



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 2 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n2ID41795>



Cenários de Mudanças Climáticas e as Implicações Hídricas na Barragem de Epitácio Pessoa – Paraíba

Climate Change Scenarios and Water Implications at the Epitácio Pessoa Dam – Paraíba

Yuri Batista Oliveira Gomes¹; Ângela Maria Cavalcanti Ramalho²; Ricardo Alves de Olinda³

¹ Universidade estadual da Paraíba (UEPB), Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional, Campina Grande-PB, Brasil. Email: yuribog494@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4267-3856>

² Universidade Estadual da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional, Campina Grande-PB, Brasil.
Email: angela@servidor.uepb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/000-0002-8567-4367>

³ Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Estatística, Campina Grande-PB, Brasil.
Email: prof_ricardo@servidor.uepb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/000-0002-0509-8428>

Resumo: Este artigo tem como objetivo analisar os efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da barragem Epitácio Pessoa, localizada no semiárido paraibano. O estudo se concentra nas alterações nos ciclos hidrológicos, no aumento de eventos extremos e nas mudanças nos padrões de precipitação, principalmente devido a períodos prolongados de seca. A metodologia incluiu, além da revisão de literatura nacional e estrangeira, a análise de gráficos de séries temporais, dividida em dois recortes temporais: o primeiro de trinta anos (1993-2023), para dados de séries temporais, e o segundo de onze anos (2012-2023), para dados de sazonalidade, previsão, tendência e séries estacionárias que foram extraídas de bases de dados oficiais da AESA. Foram aplicados, ainda, os modelos estatísticos de ARIMA e SARIMA e testes Dickey-Fuller, para avaliar a estacionaridade, e Mann-Kendall, para identificar tendências. O presente estudo destaca a vulnerabilidade hídrica e as implicações nos sistemas hídricos nas regiões semiáridas, comprometendo o cenário climático futuro; nesse sentido, os resultados mostram variações climáticas significativas, as quais afetam a disponibilidade e a qualidade da água, a evaporação e a sazonalidade, aspectos que implicam, diretamente, no abastecimento d'água a longo prazo.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Modelos Estatísticos; Semiárido.

Abstract: This article analyzes the effects of climate change on the water resources of the Epitácio Pessoa Dam, located in the semiarid region of Paraíba. The study focuses on changes in hydrological cycles, the increase in extreme events, and changes in precipitation patterns, primarily due to prolonged periods of drought. The methodology included, in addition to a review of national and international literature, the analysis of time series graphs, divided into two time periods: the first spanning thirty years (1993-2023) for time series data, and the second spanning eleven years (2012-2023) for seasonality, forecast, trend, and stationary data extracted from official AESA databases. The statistical models ARIMA and SARIMA were also applied, along with the Dickey-Fuller test to assess stationarity and the Mann-Kendall test to identify trends. This study highlights water vulnerability and the implications for water systems in semiarid regions, compromising the future climate scenario. In this sense, the results show significant climate variations, which affect water availability and quality, evaporation, and seasonality, aspects that directly affect long-term water supply.

Keywords: Climate Change; Statistical models; Semiarid.

Recebido: 13/10/2025; Aceito: 02/12/2025; Publicado: 17/12/2025.

1. Introdução

As mudanças climáticas estão associadas à influência de fatores naturais e às ações antrópicas e atmosféricas, inclusive, ao aumento médio da temperatura global da Terra, provocado pelas emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. As instabilidades climáticas, na escala temporal, apresentam um conjunto de variações estatísticas com tendências sobre as mudanças no sistema climático e sobre as ferramentas para combatê-las, dependendo da sua intensidade durante a série temporal estudada.

Em se tratando das consequências das mudanças climáticas, identificamos que elas incidem em diversas áreas, produzindo impactos diretos e indiretos, tanto a nível global quanto local, afetando o bem-estar humano na cidade e no campo, pois interferem na saúde, na segurança alimentar, nas culturas agrícolas e no sistema de produção, o que, consequentemente, pode ocasionar uma série de desarranjos ambientais, como aumento das ondas de calor, inundações, deslizamento de terras e estiagens prolongadas (IPCC, 2023).

Neste contexto, segundo Teixeira (2025), tais fatores podem ser medidos através de análises estatísticas que relacionam as mudanças aos fatores climáticos durante um intervalo de tempo curto ou prolongado, podendo ocasionar impactos e riscos extremos, tais como: estiagens prolongadas, enchentes e desabamentos, episódios identificados no histórico de dados meteorológicos e pluviométricos, sendo de total relevância no papel das perspectivas do planejamento de políticas públicas de gestão hídrica.

Além disso, em alterações suaves ou monótonas (aumento ou diminuição) dos fenômenos climáticos, os quais interferem nos processos de resiliência, mitigação e adaptação, são evidenciados valores médios dessas séries históricas de chuvas e temperaturas, a médio e longo prazos, podendo ocorrer, a depender da escala geográfica, numa região específica ou maior, sendo confirmados por tendências de séries temporais (IPCC, 2023).

A abordagem acerca das mudanças climáticas é uma pauta recorrente nos debates ambientais e acadêmicos, nas políticas ambientais e nos estudos científicos, tendo em vista que os dados sobre a frequência de eventos severos são alarmantes, sinalizando a necessidade da revisão de modelos de desenvolvimento rumo à sustentabilidade, no intuito de se obter avanços futuros. Tal problemática começa a ser discutida a partir de 1970, especificamente no ano de 1972, na reunião da Organização das Nações Unidas sobre o meio ambiente, realizada em Estocolmo (Suécia), entretanto, somente em 1987, a ONU criou a Comissão do Meio Ambiente das Nações Unidas, quando foram definidas as premissas para o desenvolvimento sustentável para gerações futuras (MORAIS *et al.*, 2022).

Vale ressaltar que os fatores climáticos influenciam, significativamente, nos desastres ambientais de grandes proporções resultantes, sobretudo, das condições geográficas e hídricas em larga escala; os recursos das bacias hidrográficas e de seus mananciais, considerando que cada uma delas tem uma função hidrológica de abastecimento, captação, armazenamento e distribuição (quantitativa e qualitativa), são submetidos a avaliações sobre os efeitos das alterações climáticas a partir do aproveitamento e das perdas na distribuição da água. O aumento da evapotranspiração ocasiona uma vulnerabilidade hídrica nas barragens, comprometendo a disponibilidade de água de qualidade em diversas regiões brasileiras, em especial no Nordeste, agravando os cenários climáticos, aumentando substancialmente a temperatura e diminuindo o índice pluviométrico, resultando, portanto, em estiagens prolongadas (JIMÉNEZ CISNEIROS *et al.*, 2014).

No Brasil, a previsão de aumento na temperatura (de 1°C a 6 °C) pode ser atribuída à emissão de gases de efeitos estufa, que intensifica o processo de evaporação à superfície e provoca alterações no balanço hídrico da vegetação natural e das culturas agrícolas. Tais fatores, associados ao aumento da população, à distribuição espacial desigual e à falta de manejo adequado, atenta-se para um problema secular que desafia a gestão de recursos hídricos: a garantia universal do acesso à água, que se apresenta de modo mais danoso em regiões onde há a predominância da agricultura de subsistência no semiárido nordestino (JACOBI; NASCIMENTO, 2016).

Ao longo do século XXI, algumas projeções pontuam que os recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, vão reduzir na maioria das regiões subtropicais secas, intensificando a disputa por água entre os setores, riscos que se relacionam tanto à redução no abastecimento de água não tratada quanto à distribuição da água potável que, devido ao aumento da temperatura, à sedimentação, à concentração de nutrientes e às cargas poluentes provenientes de chuvas intensas, tem sua qualidade comprometida, por mais que seja submetida ao tratamento convencional (JACOBI; NASCIMENTO, 2016).

Assim, o estudo tem como objetivo analisar os efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos na barragem Epitácio Pessoa, localizada no semiárido paraibano. A pesquisa parte da premissa de que os ciclos hidrológicos sofrerão alterações dos fenômenos naturais e cíclicos de El Niño e a La Niña, que estão cada vez mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas, resultando em eventos extremos prolongados de estiagens interferindo nos padrões de precipitação e volume d'água, durante as séries temporais delimitadas no estudo realizado.

2. Metodologia

Para a realização deste estudo foi realizada a pesquisa quantitativa com coleta de dados da AESA, considerando o intervalo de tempo de 30 anos das informações utilizadas (janeiro de 1993 a setembro de 2023), no intuito de identificar o índice pluviométrico de séries temporais de chuvas e volume hídrico na barragem Epitácio Pessoa e, no período entre 2012 a 2023, sobre os dados percentuais anuais de tendência, sazonalidades e volumes, de acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA).

Ainda como fontes, fizemos uso dos periódicos da CAPES como respaldo para teorizar a temática de análises das variações estatísticas, especificando as séries temporais dos índices de chuvas, volume, abastecimento, capacidade hídrica, fatores ambientais e antrópicos climáticos, ocorridos nas três décadas mencionadas.

No que tange à localização do município sede da barragem, utilizamos o software Qgis e o programa estatístico R, que agrupa a coleta e o tratamento das análises de um conjunto de dados em gráficos conjugados de série temporal, atribuindo médias percentuais anuais de volumes, tendências, sazonalidades e perfis de séries. Já para a análise dos dados de volumes anuais da barragem de Epitácio Pessoa (integrante da bacia hidrográfica do Rio Paraíba), disponibilizados pela AESA, utilizamos o padrão estatístico de SARIMA (Modelo de Autorregressivo Integrado de Médias Móveis com Sazonalidade).

Por fim, utilizamos os Testes de Mann-Kendall e Dickey-Fuller, cuja função se contribui para a observação das séries de não-estacionariedade, atribuindo a tendência na série temporal, considerando que se adequa melhor na incorporação das funções de equações estatísticas para ordens de volume, sazonalidades, ciclos climáticos e variações próximas às barragens, correspondendo ao período de intensos fenômenos climáticos nos últimos 11 anos (janeiro de 2012 a dezembro de 2023).

2.1 Área de estudo

A barragem Epitácio Pessoa está localizada no município de Boqueirão, inserido, geograficamente, na mesorregião da Borborema, a 46,6 km de Campina Grande e 146 km de João Pessoa, capital do estado. Também é conhecida como Cidade das Águas está inserida na bacia do Rio Paraíba, por sediar a Barragem Epitácio Pessoa, segundo maior manancial hídrico do estado, com capacidade de armazenar 400 milhões de metros cúbicos de água.

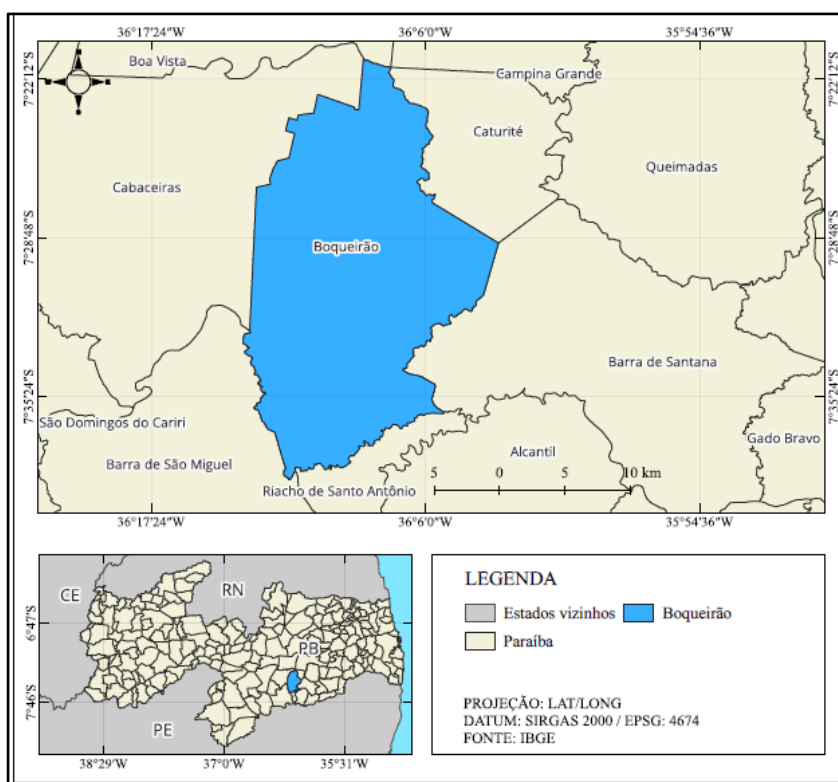


Figura 1: Mapa de localização do município de Boqueirão-PB.

Fonte: IBGE (2022).

Identificada em azul na Figura 1, Boqueirão é responsável pelo abastecimento de mais de 1,8 milhão de habitantes, distribuídos em 19 municípios da região metropolitana de Campina Grande-PB (IBGE, 2022).

2.2 Coleta de dados das séries históricas

De acordo com Teixeira (2025), as séries históricas são definidas e classificadas em três categorias de componentes não observáveis: Tendências (Tt), Sazonalidade (St) e variação aleatória ou Ruído Branco (Et); escolhido o modelo matemático e definidos os critérios de elaboração relacional de aditivos das categorias dos componentes citados ($Z_t = T_t \times St \times Et$), temos a transformação em um log, que passa de modelo multiplicativo, convertendo-se em um log-linear que, no final da análise, resulta numa equação de séries históricas.

À cada modelo de série temporal deve ser atribuída a situação considerando séries estacionárias e não estacionárias, pois demandam uma adaptação do modelo mais indicado ao trabalho. O modelo não estacionário deve ser definido quando o período da série demarcada oscila na média e depois muda de patamar (diferença da série), quando a série estabelece relação de tendência, para convertê-la em estacionária, é necessário transformar em uma segunda diferença o que, neste caso, se indica o Modelo de Arima devido à sazonalidade incidente em múltiplos períodos, considerando o modelo classificado em um componente estocástico (MORETTIN; TOLLOI, 1985;2004; 2006).

Diante disso, uma série temporal ou histórica requer um intervalo de tempo conjugado a uma sequência de dados obtidos ao longo do tempo e, para isso, devemos utilizar como parâmetros da série temporal o fenômeno climático a ser estudado, a partir do qual as análises nos fornecerá uma descrição do comportamento da série e suas médias estimadas, tendo em vista uma relação de causa e efeito que, segundo Yin (2001), é sequência de modelo de família SARIMA e o que melhor se adequa às previsões e estimativas de representação de modelos e diagnósticos de perfis de séries, residuais, previsões, tendências e estimativas.

As séries históricas analisadas neste trabalho foram obtidas do Sistema de dados hídricos e meteorológicos (SEIRA) da AESA e, para a barragem Epitácio Pessoa foram coletados dados de séries temporais em dois intervalos de tempo: de 30 e de 11 anos, os quais possuem valores anuais de cotas dos volumes hídricos, sazonalidades, previsão e tendências.

2.3 Análise estatística das séries históricas

Para Box et al. (2008), a modelagem estatística de SARIMA é determinada por uma série proveniente da temporal: z_1, z_2, \dots, z_N , na qual observamos os intervalos de tempo, igualmente espaçados, onde o operador de retardo B é definido por $Bz_t = z_{t-1}$, isto é $Bmz_t = z_{t-m}$; nas séries temporais de sazonalidade, o período utiliza o operador $BSz_t = z_{t-S}$. Além disso, o operador de diferença ∇ é definido por $\nabla z_t = z_t - z_{t-1} = (1-B)z_t$ (diferença de ordem 1) e o de diferença ∇_S é definido por $\nabla_S z_t = z_t - z_{t-S} = (1-BS)z_t$ (diferença sazonal de ordens). Nesse aspecto, Morettin (2006) sugere que os modelos sazonais multiplicativos autorregressivos integrados de médias móveis (SARIMA).

O autor ainda salienta que a série temporal se baseia por S (sazonalidade), por exemplo, para dados mensais, enquanto $\Phi_P(BS)$ e $\Theta_Q(BS)$ são polinômios em BS de graus P e Q , respectivamente; $\Phi_P(B)$ e $\Theta_Q(B)$ são polinômios em B de graus P e Q , respectivamente: $\nabla_S = 1-BS$ e $\nabla = 1-B$; dadas as respectivas ordens de diferenciação sazonal, simples e osat é uma série de choques aleatórios ou ruído branco, onde o modelo da série é dito ser da ordem $(p,d,q) \times (P,D,Q)$ s.

Diante disso, a obtenção deste modelo está atrelada a uma da série temporal, seguida por uma estratégia organizada com processo iterativo, na qual a escolha da estrutura do modelo baseia-se nos próprios dados; assim, as fases do processo consistem na especificação da classe geral de modelos, que identifica aquele respaldado nas análises de autocorrelações integrais e parciais, estimadas a partir dos parâmetros de verificação, por meio de uma análise dos resíduos de modelo, no sentido de atingir o menor equívoco de previsão.

Neste sentido, foi adotada a metodologia de modelagem SARIMA que, segundo Morettin e Tolo (2006) e Diggle (1992), é a melhor forma para calcular as médias das séries temporais estacionárias e não estacionárias com sazonalidades dos volumes hídricos da barragem de Epitácio Pessoa, onde constatamos, por meio de comparações, os modelos de previsão na série temporal de monitoramento de barragem, resultando em modelos gráficos temporais de sazonalidades, em perfil de volumes (%) de séries estacionárias e não estacionárias e em previsões do comportamentos de séries dos volumes das cotas (em %) da barragem para os próximos 12 meses.

Vale ressaltar que um dos princípios basilares da modelagem de SARIMA são as observações que se encaixam nos modelos replicados no estudo: estacionariedade e não estacionariedade, os quais são aplicados tanto no teste de Mann-Kedall, utilizado para verificar as tendências de séries temporais sob as hipóteses de séries independentes, distribuída na série que possui alguma tendência monotônica ao longo do tempo, quanto no teste de Dickey-Fuller, usado em série autorregressiva que não rejeita a hipótese nula de não-estacionariedade, ou seja, não estacionária.

A aplicação do teste Mann-Kedall (MK) no presente estudo se deve à constatação de Sneyers (1975) sobre as tendências das variáveis das séries temporais mensais, com prevalência de ARIMA, cuja variável é dependente para as condições das sazonalidades, hídricas, climáticas e meteorológicas, prevalecendo as amostras e os dados estudados (superiores a 5% de probabilidade) na barragem de Epitácio Pessoa, com medições dos volumes em percentual e precipitação em mm, no corte temporal de 30 e de 11 anos, respectivamente. Assim, o método configurou-se como o mais adequado, pois permite análises de previsões climáticas mais precisas, possibilitando a detecção e localização de tendências, considerando as hipóteses das séries históricas.

De acordo com Teixeira (2025), o teste estatístico de estacionariedade de Dickey-Fuller é o mais adequado à pesquisa, pois, a partir dele testa-se a hipótese nula da raiz unitária de série: quando a não rejeitada será uma raiz de série unitária, geralmente não será estacionária; no entanto, para evitar um auto correlação dos resíduos, é utilizado o teste ADF (Dickey-Fuller Aumentado), que se resume à equação das defasagens para eliminar os problemas de auto correlação dos resíduos.

Enquanto isso, segundo Arêdes; Pereira (2008) apud Santos (2015), o teste mais propício para o uso é o de análises da estacionariedade em séries temporais, considerando que os resultados dos coeficientes de auto correlação integral e parcial são construídos em seus respectivos correlogramas: FAC (Função de Auto correlação) e FACP (Função de Auto correlação Parcial), resultando nas inspeções gráficas das defasagens.

Existem várias classes de modelos de auto correlação sugeridos e propostos por Box e Jenkins (1970) os quais propõem as teorias das formulações dos componentes de auto regressão das médias móveis de modelagem de séries temporais, que fazem uso de duas ideias básicas metodológicas na construção dos modelos: a parcimônia, que utiliza o menor número possível de parâmetros para a obtenção de um representação do fenômeno climático, e a interatividade, que confronta a teoria e a prática para a obtenção de um resultado satisfatório. Nesse contexto, o material empírico é analisado, com respaldo teórico, e o resultado dos estágios e dos fenômenos climáticos, durante o intervalo dessa série temporal, é

determinado e confrontado diante de sucessivas práticas até que se chegue a um modelo ideal, cuja representação se explica por meio da equação estatística:

$$y_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + \dots + a_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q}$$

Na equação, o termo a_0 é representado por uma constante no modelo estimado (a_1 até a_p), que são os parâmetros definidores dos valores passados Y_t do instante imediato que anterior até o mais distante, definido por p e ε_t , e a porção que se controla no modelo (chamado de ruído branco), quando a série não apresenta uma estacionariedade; a seguir, os parâmetros β_1 e β_q resultam numa série da função dos choques do passado e, em resumo, cada ε_t é classificado como uma distribuição normal, média, zero, variância constante e não correlação (SANTOS, 2015).

Diante disso, identificamos que o modelo de aplicação ideal para ser trabalhado neste estudo é o que considera os ajustes variáveis para a série das sazonalidades e variáveis climáticas aplicada no manancial Epitácio Pessoa, utilizando a base de Informação Akaike - AIC (critério de informação de Akaike), que usa o critério de informação Bayesiano (BIC) e o Erro Quadrático Médio e previsão (EQM), definidos por Priestley (1989), sendo estes os mais precisos, isto é, com uma quantidade mínima de erros, tornando mais ágil e viável este trabalho e tornando mais precisos os parâmetros e, consequentemente, os resultados.

Diante do cenário analisado, percebemos que quanto maior o índice de vulnerabilidade da população, maiores serão os impactos dos desastres naturais, no entanto a incidência desses fenômenos está relacionada a uma série de fatores, entre os quais se encontram a irregularidade nos índices pluviométricos, de cada região (FARIAS, 2020).

3. Resultados e discussão

Considerando o intervalo histórico de 30 anos analisado (janeiro de 1993 a setembro de 2023), foi constatado que os períodos mais críticos de crise hídrica do estado, ocasionados pelas interferências climáticas do fenômeno El Niño no manancial Epitácio Pessoa, foram, sobretudo, entre os anos de 1997 e 2000 e de 2012 e 2018. Nesse cenário, fatores antrópicos e naturais, somados a uma crescente piora nos índices de volumes precipitação, resultaram em variações climáticas em escala regional, acarretando em dificuldades quanto ao suprimento hídrico para a população e para os serviços industriais e de irrigação, aspectos agravados pelo desperdício, pela contaminação e pela alta evapotranspiração, implicando num colapso hídrico nos mananciais das bacias hidrográficas do Rio Paraíba e no racionamento na região metropolitana de Campina Grande.

Outros fatores evidenciados nos resultados foram a atuação conjunta dos agentes públicos do Governo Federal e Estadual, especialmente a Agência Nacional de Águas (ANA), o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), os quais atuaram ativamente nas tomadas de decisões frente à problemática, como a chegada das águas do Projeto de Transposição do Rio São Francisco (PISF) na Bacia do Rio Paraíba, em 2017, que elevou, significativamente, os níveis do volume da barragem Epitácio Pessoa, a alocação negociada de água e o gerenciamento do uso do reservatório.

A seguir, observamos na Figura 2 a série temporal do volume hídrico, em percentual, da barragem Epitácio Pessoa, entre o período compreendido entre janeiro de 1993 e setembro de 2023:

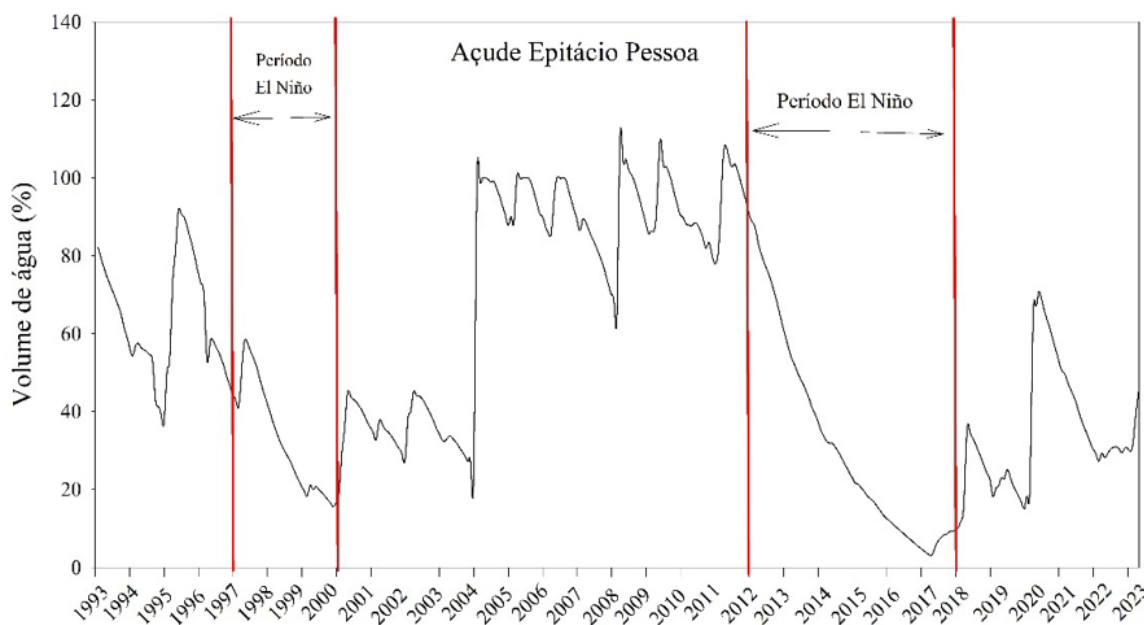


Figura 2: Gráfico de série temporal do volume da barragem Epitácio Pessoa.

Fonte: AESA (2025).

Com base no gráfico acima, pode-se observar que em dois períodos distintos a ação de fenômenos climáticos sobre os ciclos hidrológicos da barragem Epitácio Pessoa influenciou diretamente nas quedas consideráveis dos volumes da barragem entre (1997-2000) e (2012-2018), quando o manancial chegou ao patamar de 14% da sua capacidade em dezembro de 1999 e 3,18% em abril de 2017, considerado o período mais crítico da série histórica do manancial, quando foi registrado o nível mais baixo da história da barragem quando registrou a marca de 3,18% o que gerou no colapso hídrico regional, entretanto após o fato registrado houve um aumento exponencial do volume d'água devido a chegada sobretudo das águas do (PISF) projeto da transposição do rio São Francisco, quando o manancial passou a ter uma atenção redobrada acerca do planejamento hídrico a longo prazo sobre os recursos hídricos por parte do poder público federal e estadual.

No intervalo entre 2004 e 2005, houve um aumento considerável no volume do manancial, fazendo com que a barragem fosse de 20%, em 2004, a 100% imediatamente no ano seguinte; outro período em evidência foi entre os anos de 2008 e 2009, quando as médias anuais dos níveis ultrapassaram a marca dos 100%, proveniente de uma época marcada por fortes chuvas, que teve início em 2004, devido ao fenômeno La Niña, perdurando até 2011 e reincidindo somente a partir de 2020, quando chegou ao patamar de mais de 60% da sua capacidade. A influência dos fenômenos climáticos sobre o reservatório corrobora com o estudo realizado por Gomes e Lima (2021) que constatou a influência da variabilidade climática e das precipitações nos volumes de água dos reservatórios no Nordeste do Brasil no período de 1986 a 2018.

É importante destacar que, resultando no aumento da média do volume estimado do manancial, como afirma Morais e Barbosa (2022), a constância de tendência do volume hídrico depende de uma série temporal a longo prazo para servir de base para parâmetros estatísticos sobre as tendências, sazonalidades, estacionaridades, previsibilidade que resultaram em dados aplicados a cenários climáticos na barragem Epitácio Pessoa.

Na sequência, a Figura 3 apresenta o gráfico de sazonalidade mensal e anual do volume da barragem Epitácio Pessoa, no período entre janeiro de 2012 e dezembro de 2023, de acordo com os dados de medição da AESA:

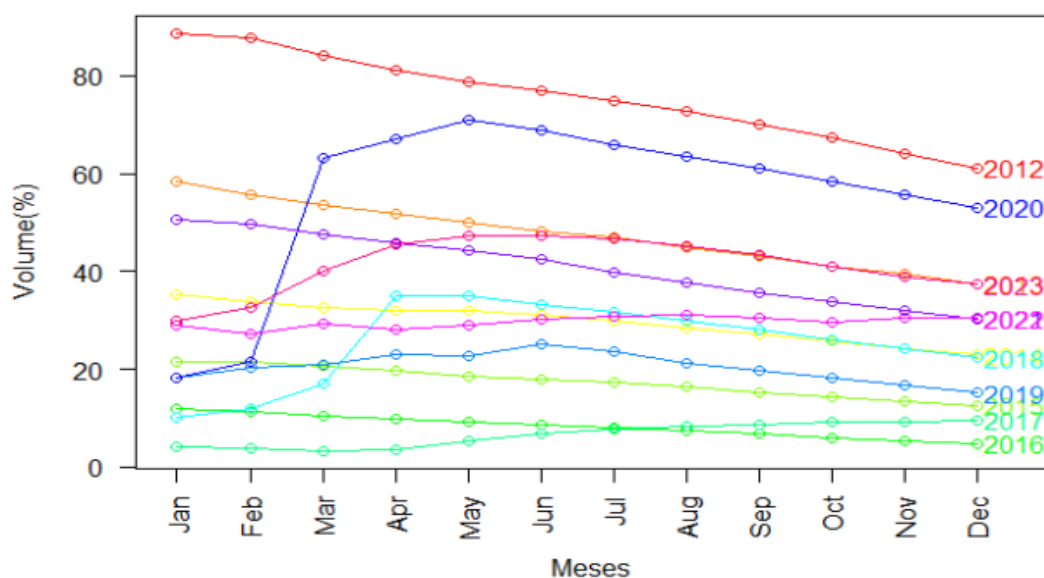


Figura 3. Sazonalidade mensal do volume hídrico, em (%), da barragem Epitácio Pessoa entre 2012 e 2023.
Fonte: AESA (2025).

Na imagem, percebemos que, no intervalo de onze anos (janeiro de 2012 a dezembro de 2023), a barragem Epitácio Pessoa teve uma redução de volume hídrico, o que se deve à sazonalidade; no início, o açude possuía 86% da sua capacidade, que em dezembro de 2014 foi reduzida para 65%, chegando, posteriormente, a atingir a marca de 30%, originando a política de racionamento de água na região metropolitana de Campina Grande e nos 19 municípios abastecidos pela barragem em questão, situação que perdurou até 2018. Nesse cenário, é relevante salientar que o biênio 2016/2017 foi considerado o mais crítico da série sazonal, quando a média do volume hídrico ficou abaixo dos 10%, provocado por fatores climáticos do El Niño.

Em meio às inconstâncias climáticas, em abril de 2017 a barragem Epitácio Pessoa passa por um processo de recuperação a partir da chegada no eixo leste das águas da Transposição do Rio São Francisco, no trecho do Rio Paraíba, elevando o nível hídrico do manancial de 2,3%, em abril, para 10% em dezembro do mesmo ano; em janeiro de 2020, o aumento foi ainda maior, saindo de 18% para 62%, em apenas cinco meses.

Ao final do ano de 2020 o açude decaiu para uma média estacionária entre 40% e 45% (no triênio de 2021 a 2023), em decorrência tanto das águas da Transposição, como também das regularidades sazonais de chuvas nas cabeceiras do Rio Paraíba, promovidas pelos efeitos do La Niña, melhorando o volume do manancial em mais de 40%, num intervalo de 4 anos. Na Figura 4, podemos visualizar o gráfico do perfil de série anual, estacionária e não estacionária, do volume da barragem de Epitácio Pessoa, de acordo com a medição da AESA, de janeiro de 2012 a dezembro de 2023:

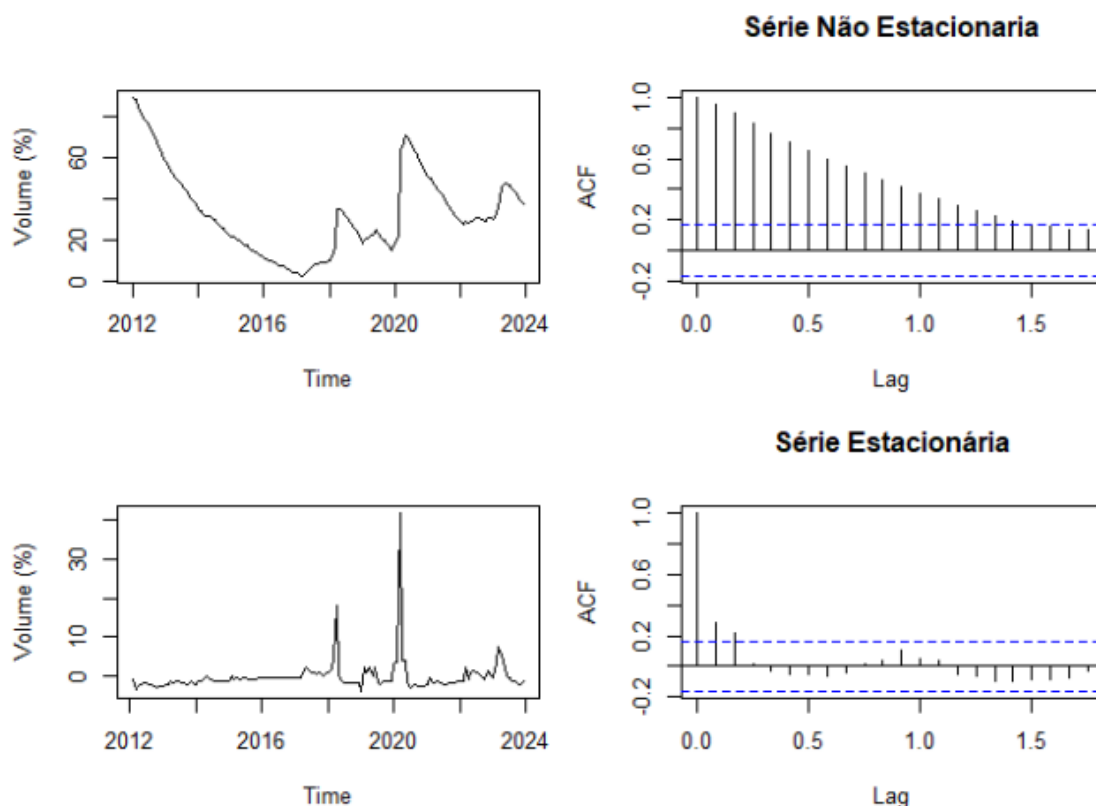


Figura 4. Perfil de séries estacionária e não estacionária do volume hídrico, em (%), da barragem Epitácio Pessoa entre 2012 e 2023. Fonte: AESA (2025).

Através do perfil de séries estacionária e não estacionária do volume hídrico foi possível identificar a queda brusca nos níveis da barragem, entre 2012 e 2017, quando o nível reduz, drasticamente, de 86% do volume para 2,13%, em abril de 2017, tornando necessária a utilização da reserva técnica do açude, assim presenciou-se o período considerado mais crítico da série histórica, desde a sua inauguração (em 1957), provocado pela estiagem prolongada proveniente do fenômeno El Niño, o que evidenciou um cenário hidro climático de evento extremo de sazonalidade do clima, corroborando com o estudo de Almino e Rufino (2021).

Contudo, um dos fatores observados nos perfis de séries estacionárias e não estacionárias da barragem Epitácio Pessoa foi a crescente recuperação dos níveis de cotas do volume no manancial, no primeiro semestre de 2018, ele estava próximo aos 10% e, no segundo semestre de 2019, atinge 25% da sua capacidade, o que é considerado uma rápida recuperação de 15% do seu volume, num intervalo de menos de dois anos, fato que se deve à chegada das águas do Projeto de Transposição do Rio São Francisco ao manancial, marcado por um histórico de perdas hídrica significativas, devido aos efeitos das fortes estiagens, provocadas pelo fenômeno El Niño e pelas altas taxas de evapotranspiração na região do alto e médios cursos do Rio Paraíba, desde de 2012.

A chegada das águas do eixo leste da transposição do Rio São Francisco, em abril de 2017, associada às chuvas intensas nas cabeceiras do alto curso do Rio Paraíba, logo quando as cotas do volume da barragem chegaram ao patamar crítico de 2,13%, trouxe ao manancial um aumento significativo de cerca de 58%, no intervalo de 4 anos, deixando-o com 60% da sua capacidade atingida.

Em se tratando de análises técnicas dos gráficos acerca dos perfis de série da barragem Epitácio Pessoa, devemos observar que a estacionariedade e não estacionariedade estão interligadas aos modelos matemáticos que definem o Teste de Mann-Kendall, no intuito de identificar a tendência na série temporal sob uma hipótese, contudo, é essencial compreender que a amostra da série é independente e, igualmente distribuída, conforme as “observações da série que têm tendência monotônica estacionária com o passar do tempo. Assim, a função do teste de Dickey Fuller é determinada quando não se recusa a hipótese nula de não-estacionariedade, ou seja, a série não é estacionária.

Assim, trazemos, na Figura 5, o gráfico residual de Arima da série anual, estacionária e não estacionária, de acordo com modelo de auto correlação do volume da barragem Epitácio Pessoa, de acordo com dados de medição da AESA, no período correspondente entre janeiro de 2012 e dezembro de 2023:

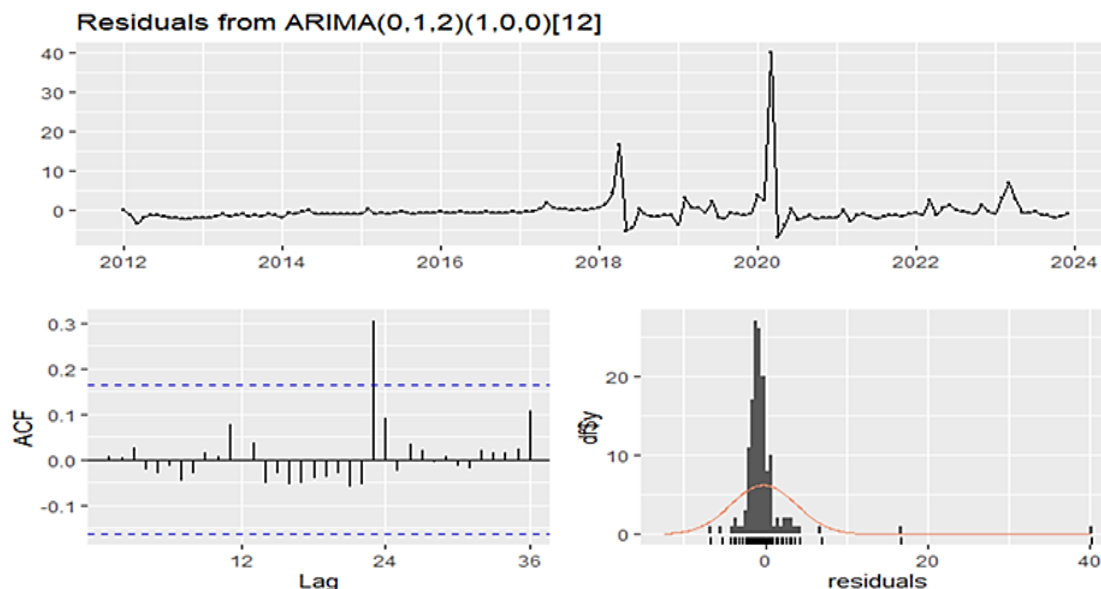


Figura 5. Gráfico de do modelo residual de Arima para valores $p.d.q (0,1,2) (1,0,0)$, da barragem Epitácio Pessoa, no período da série temporal entre 2012 e 2023. Fonte: AESA (2025).

Na ilustração, notamos aspectos do modelo residual de Arima da barragem em questão, com determinações da função de auto correlação de modelagem de Arima, definida pelos valores de $p.d.q (0,1,2) (1,0,0)$, que facilitam as inter-relações dos valores definidos pela série temporal de onze anos, demonstrando o comportamento durante o período de forte variância climática e meteorológica, decorrentes do fenômeno El Niño, entre 2012 e 2018.

Assim, considerando a estacionariedade entre 2012 e 2017, na série temporal definida pelo modelo estático de Mann Kendell, analisamos as séries mensais e anuais, cuja variável do volume de água, nos seis primeiros anos, ficou estacionária, sequencialmente; entretanto, o gráfico mostra que os valores de residual ACF (Função de auto correlação) representam as inspeções gráficas de defasagens dos valores dos volumes mais altos, em lag 24, reforçando uma ampliação exponencial nos volumes hídricos depois do ano de 2020; contudo, outro fator relevante para essa margem foi, também, a chegada das águas da transposição do eixo leste do Rio São Francisco na barragem Epitácio Pessoa (Boqueirão), em abril de 2017.

No Gráfico 6 verificamos a previsão do volume da Barragem Epitácio Pessoa, estimado por meio do modelo de Arima, da série anual anterior e futura, conforme dados de medição da AESA, destacando o período correspondente à média anual prevista para o ano de 2025:

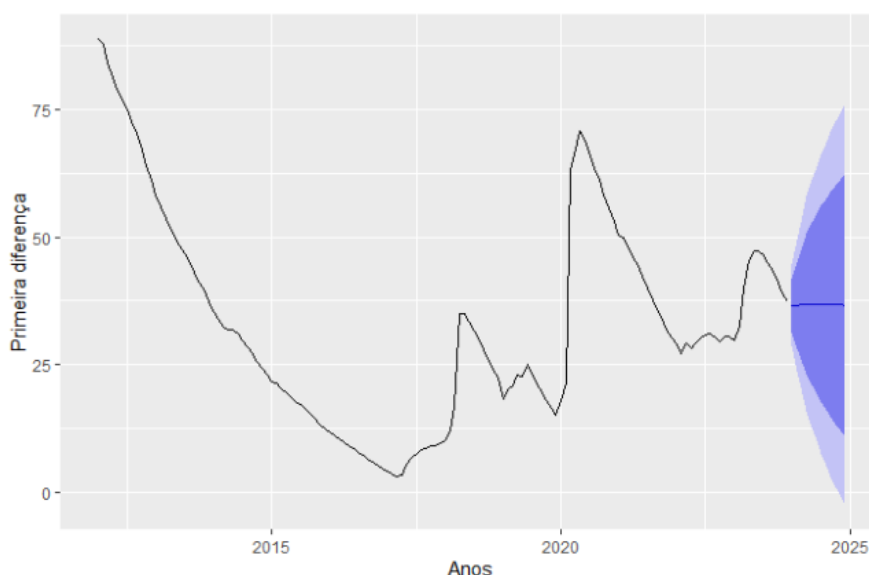


Figura 6: gráfico de variação temporal de previsão para o volume, em (%), da barragem de Epitácio Pessoa para o período de 2025. Fonte: AESA (2025).

Na estimativa apresentada na Figura 6, verificamos que há uma tendência de declínio no volume hídrico para 2025, porém, haverá uma estacionária na média dos níveis de volume da barragem Epitácio Pessoa, o que prevê uma tendência monoica de estacionariedade do volume de água para o ano subsequente, como podemos analisar na primeira diferença presente no gráfico. Tal estacionariedade homogênea em 40% no volume do manancial é explicada pelo método de Sarima, que mede a prevalência dos volumes da série temporal, através dos testes de Dicke-Fuller, o qual estipula o nível de significância em 5%, admitindo uma Arima estacionária.

Essa tendência de previsão de estacionariedade ocorre de acordo com o teste de Dicker Fuller, o qual define o modelo matemático de Arima como a média de previsão futura dos níveis hídricos para o ano de 2025, alcançados por intermédio de variáveis climáticas e meteorológicas e definidas pelo teste de estacionariedade de Dicker Fuller (raiz unitária) que, dada como hipótese de nulidade, foi rejeitada, resultando numa prevalência do IRA com valor estacionário.

A seguir, a Figura 7 representa o gráfico de tendência do volume anual da barragem Epitácio Pessoa, por meio do modelo de Arima, segundo dados de medição da AESA, direcionados ao decênio 2012/2023:

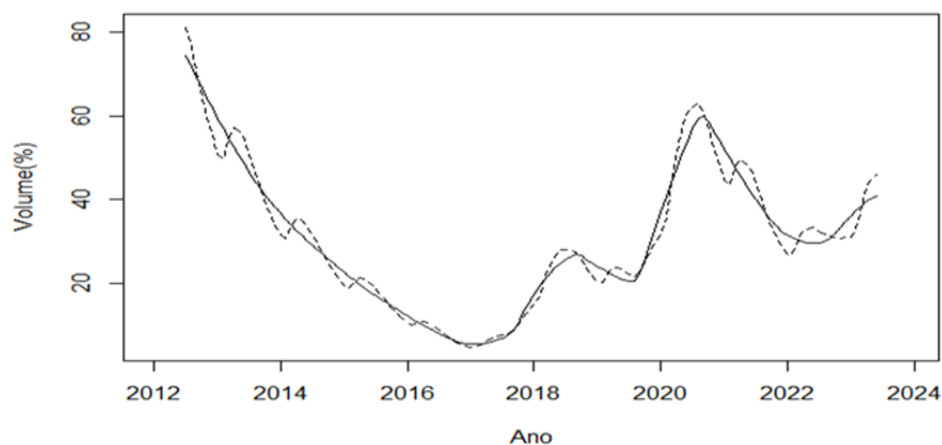


Figura 7. Gráfico de tendência de volume (%) anual da barragem Epitácio Pessoa, no período correspondente entre 2012 e 2023. Fonte: AESA (2025).

Na imagem acima, observamos um declínio rápido no volume hídrico da barragem entre 2012 e 2017, representando uma queda de 80% para 2,3%, o que significa uma perda de 77,7 pontos percentuais do seu volume de água, num intervalo de cinco anos; após este episódio, apenas com a chegada das águas do eixo leste da transposição do Rio São Francisco, houve uma recuperação expressiva do seu volume, de 15% para 60%, tendência crescente de 45% no intervalo de três anos.

Nesse sentido, o presente estudo reafirmou, por meio de modelagens de testes de comparação de média simples e análises estatísticas das séries temporais, que, na delimitação temporal estudada, a barragem Epitácio Pessoa apresentou alterações dos ciclos hídrico-climáticos intensos, decorrente tanto da interferência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña, cujas consequências refletiram na drástica diminuição de precipitação e volume d'água do manancial, como também da localização do manancial, inserido na região semiárida onde os altos índices de evapotranspiração influenciam na perda hídrica.

Além disso, o estudo comprova a relevância na promoção de ações de previsibilidade, tendência, sazonalidade e, ainda, as políticas públicas de gerenciamento dos recursos hídricos, com o objetivo de administrar os riscos, adaptando-se às variações climáticas, o que demanda sistemas de alocação mais eficientes e flexíveis, além de ampliação do investimento em infraestrutura e políticas ambientais, possibilitando tanto o acesso aos recursos hídricos quanto a redução dos danos decorrentes dessas mudanças climatológicas. Tais medidas podem ocorrer por intermédios comprovadas por testes de comparação de medidas simples que através de modelagem e análises estatísticas, de tendência (Mann-kendall) e estacionariedade (Dicker-Fuller), que confirmaram através dos dados de series temporais destacados que a influência dos ciclos climáticos interferiram diretamente sobre os ciclos hidrológicos, tendo em vista que os aumentos de eventos extremos naturais promoveram mudanças nos padrões de precipitação e volume, principalmente em longos períodos de estiagens como no caso da barragem Epitácio Pessoa.

4. Considerações finais

O estudo revelou que há uma constante tendência na previsão nos níveis do volume do Açude Público Epitácio Pessoa para o ano de 2025, uma probabilidade aproximada de 40% na cota de elevação, o que consideramos uma projeção significativa, já que no ano de 2024 o aumento foi de apenas 5%. Essa média do volume de água do açude nos últimos 11 anos, segundo o Modelo de auto regressivo de Arima, corrobora para a previsão para o ano de 2025, com valores próximos de variação, avaliada pelo teste paramétrico de Mann Kendall (tendência), e chegando ao nível de significância de 5% ($p\text{-valor} < 0,05$).

Mediante a aplicação dos modelos estatísticos de Sarima e Arima, respaldado em análises descritivas de testes de tendenciabilidade (Mann Kendall) e de estacionariedade (Dicker – Fuller), as projeções de volume hídrico para o ano 2025 mostraram-se eficientes para o acompanhamento das séries temporais sobre os sistemas hídricos e, através disso, será possível desempenhar, junto à gestão pública, as medidas exequíveis a respeito da problemática da mudança no clima e suas implicações sobre a barragem Epitácio Pessoa, sobretudo em tempos de eventuais extremos climáticos, permitindo condições para a distribuição hídrica, diante das ações de planejamento governamental.

Desse modo, os estudos desenvolvidos com as aplicações dos modelos estatísticos de volume e pluviometria da barragem Epitácio Pessoa demonstraram que as alternâncias climáticas interferem, diretamente, nas alterações dos regimes de chuvas, assim como nos volumes hídricos nos mananciais, sendo assim, é possível determinar que índices de séries temporais aferidos reafirmam esses efeitos no cenário socioambiental dos recursos hídricos da barragem Epitácio Pessoa, durante a série temporal estimada.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional, pela oportunidade de desenvolver este estudo, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa, essencial para a execução desta pesquisa, e pelo compartilhamento de suas publicações científicas.

Referências

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. *Volume dos Açudes*. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/ultimos-volumes/> >. Acesso em: 22 junho de 2025.

-
- ALMINO, L. M. O.; RUFINO, I. A. A. Modelagem dinâmica e cenários urbanos de demanda de água: simulações em Campina Grande (PB). *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, p. 915-925, 2021.
- ARÊDES, A. F; PEREIRA, M. W. G. Potencialidade da utilização de modelos de séries temporais na previsão do preço do trigo no Estado do Paraná. *Revista de Economia agrícola*, V.55, n.1, p.63-76, 2008.
- BARBOSA, E. M. Produção de pesquisa acadêmica internacional sobre gestão de recursos hídricos. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11 n. 4, 2020.
- BOX, G. E. P; JENKINS, G. M; REINSEL, G. C. *Time Series Analysis Forecasting and Control* - Fourth Edition. Hoboken - NJ: John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- BOX, G. E. P; JENKINS, G. M. *Time Series Analysis: forecasting and control*. San Francisco: Holden Day, 1970.
- CUNHA, D. G. F; CALIJURI, M. C. Análise probabilística de ocorrência de incompatibilidade da qualidade da água com o enquadramento legal de sistemas aquáticos - estudo de caso do Rio Pariquera - Açu (SP). *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 4, p. 337-346, 2010.
- DIGGLE, P.J. *Time e serie*, a biostatistical introduction. Oxford: Oxford University Press; 1992.
- FARIAS, T. S. Áreas de propensão a seca no Estado da Paraíba: uma análise espacial dos decretos de emergência e a atuação da operação pipa. *Revista de Geociências do Nordeste*, v.6, n.1, p.71-79, 2020.
- GOMES, R. S.; LIMA, K. C. Influence of the modes of climate variability in the Tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water volumes in the Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 11, p. 5331-5349, 2021.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisas. 4. Ed. São Paulo. Atlas S/A, 2002. 176p.
- IBGE. Instituto Brasileiro e Geografia e Estatística. *Séries histórica demográficos gráficos da Paraíba*. Série temporal, 2022.
- IPCC.Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: *Mudanças Climáticas 2023: Relatório de Síntese*. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Equipe de Redação Principal, H. Lee e J. Romero (orgs.)]. IPCC, Genebra, Suíça, pp. 35-115, 2023.
- JACOBI, P. R; NASCIMENTO, S. S. Governança ambiental urbana em face das mudanças climáticas. *Revista USP*, v. 109, p. 133-142, 2016.
- JIMÉNEZ CISNEROS, B. E; OKI, T; ARNELL, N. W; BENITO, G; COGLEY, J. G; DOLL, P; MWAKALILA, S. S. *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 229-269.
- MORAIS, A. C. S.; BARBOSA, N. F. M. Modeling of volumetric data from the Epitácio Pessoa reservoir (Boqueirão). *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e409111133772, 2022.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Previsão de Séries Temporais*. 2.ed. São Paulo: Atual Editora, 2006.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Previsão de Séries Temporais*. 2.ed. São Paulo: Atual Editora, 1985.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Previsão de Séries Temporais*. 2.ed. São Paulo: Editora Edgar blucher, 2004.
- PEREIRA, G. R., SILVA JÚNIOR, M. M; BARBOSA, A. H. S. Mapeamento dos espelhos d'água de reservatórios da Paraíba: Estudo de caso da Transposição do Rio São Francisco. *In Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2019.

PRIESTLEY, M. B. *Spectral analysis and time series*. New York, Academic Press, 1989.

SANTOS, D. A. S. *Influência das variáveis climáticas na prevalência de infecção respiratória aguda em crianças menores de dois anos no município de Rondonópolis - MT*, 2015. 135f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2015.

SNEYERS, R. *Sur l'analyse statistique des séries d'observations*. Genève: Organisation Meteorologique Mondial,

TEIXEIRA, E. K. C. Propriedades estatísticas das séries históricas de cota e vazão da bacia do rio Doce: Statistical properties of historical water level and flow rate series of the doce river basin. *Revista de Geociências do Nordeste*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 254–263, 2025.

YIN, R. K. *Estudo de Caso: planejamento e métodos*. 2 ed. Porto Alegre: Bokman, 2001.