerca de 34% de redução. Este rebaixamento é consistente com observações em outros rios que sofreram intervenções. No rio Sava (Croácia), por exemplo, a regularização do fluxo por barragens e a extração de sedimentos levaram a quedas de até 133 cm no nível médio anual, contribuindo diretamente para a instabilidade de uma ponte ferroviária (Gilja et al., 2010). A analogia fortalece a correlação entre a operação da UHE Itapebi, a mudança hidrológica observada e a consequente exposição das fundações da ponte na BR-101.

## Condições climáticas

Os resultados do teste Mann-Kendall para os índices climáticos disponíveis no CABra dataset são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados estatísticos para normais climatológicas

Índice	Tendência	Valor-p
Precipitação médias	Sem tendência	p = 0,8518
Precipitação mínimas	Sem tendência	p = 0,1911
Precipitação máximas	Sem tendência	p = 0,9706
Temperatura máxima	Aumento	p = 0,0011
Temperatura mínima	Aumento	p < 0,001
Evapotranspiração	Aumento	p = 0,0042
Umidade	Diminuição	p = 0,0165
Radiação	Aumento	p = 0,0014



Observando os resultados da Tabela 2, percebe-se indícios de aquecimento da bacia hidrográfica, evidenciado pelo aumento das temperaturas máximas e mínimas, radiação solar e evapotranspiração, e uma diminuição na umidade relativa do ar. Entretanto, não foram identificadas tendências para a precipitação. Embora, estudos recentes aliados com projeções climáticas indicam que a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha vem enfrentando uma redução significativa nos volumes de precipitação desde 2006, com projeções de decréscimo de até 48% até o final do século (Nervino, 2023). Logo, um dos possíveis fatores que podem ter auxiliado na redução das vazões e cotas do rio Jequitinhonha na área de estudo, é uma possível alteração nas condições climáticas da bacia, favorecendo a perda de água para a atmosfera através da evapotranspiração devido ao aquecimento do ambiente.

## CONCLUSÃO

Os resultados permitiram identificar dois períodos hidrológicos estatisticamente distintos na bacia do Rio Jequitinhonha, antes e depois do reservatório da UHE Itapebi. Não foi observado tendência de aumento ou diminuição na precipitação da bacia. Já para a evapotranspiração houve uma tendência de aumento, indicando uma intensificação da perda de água da bacia para a atmosfera.

Após o funcionamento da usina uma diminuição nas vazões mínimas foi observada. Essa diminuição das vazões mínimas teve como reflexo, uma redução em todas as cotas fluviométricas (máximas, médias e mínimas) nas imediações da ponte o que pode ter acelerado o processo de deterioração da ponte da BR – 101, devido ao rebaixamento do nível de água com exposição frequente das fundações da ponte ao ciclo de secamento e molhamento. Outra possibilidade que pode atuar em conjunto com o ciclo de molhamento para acelerar a degradação das estruturas é o favorecimento do escoamento torrencial e erosão do leito de base em torno dos elementos de fundação devido a proximidade da ponte com a UHE. As manobras das comportas, canais de fuga, sistemas de adução e outros dispositivos hidráulicos da UHE também produzem intensas oscilações de vazão que são diretamente transferidas para as estruturas de sustentação. A ponte foi construída antes da existência da hidrelétrica.

Conclui-se que a deterioração da ponte está associada a um regime hidrológico alterado, cujas causas prováveis são uma combinação da tendência de aquecimento da bacia com os impactos diretos da UHE. Este estudo de caso, alinhado a pesquisas que apontam o socavamento como uma ameaça crítica (Pizarro et al., 2020) e a casos práticos de vulnerabilidade de pontes a jusante de barragens (Gilja et al., 2010), evidencia a necessidade de reavaliar os riscos em infraestruturas existentes sob novas condições operacionais e climáticas.

Ressalta-se a necessidade contínua de manutenção e inspeção às estruturas de Obras de Arte Especiais no contexto de mudanças climáticas e alterações na bacia hidrográfica ao longo do tempo, visto que as infraestruturas são consideravelmente suscetíveis às implantações à montante. Os estudos hidrológicos contínuos e paralelos às modificações tornam-se fundamentais para avaliar a dinâmica fluvial e os fatores que levam à instabilidade de infraestruturas, permitindo compreender a relação entre o regime hidrológico e o desempenho estrutural.

## REFERÊNCIAS

- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T.; MEIRA NETO, A. A.; ROY, T.; TROCH, P. (2020). *Cabra: A novel large-sample dataset for brazilian catchments*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, pp. 1-40.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2004). *Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias*. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 143 p.
- BRASIL. Ministério da Justiça e Segurança Pública. Polícia Rodoviária Federal. (2025). *Ponte sobre o rio Jequitinhonha é totalmente interditada a partir desta segunda-feira (5)*. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/prf/pt-br/noticias/estaduais/bahia/2025/maio/ponte-sobre-o-rio-jequitinhonha-e-totalmente-interditada-a-partir-desta-segunda-feira-5>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- GILJA, G.; OSKORUŠ, D.; KUSPILIĆ, N. (2010). Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences. In: **Proceedings of the International Conference on Water Observation and Information System for Decision Support (BALWOIS)**, Ohrid, Macedônia.
- GUSMÃO FILHO, J. de A. (2003). *Fundações de Pontes: Hidráulica e Geotécnica*. Recife: Editora Universitária UFPE, 326 p.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. (1947). *On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other*. The annals of mathematical statistics, v. 18, n. 1, pp. 50-60.
- NERVINO, M. R. (2023). *Vulnerabilidade do delta do Rio Jequitinhonha (Nordeste do Brasil) às mudanças climáticas*. 62 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- NIENHUIS, J. H.; ASHTON, A. D.; ROOS, P. C.; HULSCHER, S. J. M. H.; GIOSAN, L. (2013). *Wave reworking of abandoned deltas*. Geophysical Research Letters, v. 40, n. 22, pp. 5899-5903.
- PIZARRO, A.; MANFREDA, S.; TUBALDI, E. (2020). The Science behind Scour at Bridge Foundations: A Review. **Water**, v. 12, n. 2, art. 374.
- REDAÇÃO, Da. (2025). *Ponte sobre o Rio Jequitinhonha será interditada por 15 dias na BR-101*. Farol da Bahia, Salvador. Disponível em: <https://www.faroldabahia.com.br/noticia/ponte-sobre-o-rio-jequitinhonha-sera-interditada-por-15-dias-na-br-101>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- SYVITSKI, J. P. M.; KETTNER, A. J.; OVEREEM, I.; HUTTON, E. W. H.; HANNON, M. T.; BRAKENRIDGE, G. R.; DAY, J. et al. (2009). *Sinking Deltas Due to Human Activities*. Nature Geoscience, v. 2, pp. 681-686.
- YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. (2002). *The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series*. Hydrological Processes, v. 16, n. 9, pp. 1807-1829.