

Trend analysis of water quality changes in the Beberibe River sub-basin, PE

Jocimar Coutinho Rodrigues Junior*, Ester Milena dos Santos**, Leijdane Maria Maciel de Oliveira***, Sylvana Melo dos Santos****, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva*****

* Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil, jocimar.junior@ufpe.br;

** Doutoranda do PPGEC/UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, ester.santos@ufpe.br;

*** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECIV), Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, leidjane.oliveira@ufpe.br;

**** DECIV, Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, sylvana.santos@ufpe.br;

***** DECIV, Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, anderson.paiva@ufpe.br

Received 10 November; accepted 19 December.

Abstract

The present study investigated the water quality along the Beberibe River in the North Metropolitan Pernambuco basin. With a length of 23.27 kilometers and a drainage area of 79 square kilometers, the river flows through the municipalities of Camaragibe, Recife, Paulista, and Olinda, serving a population of 2,288,834 inhabitants. The parameters Dissolved Oxygen (DO), Total Phosphorus (P), Ammonia (NH₃), and Biochemical Oxygen Demand (BOD) were analyzed over the course of one year, aiming to understand the trends and impacts of human activities on the river's waters. The results indicate spatial and temporal variation in water quality, with different behaviors of the parameters along the river. There was an observed trend of increasing DO at all monitored points, while for BOD, NH₃, and P, some stations showed an increasing trend, while others did not exhibit clear trends. Land use and land cover analysis indicated a reduction in agricultural areas and an increase in urban areas over the years. Points at the headwaters of the Beberibe River showed less alteration in water quality, while points closer to the mouth were more impacted, possibly due to higher population density and inadequate sanitation infrastructure in the area. The results highlight the importance of effective actions for the preservation and improvement of water quality in this scenario of increasing urbanization and human pressures. The conclusions of this study can guide management strategies and decision-making processes focused on the sustainability of water resources in the region.

Keywords: Water Quality Monitoring, Environmental Impacts, Land Use and Land Cover.

Análise de tendência de mudanças na qualidade da água da sub-bacia do Rio Beberibe-PE

Resumo

O presente estudo investigou a qualidade da água ao longo do Rio Beberibe, na bacia pernambucana Metropolitana Norte. Com extensão de 23,27 km e área de drenagem de 79 km², o rio atravessa os municípios de Camaragibe, Recife, Paulista e Olinda, atendendo a uma população de 2.288.834 habitantes. Foram analisados os parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD), Fósforo Total (P), Amônia (NH₃) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ao longo de 1 ano, visando compreender as tendências e os impactos das atividades humanas nas águas fluviais. Os resultados indicaram que há variação espacial e temporal na qualidade da água, com diferentes comportamentos dos parâmetros ao longo do rio. Observou-se tendência de aumento de OD em todos os pontos monitorados, enquanto para DBO, NH₃ e P, em algumas estações apresentaram tendência de aumento e, outras não evidenciaram tendências claras. A análise de uso e ocupação do solo indicou que houve redução nas áreas agrícolas e aumento das áreas urbanas ao longo dos anos. Os pontos na cabeceira do Rio Beberibe mostraram menor alteração na qualidade da água, enquanto os pontos mais próximos à foz foram mais impactados, possivelmente devido à maior densidade populacional e à inadequada infraestrutura de saneamento no local. Os resultados destacam a importância de ações efetivas para a preservação e a melhoria da qualidade da água nesse cenário de crescente urbanização e pressões humanas. As conclusões deste estudo podem orientar estratégias de gestão e de tomada de decisões voltadas para a sustentabilidade dos recursos hídricos na região. Palavras-chave: Monitoramento da Qualidade da Água, Impactos Ambientais, Uso e Ocupação do Solo.

1. Introdução

Historicamente, a ocupação do homem nas bacias hidrográficas deu-se com pouco planejamento,

de forma a minimizar custos e maximizar os benefícios. O crescimento populacional e a exploração desenfreada de recursos naturais, como a água, vêm afetando os fenômenos naturais em termos

quantitativos e qualitativos (Tucci, 2012). Os recursos hídricos são elementos essenciais para a manutenção da vida e o desenvolvimento sustentável das sociedades. No entanto, a crescente pressão antrópica sobre esses recursos tem levantado preocupações globais quanto à qualidade das águas dos rios em bacias hidrográficas. Nesse contexto, a análise detalhada da qualidade da água em cursos fluviais torna-se fundamental para compreender as interações entre fatores naturais e atividades humanas, para assim desenvolver e avaliar estratégias eficazes de gestão e conservação.

Conforme relatório da Organização das Nações Unidas (UN, 2018), ao longo dos anos, tem sido observada uma redução na qualidade da água, com aumento evidente na poluição causada por agentes patogênicos, materiais orgânicos, nutrientes e salinidade. Fatores como o crescimento populacional descontrolado, a urbanização acelerada e a industrialização desregulada, bem como a utilização excessiva de produtos químicos na agricultura, tais como fertilizantes e pesticidas, a descarga de águas residuais domésticas, o descarte de resíduos sólidos e a extração de cascalho e areia dos leitos dos cursos d'água, contribuem para o agravamento desse cenário de poluição (Ustaoglu et al., 2020). Ademais, como as águas superficiais são impactadas por vários estressores antropogênicos que ameaçam o funcionamento, a integridade e os serviços dos ecossistemas, a degradação na qualidade dessas águas suscitou um interesse crescente, em vários países, de compreender melhor como o uso da terra em uma paisagem afeta a qualidade da água a jusante (Giri et al., 2018; Mack et al., 2019).

Diante dos conflitos crescentes entre os diversos usos da água, devido aos interesses distintos e demandando características hídricas específicas, a gestão dos recursos hídricos assume grande importância, exigindo a adoção de práticas responsáveis e modelos de intervenções institucionais. Esse esforço é direcionado à abordagem integrada, participativa e descentralizada, com o objetivo de estabelecer uma estratégia de manejo dos recursos hídricos que seja intrinsecamente sustentável. No entanto, a concretização desse paradigma de gestão enfrenta desafios significativos. O crescimento demográfico e econômico tem acarretado um aumento no consumo de água, resultando em redução da disponibilidade desse recurso. Essa tendência é agravada pelo cenário de mudanças climáticas atuais com perspectivas desfavoráveis. Além disso, os processos contínuos de industrialização e urbanização têm contribuído para a poluição persistente,

comprometendo ainda mais a qualidade da água (Zhao et al., 2016).

De modo a auxiliar na tomada de decisão no âmbito da gestão, faz-se pertinente a incorporação de uma visão holística, dentre as alternativas contemporâneas, aos recursos hídricos, considerando que o uso de diferentes técnicas estatísticas, probabilísticas e de otimização podem auxiliar a prever o padrão/resultado de variáveis através do entendimento da experiência (Giri, 2021). Mesmo havendo a necessidade em se avaliar vieses e incertezas, essas técnicas possibilitam o uso de conjuntos de diferentes bancos de dados já disponibilizados, possibilitando repetibilidade, reduzindo recursos financeiros e permitindo análise de tempos e áreas maiores (Vigiak et al., 2021). Nesse contexto, a abordagem em séries temporais torna-se cada vez mais interessante para identificar a natureza de mudanças abruptas nas variáveis hidrológicas visando quantificar a natureza das tendências hidroclimáticas e da qualidade d'água, por exemplo, analisando efeitos de sazonalidades em precipitações e fluxos de água, bem como no efeito a longo prazo de estações de tratamento de esgoto (Alilou et al., 2022). Dentre as técnicas possíveis, destaca-se os testes de hipóteses que integram a inferência estatística em que se toma decisões que concerne “a testar uma hipótese de forma a encontrar evidências nos dados amostrais que justifiquem a rejeição ou a não rejeição de uma determinada afirmação sobre um parâmetro populacional ou sobre a forma de um modelo distributivo, tendo-se em conta as probabilidades de serem tomadas decisões incorretas.” (Naghetini e Pinto, 2007, p. 246).

De forma geral, a análise de tendências em séries temporais de dados de qualidade da água desempenha um importante papel e o teste estatístico de Mann-Kendall surge como uma ferramenta valiosa para essa finalidade. O teste de Mann-Kendall é uma técnica não paramétrica amplamente utilizada para detectar tendências em séries temporais, independentemente da distribuição subjacente dos dados com a capacidade de lidar com ruídos e flutuações presentes em dados ambientais (Hashim et al., 2021). De acordo com Chowdari et al. (2023), dentre as vantagens do teste pode-se citar não requerer distribuição específica dos dados, ser robusto contra *outliers*, a simplicidade, a detecção de tendências não lineares. Os autores também destacaram as desvantagens do teste, que envolvem a sensibilidade ao tamanho da amostra, a dependência das condições iniciais, não oferece a magnitude das tendências, e nem a sazonalidade (Chowdari et al., 2023).

A monitorização contínua dos corpos d'água é essencial para identificar tendências e mudanças ao longo do tempo, permitindo uma resposta adequada e a implementação de medidas de gestão sustentável. A

rede de monitoramento da qualidade da água no Brasil é uma ferramenta fundamental para avaliar o estado dos recursos hídricos e direcionar ações de gestão ambiental. No entanto, a eficiência e a abrangência dessa rede têm sido frequentemente questionadas devido à escassez de dados em muitas regiões do país. A rede de monitoramento é operada principalmente por órgãos ambientais estaduais e municipais, como as Secretarias Estaduais de Meio Ambiente e as Agências de Água das bacias hidrográficas. O monitoramento abrange uma variedade de parâmetros, incluindo aspectos físicos, químicos e biológicos da água. Isso proporciona uma visão abrangente da qualidade dos corpos d'água, permitindo identificar tendências e tomar medidas para mitigar problemas ambientais.

A escassez de recursos financeiros, a falta de pessoal capacitado, a ausência de equipamentos modernos e a infraestrutura inadequada são algumas das razões que contribuem para essa deficiência. Esses fatores tornam a existência de uma cobertura de monitoramento completa e homogênea uma tarefa complexa, o que compromete a capacidade de identificar problemas emergentes, responder rapidamente a eventos de contaminação e avaliar a eficácia das medidas de proteção ambiental. Para superar a escassez de dados na rede de monitoramento da qualidade da água, é necessário um compromisso contínuo de investimento financeiro, capacitação de recursos humanos, modernização de equipamentos e infraestrutura e a integração de tecnologias inovadoras, como a coleta de dados em tempo real e análises de *big data* (Trindade et al., 2017). A melhoria na rede e uso dessas técnicas na avaliação da qualidade da água é de extrema importância para a preservação dos ecossistemas aquáticos e a garantia da saúde pública em que a qualidade é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo atividades humanas, processos naturais e mudanças climáticas (Ye e Kameyama, 2020).

A aplicação do teste de Mann-Kendall em séries de dados de monitoramento da qualidade da água é fundamentada na necessidade de identificar mudanças graduais ao longo do tempo, que podem não ser perceptíveis à simples observação dos dados brutos. Essas mudanças podem indicar deterioração ou melhoria da qualidade da água, fornecendo conhecimentos valiosos para a tomada de decisões informadas. Além disso, a análise de tendências pode contribuir para a identificação de padrões sazonais e anômalos, auxiliando na compreensão das dinâmicas ambientais. Ao avaliar tendências em séries de qualidade da água é importante considerar a variabilidade natural presente nos sistemas aquáticos. Variações temporais podem ser causadas por fatores climáticos, eventos extremos e outras flutuações aleatórias que não refletem necessariamente mudanças significativas na qualidade da água. O teste de Mann-

Kendall leva em conta essa variabilidade, permitindo a detecção de tendências genuínas que se destacam da variabilidade natural.

Além disso, a aplicação do teste de intitulado Mann-Kendall pode ser usada para embasar a formulação e avaliação de políticas públicas relacionadas à gestão da água. Os resultados do teste resumem-se em identificar as mudanças, pontuando se são crescentes ou decrescentes. Tendências negativas, como aumento de poluentes ou declínio da qualidade, podem sinalizar a necessidade de intervenções regulatórias e medidas de mitigação, já tendências positivas podem indicar o sucesso de estratégias de preservação e fornecer incentivos para sua continuidade. Podendo ser relevante para, por exemplo, mostrar se as medidas implantadas em uma bacia hidrográfica ocasionaram efeitos a pequeno, médio ou longo prazo (Yu et al., 2023). Ainda são poucos os estudos que utilizam esse teste para avaliar o monitoramento da qualidade das águas de rios em bacias hidrográficas.

Os resultados de Trindade et al. (2017) para o rio das Velhas/MG para o período de 2002 a 2001 sugerem que a maioria dos cursos d'água da região apresentam valores estáveis das variáveis ao longo do período, com maiores alterações nas proximidades dos grandes centros urbanos dada a contribuição de esgotamento sanitário. Já os resultados de Hashim et al. (2021) para a bacia do rio Bernam, Malásia entre os períodos de 1998 a 2018 revelaram uma redução do índice de qualidade da água na maioria das estações e recomenda adoção de medidas de reduzir a poluição ao redor do rio. Yu et al. (2023) concluíram, da análise da série temporal de cargas de nitrogênio e fósforo, que medidas de controle específicas para a poluição de origem pontual podem levar a melhorias significativas na qualidade da água nas fases iniciais, mas é necessário abordar a poluição de fontes difusas ao nível da bacia hidrográfica para a sustentabilidade a longo prazo. Zhang et al. (2023), na proposta de índice para áreas úmidas com dados de 30 anos, notaram que ocorreu redução gradual do ambiente ecológico marinho.

Diante do exposto, o uso do teste de Mann-Kendall emerge como uma ferramenta interessante para a análise de tendências nos dados de monitoramento da qualidade da água no Rio Beberibe. O Rio Beberibe, localizado na Região Metropolitana do Recife (RMR), do estado de Pernambuco, Brasil, é um exemplo emblemático desse cenário desafiador. A crescente urbanização, a expansão agrícola e a falta de infraestrutura de saneamento básico têm colocado em risco a qualidade da água desse manancial hídrico superficial. Essa preocupação é reforçada pela presença de pontos de despejo de esgoto doméstico e industrial, bem como pela variabilidade sazonal e espacial dos parâmetros de qualidade da água. A

preservação da biodiversidade aquática, a manutenção da saúde pública e a garantia do abastecimento de água potável são questões urgentes que dependem de uma compreensão aprofundada dos padrões de variação da qualidade da água na referida bacia hidrográfica. Assim sendo, considerando a variação ambiental inerente a esse sistema fluvial, a aplicação desse teste estatístico, que é robusto e não paramétrico, pode revelar tendências significativas que transcenderiam flutuações naturais. As informações obtidas por meio dessa análise são importantes para informar políticas públicas embasadas em evidências, apoiando a gestão eficaz e sustentável dos recursos hídricos do Rio Beberibe e promovendo o bem-estar tanto dos ecossistemas aquáticos quanto das comunidades que dependem de suas águas.

Este estudo visa compreender as tendências de qualidade da água ao longo do Rio Beberibe, considerando suas diferentes seções e atividades humanas associadas a cada uma delas. A aplicação do teste de Mann-Kendall em séries temporais de dados de monitoramento da qualidade da água permitirá avaliar possíveis tendências ao longo do tempo,

oferecendo conhecimento para a gestão sustentável dos recursos hídricos nessa região. A análise das tendências poderá fornecer subsídios para a implementação de estratégias de preservação e mitigação, buscando garantir a qualidade da água do Rio Beberibe e, por extensão, a saúde dos ecossistemas e das populações que dependem desse recurso vital.

2. Material e métodos

A área deste estudo é a sub-bacia do Rio Beberibe, Figura 1, que se localiza na bacia pernambucana Metropolitana Norte (UP02). Seu rio principal possui extensão aproximada de 23,27 km e a bacia drena uma área de 79 km², o rio percorre os seguintes municípios: Camaragibe, onde se localiza a nascente, bem como Recife, Paulista e Olinda, de onde deságua no Oceano Atlântico. Essas áreas urbanas possuem população conjunta significativa de 2.288.834 habitantes, com densidade demográfica expressiva de 5.609,89 hab/km² (IBGE, 2022).

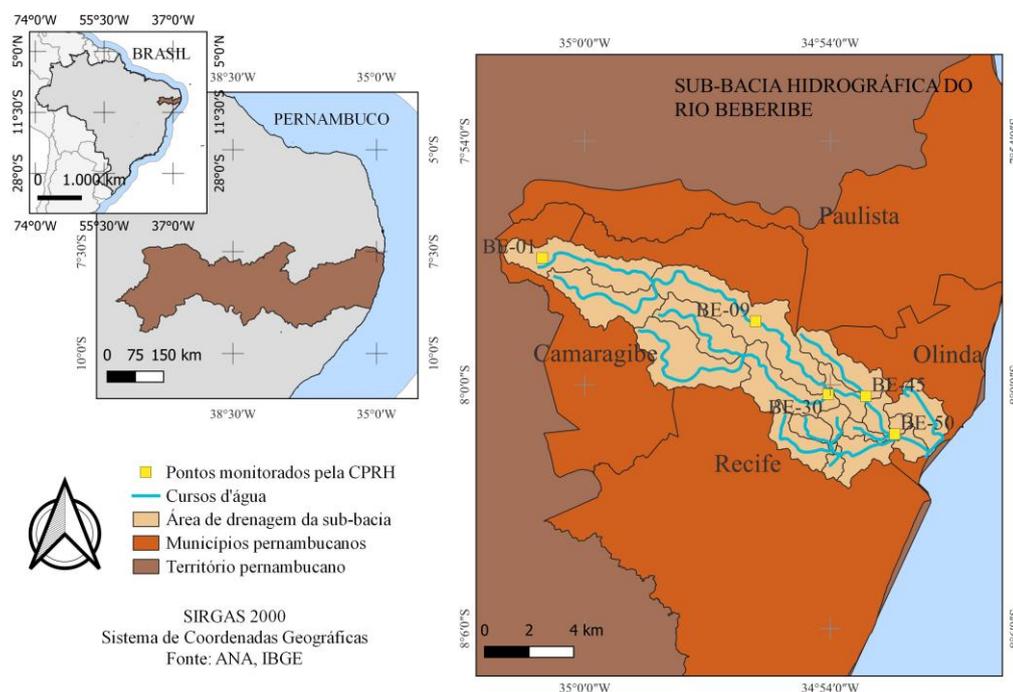


Figura 1 - Sub-bacia hidrográfica do Rio Beberibe.

Ao longo de seu percurso, o Rio Beberibe exibe diferentes características em suas seções. No trecho superior, desde a nascente até a BR101, é notável a presença de baixa densidade residencial e atividades rurais de intensidade moderada. A região se apresenta predominantemente rural, marcada por cultivos agrícolas e criação de animais. No trecho

subsequente, que vai da BR101 até a Estação de Bombeamento de Água da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), observa-se a transição para uma área com maior adensamento populacional. Nesse local, existem sítios e povoados e são identificados pontos de lançamento de esgoto doméstico e resíduos sólidos (Bautista et al., 2016). Na

parte inferior do rio, estendendo-se desde o bairro Caixa d'Água até a sua foz, o cenário se caracteriza pelo adensamento populacional mais intenso, em que há presença de áreas urbanas densamente povoadas e ocorrência de despejos de esgoto doméstico e até mesmo de origem industrial. Tal cenário pode ter um impacto significativo na qualidade da água do Rio Beberibe e, por consequência, nos ecossistemas aquáticos que dependem do mesmo (Baustista et al., 2016).

Para conduzir a análise, utilizou-se os dados de monitoramento coletados pela Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) do Estado de Pernambuco (CPRH, 2021). O banco de dados do órgão abrange o curso d'água do Rio Beberibe compreendendo cinco pontos distintos de monitoramento, conforme ilustrado na Figura 1, esses pontos são identificados como BE-01, BE-09, BE-30, BE-45 e BE-50, detalhados no Quadro 1 com informações abrangentes sobre as características dos locais de amostragem.

Quadro 1 - Caracterização dos pontos monitorados ao longo do Rio Beberibe. Fonte das informações: CPRH (2021).

Estação	Corpo d'água	Descrição do local
BE-01	Rio Araçá	Habitacional rarefeita. Na nascente do Rio Beberibe, no açude no Clube Sete Casuarinas, em Aldeia, Camaragibe.
BE-09	Rio Beberibe	Habitacional rarefeita. Na captação da COMPESA em Guabiraba, Recife.
BE-30	Rio Morno	Habitacional densa. Na ponte na Estrada do Cumbe, acesso à Linha do Tiro, Recife.
BE-45	Riacho Lava Tripa	Habitacional densa. Na ponte da Av. Presidente Kennedy, Olinda.
BE-50	Rio Beberibe	Habitacional densa. Após receber o Canal Vasco da Gama, na ponte de acesso a Peixinhos, na divisa das cidades de Olinda e Recife.

A área circundante aos pontos de monitoramento é marcada pela diversidade de ocupações e de usos, que incluem práticas de policultura, áreas urbanas e setores industriais, bem como a presença de ecossistemas naturais como a Mata Atlântica e Manguezais. Além disso, os usos do rio abrangem funções significativas, tais como a preservação dos ecossistemas aquáticos, o abastecimento de água para diversas finalidades e a recepção de efluentes provenientes de origens domésticas e industriais. Essa complexa interação de atividades humanas e ecossistemas naturais ao longo do Rio Beberibe estabelece o contexto multifacetado no qual a análise da qualidade da água é conduzida (CPRH, 2021).

Entre os parâmetros monitorados optou-se em concentrar a análise em quatro deles (Tabela 1). A seleção desses parâmetros se deve à capacidade deles de delinear as influências decorrentes da proximidade da ocupação humana sobre o corpo aquático. Adicionalmente, essa escolha foi pautada na aderência dos dados a pressupostos metodológicos relevantes, tais como normalidade (verificado através do teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade (confirmado por meio do Teste de Levene) e independência (assegurado por meio do teste Qui-Quadrado). Ademais, o recorte temporal abrange o período entre os anos de 2006 e 2018, exceto os anos de 2011 e 2015 em que não há registros. A abordagem adotada para seleção de dados foi centrada nos meses iniciais de cada trimestre, de cada ano, resultando em uma amostra composta por 165 observações para cada um dos parâmetros, onde a síntese desses dados é

apresentada na Tabela 1. A delimitação temporal e a abordagem de amostragem criteriosa conferem a essa análise um fundamento sólido, permitindo a apreensão de tendências e variações relevantes na qualidade da água ao longo de um período substancial.

Tabela 1 - Resumo estatístico dos parâmetros analisados.

Estatística	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	P (mg/L)
Mínimo	0,00	0,50	0,00	0,00
Máximo	9,30	137,00	34,20	3,47
Média	2,66	18,86	5,99	0,81
Mediana	1,30	15,40	4,60	0,75
Desvio padrão	2,77	21,4	6,74	0,80

Diante do conjunto amostral disponível, prosseguiu-se com a análise do comportamento da série temporal e, de modo a qualificar esse comportamento, optou-se por utilizar a estatística não-paramétrica de tendências, o teste de Mann-Kendall, que envolve duas hipóteses:

- Hipótese Nula (H0): afirma que não há tendência significativa na série temporal, em outras palavras, os valores da série não estão mudando sistematicamente ao longo do tempo.
- Hipótese Alternativa (H1): é a negação da hipótese nula, ou seja, afirma que há tendência significativa na série temporal e os valores da série estão mudando de forma sistemática, seja aumentando ou diminuindo, ao longo do tempo.

Ao realizar o teste de Mann-Kendall, a análise estatística visa determinar se há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula em favor da hipótese alternativa. Se o teste resultar em um valor-p menor que um nível de significância pré-definido, a hipótese nula é rejeitada, indicando a presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal. É importante observar que o teste de Mann-Kendall não indica a direção (crescente ou decrescente) da tendência, apenas se há tendência significativa. A direção da tendência é geralmente interpretada observando-se o sinal da estatística de teste, mas isso não é diretamente incorporado nas hipóteses do teste em si. O cálculo baseia-se no conceito de ranqueamento dos valores na série temporal e compara cada valor com todos os valores subsequentes, atribuindo classificações de acordo com a direção da tendência (se crescente ou decrescente). A partir desses ranques, são calculadas estatísticas que avaliam se há tendência significativa nos dados.

A estatística de teste do Mann-Kendall, chamada de estatística "S", é calculada somando os valores dos sinais dos produtos das diferenças entre os pares de valores da série. Se "S" for significativamente diferente de zero, isso indica a presença de tendência. Em linhas gerais, a estatística do teste (S) resulta na comparação dos valores da série temporal ao longo do tempo, conforme Equação 1, ou seja, dada a série ordenada, cada valor é comparado com todos os subsequentes, caso esse dado seja maior que o posterior, a estatística incrementa em 1, se contrário, é reduzida em 1, sendo que as somas ou reduções desses incrementos levam ao valor da estatística (Trindade et al., 2017). Conforme Fernandes et al. (2022), quando existe um número alto de observações (n), a distribuição de probabilidade S tende para uma distribuição normal, com média zero e variância dada pela Equação 2. A interpretação do valor resultante (Z), Equação 3, proporciona uma diretriz clara: valores positivos denotam tendência ascendente, enquanto valores negativos indicam tendência descendente. Nesse contexto, a hipótese nula, que postula a ausência de tendência nos valores em relação a T, é rejeitada quando o valor resultante demonstra significativa discrepância em relação a zero (Ye e Kameyama, 2020).

$$S = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \text{sinal}(x_i - x_j) \quad (1)$$

Em que x são os dados estimados da sequência de valores.

$$\text{Var}(T) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

$$Z \text{ assume:} \quad (3)$$

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}[S]}} \text{ para } S > 0$$

$$Z = 0 \text{ para } S = 0$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}[S]}} \text{ para } S < 0$$

Para este estudo, o nível de significância adotado foi estabelecido em 0,05. Em outras palavras, p-valores que não ultrapassam esse limiar indicam que os conjuntos de dados exibem um padrão de tendência. O procedimento do teste de Mann-Kendall foi executado utilizando a linguagem de programação R, por meio da utilização do pacote "trend". Adicionalmente, a análise gráfica complementar foi realizada empregando o pacote "ggplot2", oferecendo uma representação visual elucidativa das tendências identificadas. Além disso, a fim de fornecer uma compreensão mais abrangente dos impactos na qualidade da água na sub-bacia, utilizou-se informações provenientes do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil - MapBiomias, especificamente a coleção 7.0. Essa coleção apresenta ampla série de dados anuais sobre a cobertura e o uso do solo, resultado de uma análise que emprega a classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina em conjunto com a plataforma *Google Earth Engine*, de grande capacidade de processamento em nuvem. No presente estudo, foram adquiridos dados dos anos de 2006 a 2017, abrangendo classes representativas de vegetação (incluindo formações florestais, savânicas, mangues, campos alagados e áreas pantanosas), de zonas urbanas e de agricultura (englobando canaviais e outros mosaicos agrícolas). Desses dados, foi elaborado um mapa, permitindo a representação espacial da localização dos pontos de monitoramento de responsabilidade da CPRH frente aos usos e ocupações da área da sub-bacia. Essa tarefa foi executada mediante a utilização de ferramentas de software livre, incluindo o QGIS, além da linguagem de programação Python, com os pacotes "Pandas" e "Matplotlib". Essas ferramentas combinadas permitiram a visualização dos resultados de maneira clara e concisa, facilitando a interpretação do padrão de uso do solo nas proximidades dos pontos de monitoramento, bem como seu potencial relação com as mudanças na qualidade da água ao longo do período de estudo.

A inclusão das informações de cobertura e uso do solo provenientes do projeto MapBiomias adiciona uma camada essencial à análise das tendências de qualidade da água no Rio Beberibe. Ao compreender como as atividades humanas e as

mudanças na cobertura do solo podem influenciar diretamente a qualidade da água, é possível estabelecer conexões entre os resultados do teste de Mann-Kendall e os fatores que podem estar impulsionando tais tendências. A combinação de dados de monitoramento in situ, análise de tendências e informações de uso do solo fornece uma abordagem abrangente para investigar as complexas interações entre atividades humanas e o ambiente aquático do Rio Beberibe.

3. Resultados e discussão

De forma geral, a análise da série temporal correspondente ao monitoramento do Rio Beberibe, ao longo do período de 11 anos, revela variabilidade tanto em termos espaciais como temporais e ocorre de maneira distinta entre os anos e entre os pontos de amostragem. A aplicação do teste de Mann-Kendall fornece conhecimentos relevantes. No que tange aos nutrientes (P e NH₃) não se delineiam tendências claras. Por outro lado, para os parâmetros de OD e DBO, há indícios de tendência de aumento em alguns pontos de monitoramento. Os resultados apresentados no Quadro 2 oferecem uma visão mais detalhada das constatações derivadas do teste de Mann-Kendall, considerando cada ponto monitorado individualmente.

Quadro 2 - Teste de tendência Mann-Kendall para os pontos monitorados ao longo do Rio Beberibe. Em vermelho, sinaliza as variáveis que apresentaram tendência.

Estação	Parâmetros	P-Valor	Estatística Mann-Kendall	Tendência
BE-01	NH ₃	0,214	1,240	Não há tendência
	DBO	0,009	2,620	Tendência aumento
	P	0,082	-1,740	Não há tendência
	OD	0,002	3,060	Tendência aumento
BE-09	NH ₃	0,360	0,915	Não há tendência
	DBO	0,428	0,793	Não há tendência
	P	0,589	-0,541	Não há tendência
	OD	0,009	2,620	Tendência aumento
BE-30	NH ₃	0,321	0,992	Não há tendência
	DBO	0,394	0,852	Não há tendência
	P	0,314	-1,010	Não há tendência
	OD	0,006	2,720	Tendência aumento
BE-45	NH ₃	0,620	0,496	Não há tendência
	DBO	0,042	2,030	Tendência aumento
	P	0,975	-0,031	Não há tendência
	OD	0,201	1,280	Não há tendência
	NH ₃	0,598	0,527	Não há tendência
BE-50	DBO	0,0185	2,360	Tendência aumento
	P	0,515	-0,651	Não há tendência
	OD	0,0101	2,570	Tendência aumento

Uma observação notável é a tendência ascendente do OD observada em todos os pontos de amostragem, apesar de a DBO também evidenciar

uma inclinação ascendente. Apresenta-se na Figura 2 a série temporal das variáveis avaliadas para o Rio Beberibe.

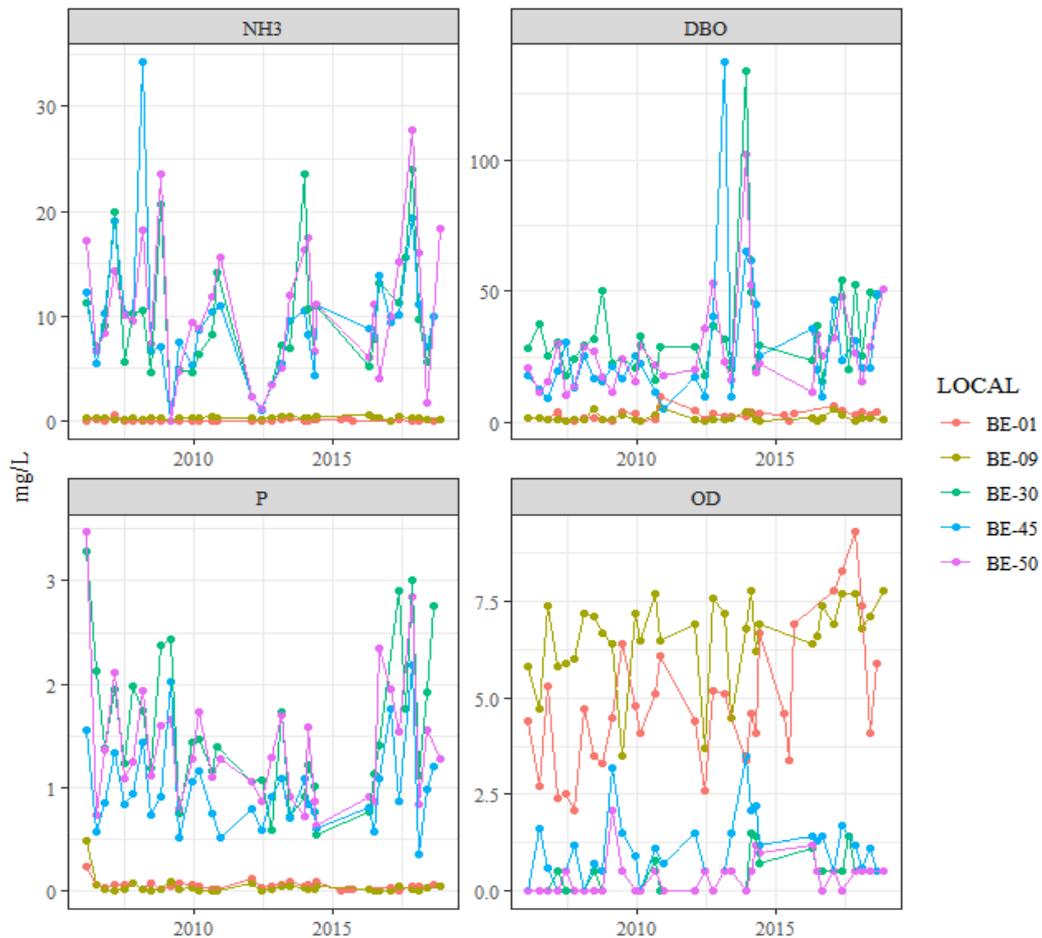


Figura 2 - Série temporal das variáveis avaliadas para o Rio Beberibe, 2006 a 2018.

Observa-se na Figura 2 que os dois pontos de cabeceira, próximos à nascente do rio (BE-01 e BE-09) foram os que apresentaram menores indicativos de alterações da qualidade da água com valores de NH_3 , P e DBO quase que nulos em concentração, como também valores mais altos para OD na faixa entre 2,5 mg/L e 7,5 mg/L. Já nos demais pontos, há flutuações consideradas para indicação da qualidade da água com valores de NH_3 , P e DBO mais elevados e OD em menores faixas. Tais flutuações por mais que não indiquem tendência de aumento/redução para a séries de nutrientes, observa-se que ocorreram anos com redução de concentração de NH_3 e P, por volta de 2009 e 2016. Além disso, entre 2011 e 2015 nota-se que ocorreram os maiores picos na concentração de DBO, e após esse período ocorreu propensão a aumentar.

Observa-se clara diferenciação de impactos na qualidade dos pontos de monitoramento ao longo da sub-bacia. Os pontos BE-01 e BE-09, situados na porção superior, emergem como menos críticos devido à ocupação esparsa no local. Além disso, o fato de BE-01 corresponder à nascente e BE-09 ser um local de abastecimento de água sugere um contexto de água de melhor qualidade. Essa tendência é corroborada pelos resultados obtidos ao longo do

período de 11 anos de análise. Por outro lado, as áreas mais a jusante das bacias costeiras, particularmente nos municípios densamente povoados de Recife e Olinda, apresentam tendência oposta. Essa parte do curso d'água registra maiores ocupações urbanas, o que, devido às deficiências na infraestrutura de saneamento básico, resulta em lançamento de carga orgânica direta nos rios. Esse impacto negativo nas águas fluviais é exacerbado pela redução nos índices de coleta de esgoto, que é observado em ambos os municípios. Entre 2006 e 2018, os índices de coleta de esgoto diminuíram de 75,35% para 74,69% em Recife e de 65,11% para 52,68% em Olinda (SNIS, 2023). Essa situação ratifica como a urbanização sem acompanhamento adequado da infraestrutura pode comprometer significativamente a qualidade da água em áreas mais adiante no curso fluvial.

O comprometimento da qualidade da água, evidenciado por essa distribuição espacial heterogênea, está intrinsecamente associado a uma série de fatores interconectados. Elementos como a natureza dos terrenos urbanos, a configuração das áreas agrícolas, as variações de temperatura, os padrões de precipitação e a altitude desempenham papéis importantes na qualidade da água. Essa

interdependência entre fatores é congruente com os achados de Wang et al. (2020), que destacam que análises de tendências em bacias hidrográficas chinesas indicam um aumento no risco à qualidade da água ao longo do trajeto de montante a jusante. Os autores enfatizam como o contexto geográfico exerce um papel preponderante no quadro de risco à qualidade da água, sublinhando a relevância em considerar o impacto cumulativo das variáveis ambientais. Sobre isso, as investigações de Wu e Lu (2021) sugerem que a paisagem desempenha um papel relevante como ponto de virada abrupta na qualidade da água, embora a influência dessa mudança seja modulada por variações sazonais. Essa perspectiva enfatiza a necessidade de uma análise mais holística, que não apenas considere a influência direta dos fatores ambientais, mas também compreenda a interação entre eles e como suas influências podem variar ao longo do tempo.

Considerando que o estado de Pernambuco carece de um enquadramento oficialmente estabelecido, é notável que, mesmo considerando que salinidade e pH não estejam diretamente no escopo de análise deste estudo, seus valores, em grande parte, permanecem consistentemente abaixo de 0,5% e 7,5%, respectivamente. Consequentemente, em conformidade com os direcionamentos delineados na Resolução Nº. 357 do Conselho Nacional de Meio

Ambiente (CONAMA, 2005), foram adotados parâmetros de referência para águas doces, em específico da classe 2. Esses parâmetros incluem concentrações de OD superiores a 5 mg/L, concentrações de P de até 0,03 mg/L, concentrações de DBO limitadas a 5 mg/L e concentrações de NH₃ limitadas a 3,7 mg/L. Sob essa orientação regulatória, a Figura 2 revela um cenário que destaca a exceção dos pontos de nascente BE-01 e BE-09, que exibem raros desvios em relação aos parâmetros delineados. Em contraste, os demais pontos de amostragem exibem uma consistência marcante em seus comportamentos, com a notável observação de que tais comportamentos frequentemente extrapolam os limites prescritos pela Resolução. Esses achados indicam uma significativa discrepância entre as concentrações observadas e os valores estabelecidos como aceitáveis para a qualidade da água, de acordo com os padrões definidos pelo CONAMA. Tal discrepância aponta para a potencial necessidade de aprimorar as estratégias de manejo e conservação a fim de atingir níveis de qualidade mais alinhados com as normas ambientais vigentes.

Junto a essa referência, outro ponto que subsidiou a discussão é quanto ao uso e ocupação do solo ao longo da sub-bacia entre os anos de 2006 e 2018, conforme Figura 3.

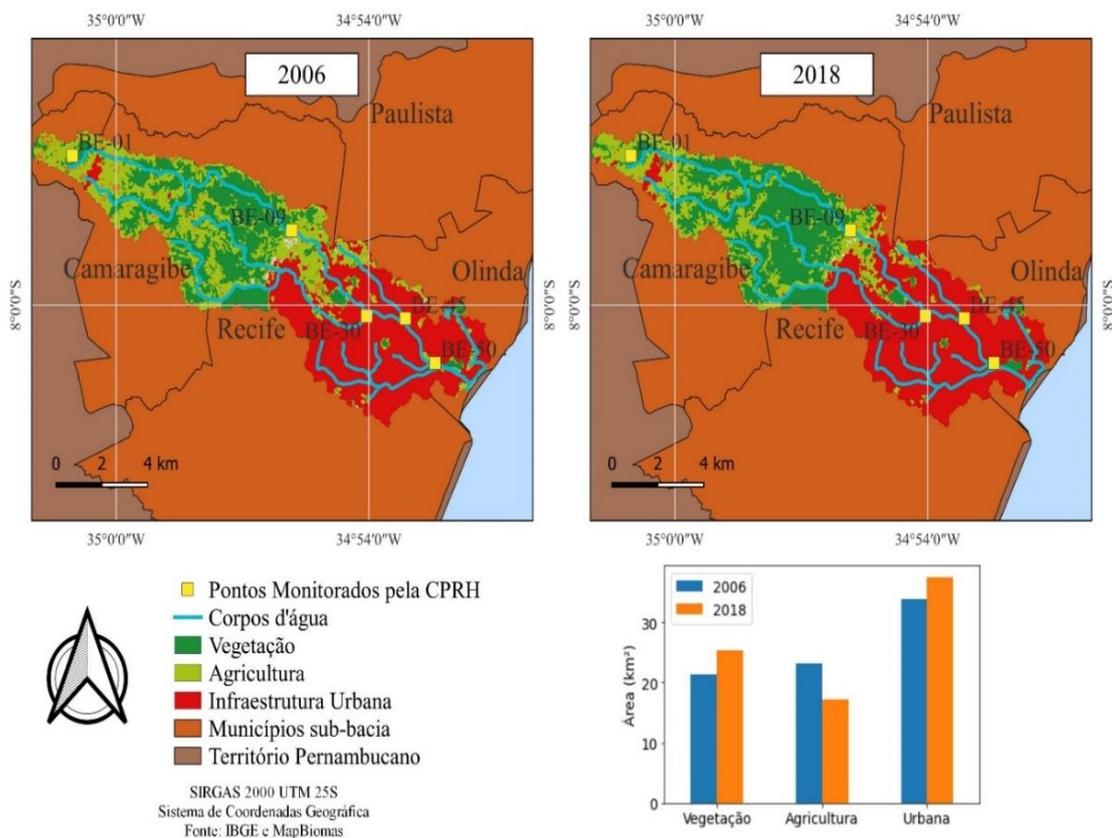


Figura 3 - Uso e ocupação da sub-bacia do Rio Beberibe entre os extremos do período de estudo.

Constata-se, Figura 3, que houve redução das áreas destinadas à cultura agrícola (34,23%), sendo representativo na área, o cultivo de cana-de-açúcar, e que houve aumento das áreas de vegetação naturais (15,26%) acompanhada do aumento nas áreas urbanas (9,79%). A adoção de medidas mais rigorosas no campo jurídico ambiental, particularmente em relação às práticas de plantio e ao desmatamento, pode ter desempenhado um papel determinante na redução das áreas agrícolas dada as implicações de práticas agrícolas não autorizadas. Paralelamente, a expansão das áreas urbanas pode ser atribuída à alta densidade populacional dos municípios circundantes.

Em termos de nutrientes (NH_3 e P), pode-se observar, Figura 2, que a maioria das concentrações ao longo dos anos na amostragem referente ao Rio Beberibe se restringem à faixa de 15,0 a 25,0 mg/L e 0,3 a 3,0 mg/L, respectivamente. São valores acima do limite estabelecido para classe 2, em pontos localizados próximo a foz da sub-bacia. Dentre os efeitos ao sistema desses dois compostos é que esses dois nutrientes são alguns dos fatores essenciais para qualificar o grau de trofia em corpos d'águas, esse grau está associado à tendência de aumento da biomassa na água que desestabiliza o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e usos múltiplos como abastecimento e recreação. Insumos como fertilizantes e sedimentos provenientes de atividades agrícola e urbana, presença da vegetação ripária junto a períodos chuvosos e secos são alguns dos fatores que podem afetar a entrada e o controle desses compostos no sistema aquático e resulta em mudanças no estado de trofia deles (Lønborg et al., 2021; Soro et al., 2023).

A DBO é a medida indireta da presença de matéria orgânica já que quantifica o consumo de oxigênio pela atividade biológica e química diante da presença de matéria carbonácea. Esse parâmetro, nos pontos BE-01, BE-45 e BE-50 apresentaram tendências de aumento (Quadro 2), e tem forte relação com fontes pontuais de esgoto sanitário, as quais contribuem com o aumento da carga orgânica no corpo d'água e consequentemente com o aumento da DBO dada a degradação bioquímica.

As flutuações observadas na qualidade da água, ao longo do período de análise, podem estar correlacionadas com as mudanças no uso do solo e nas ocupações ao longo dos anos. A Figura 3 ratifica essas mudanças, revelando um aumento notável na expansão da mancha urbana nas proximidades do ponto de amostragem BE-01, enquanto nos pontos BE-45 e BE-50 há densificação dessa mancha urbana no mesmo período. Essas alterações na paisagem podem ter influenciado diretamente as características da água ao longo do Rio Beberibe. Além disso, a análise dos percentuais de coleta de esgoto sanitário em Camaragibe e Olinda ao longo dos anos (2006 a 2018) evidencia um crescimento pouco significativo.

Os números indicam um aumento de 2,88% para 3,69% em Camaragibe e de 65,11% para 52,68% em Olinda, de acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023). Essa discrepância pode ter contribuído para o aumento da carga orgânica nos corpos hídricos, resultando em um possível acréscimo nos níveis de DBO e uma conseqüente diminuição nos níveis de OD, fatores essenciais para a saúde dos ecossistemas aquáticos. É importante ressaltar que, além das contribuições antropogênicas, a matéria orgânica também pode ter origem natural, proveniente do próprio ambiente circundante. O corpo hídrico em si pode decompor materiais carbonáceos, como folhas e detritos, que exercem influência direta na concentração de parâmetros como a DBO. Arguelho et al. (2017) sublinham a importância de considerar tanto fontes naturais quanto antrópicas ao interpretar variações nos parâmetros de qualidade da água.

Quanto ao OD, que é um parâmetro essencial à vida aquática, apresentou tendência de aumento em todos os pontos. Condições entre 2 e 5 mg/L podem causar estresse biológico, limite delimitado para classe 2, já entre 0 e 2 mg/L condições de hipóxias e 0 mg/L de anóxia, dada certas condições, mantém relação indireta com a DBO, já que o lançamento de esgoto doméstico *in natura* aumenta a atividade biológica de degradação da matéria orgânica e dentre os impactos ao meio provoca redução na concentração de OD (Bricker et al., 2003; Breitburg et al., 2018).

Observa-se que o OD, Quadro 2, mantém uma relação diretamente proporcional às tendências de DBO indicando que outros fatores podem estar afetando os respectivos valores. Ademais, os pontos de cabeceiras BE-01 e BE-09 foram os que apresentaram concentrações que ao longo do período monitorado mantiveram-se acima dos 2 mg/L, indicando que fatores que impactam o meio aquático podem estar causando desequilíbrio e estresse, mas evidencia-se certa tendência a condições acima de 5 mg/L. Contudo, é preocupante a situação dos pontos próximos a foz.

Os pontos BE-30, BE-45 e BE-50 localizados em áreas com forte pressão de áreas urbanizadas, Figura 3, que apresentam baixo percentual de coleta de esgoto, como apresentado indicadores de coleta na discussão da DBO. Esse parâmetro manteve-se bem elevado e acima do que determina o limite do CONAMA, podendo estar associado às concentrações críticas de OD, uma vez que as amostras, em sua maioria, estiveram abaixo dos 2 mg/L indicando possibilidade de cenários de hipóxias frequentes ao longo desses pontos monitorados, apesar da tendência de aumento para o período entre 2006 e 2018. Uma possibilidade para explicar essa tendência deve-se à possibilidade de

outros fatores contribuírem como tampões fazendo com que o sistema não apresente grandes variações dado as fontes impactantes. Como relatado por Costa et al. (2017) no Estuário Goiana, localizado na divisa dos estados da Paraíba e de Pernambuco, as águas marinhas, na porção baixa, contribuem com o aumento do teor de oxigênio, dada a concentração de OD nessas águas ser maior que na água doce dos rios, ademais nesse estuário foram observados episódios de hipóxia durante a estação seca dada o refluxo de água reduzido. A análise a curto prazo sustenta a tendência de degradação que se manifesta nas proximidades da foz do Rio Beberibe.

Apesar da lacuna ao conhecimento em estudo que visa o compartimento sedimentar dos rios, para o Rio Beberibe há estudos que inferem os efeitos do alto grau de poluição de suas águas na biota local. Veras et al. (2019) e Freitas et al. (2022), analisando a zona hiporréica em três pontos por períodos diferentes ao longo do rio, observaram uma densidade maior de indivíduos da meiofauna nos pontos próximos às áreas urbanizadas. Esses estudos também mostram maior concentração de matéria orgânica e inferem que esse fator advém dos lançamentos de esgoto sanitário *in-natura* alimento para as faunas locais, ademais favorece a redução da condutividade hidráulica, podendo reduzir a infiltração e afetar a recarga de aquífero local.

Já o estudo de Veras et al. (2019) indicou a presença de fármacos em análise ao longo da foz do Rio Beberibe. Os autores identificaram a ocorrência de compostos anti-inflamatórios, diclofenaco e paracetamol em concentrações distintas ao longo dos pontos amostrados. Os autores observaram também a presença dos dois fármacos no ponto circundado por áreas urbanizadas, encontrando nos períodos secos maiores concentrações.

Adicionalmente, deve-se considerar a contribuição significativa de abordagens baseadas na análise de tendências. Essas abordagens têm se mostrado valiosas na aquisição de uma compreensão mais aprofundada da série temporal, permitindo uma orientação mais precisa na definição de medidas a serem implementadas para aprimorar a qualidade da água na região. Ao identificar padrões de mudança e direcionar a eficácia de intervenções, essas análises contribuem para a efetiva gestão dos recursos hídricos e para a promoção de medidas sustentáveis que visam a preservação e a restauração da qualidade da água do Rio Beberibe. Essas constatações reiteram a complexidade das influências sobre a qualidade da água no Rio Beberibe, refletindo tanto nas variações sazonais e anuais como na heterogeneidade da ocupação humana e nas atividades associadas.

Essa análise detalhada amplia a compreensão das dinâmicas discutidas e fornece um ponto de partida relevante para a formulação de

estratégias de manejo e conservação mais efetivas na busca pela melhoria contínua da qualidade da água no corpo d'água.

4. Conclusão

A análise detalhada do Rio Beberibe e sua sub-bacia hidrográfica revela uma complexa interação entre fatores de uso do solo, ocupação urbana, atividades agrícolas e impactos na qualidade da água. Os pontos de cabeceira, especialmente BE-01 e BE-09, apresentaram indicativos de melhor qualidade da água, caracterizados por concentrações mais baixas de nutrientes e matéria orgânica, bem como valores mais elevados de OD. No entanto, à medida que o rio avança em direção à foz, nos pontos BE-30, BE-45 e BE-50, a situação da qualidade da água se deteriora. Essa degradação está associada à urbanização, à densidade populacional e às deficiências no sistema de coleta e tratamento de esgoto, resultando em um aumento das concentrações de nutrientes e DBO, bem como uma diminuição dos níveis de OD.

A análise estatística de tendências por meio do teste de Mann-Kendall revelou tendências significativas em alguns pontos de monitoramento. Houve tendências de aumento na concentração de DBO em diversos pontos, sugerindo aumento do lançamento de carga orgânica na água. Essas tendências podem estar relacionadas a fatores como urbanização, atividades agrícolas e despejo inadequado de esgoto. A influência das mudanças de uso e ocupação do solo também foi evidente. A redução das áreas agrícolas e o aumento das áreas urbanas indicam pressões crescentes sobre a bacia hidrográfica. O crescimento das áreas urbanas associado a um baixo percentual de coleta de esgoto contribui para o aumento da carga orgânica e nutrientes na água, agravando ainda mais os problemas de qualidade da água.

Diante desses resultados, é evidente a necessidade de ações abrangentes de gestão da bacia hidrográfica do Rio Beberibe. Medidas de controle da poluição, como o tratamento adequado de esgoto, a preservação das áreas de vegetação natural e a implementação de práticas agrícolas sustentáveis, são fundamentais para reverter a tendência de deterioração da qualidade da água. Além disso, políticas de planejamento urbano e medidas de conscientização da população também desempenham um papel muito importante na proteção desse recurso vital.

Os resultados também destacam a importância da monitorização contínua da qualidade da água e a coleta de dados ao longo do tempo. A série temporal analisada permitiu identificar tendências que podem não ser óbvias em análises pontuais, esse tipo de abordagem é fundamental para avaliar a eficácia

das medidas de mitigação adotadas e fazer ajustes conforme necessário.

Adicionalmente, o estudo ressalta a relevância do uso de ferramentas estatísticas para analisar tendências ao longo do tempo. O teste de Mann-Kendall revelou padrões que vão além das flutuações naturais, fornecendo informações objetivas sobre a direção das mudanças nos parâmetros de qualidade da água. É importante mencionar que os resultados deste estudo podem servir como base para a formulação de políticas públicas voltadas para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região. A conscientização da população, a colaboração entre órgãos governamentais, instituições de pesquisa e comunidades locais constituem partes fundamentais para a implementação eficaz de tais políticas. Ao compreender as nuances inerentes à seleção e ao tratamento dos parâmetros monitorados, é possível aprimorar a interpretação das análises subsequentes e reconhecer a robustez do conjunto de dados utilizado. Essa abordagem metódica é fundamental para assegurar a representatividade e a credibilidade das conclusões alcançadas, contribuindo assim para uma compreensão mais profunda dos fatores que influenciam a qualidade da água no Rio Beberibe.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão de bolsas aos primeiros autores deste trabalho conforme os seguintes processos: IBPG-1279-3.01/22 (FACEPE), 88887.814388/2023-00 (CAPES).

Referências

- Alilou, H., Oldham, C., McFarlane, D., Hipsey, M.R., 2022. A structured framework to interpret hydro-climatic and water quality trends in Mediterranean climate zones. *Journal of Hydrology* 614, 1-22.
- Arguelho, M.L.P.M., Alves, J.P.H., Monteiro, A.S.C., Garcia, C.A.B., 2017. Characterization of dissolved organic matter in an urbanized estuary located in Northeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* 189, 1-12.
- Bautista, D.C.G., Soeiro, Í.C.M., Nascimento, M.M. P., 2016. Um estudo sobre as dinâmicas territoriais e seus reflexos na bacia hidrográfica do Rio Beberibe. *Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais* 05, 311-332.
- Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., Gregoire, M., Chavez, F.P., Conley, D.J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G.S., Limburg, K.E., Montes, I., Naqvi, S.W.A., Pitcher, G.C., Rabalais, N.N., Roman, M.R., Rose, K.A., Seibel, B.A., Zhang, J., 2018. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 359 46, 1-11
- Bricker, S.B., Ferreira, J.G., Simas, T., 2003. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. *Ecological Modelling* 169, 39-60.
- Chowdari, K., Deb Barma, S., Bhat, N., Girisha, R., Gouda, K.C., Mahesha, A., 2023. Trends of seasonal and annual rainfall of semi-arid districts of Karnataka, India: application of innovative trend analysis approach. *Theoretical and Applied Climatology* 1-24.
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2005. Resolução No. 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/1egislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 29 nov. 2023.
- Costa, C.R., Costa, M.F., Barletta, M., Alves, L.H.B., 2017. Interannual water quality changes at the head of a tropical estuary. *Environmental Monitoring and Assessment* 189, 1-13.
- CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente, Pernambuco, 2021. Padrões Típicos de Águas Costeiras. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-da-agua/bacias-hidrograficas/indices-e-indicadores/>. Acesso em: 29 nov. 2023.
- Fernandes, A.C.G., Borges, I.M.S., Silva, J.A., Silva, E.C.B., Santos, M.J.R., Pessoa, D.S., Martins, M.S., Silva, J.A., Campos, J.O., Medeiros, L.R.A., 2022. The use of the Mann-Kendall test for detection of precipitation trends in a semi-arid region of Pernambuco. *Research, Society and Development* 11, 1-11.
- Freitas, J.B.A., Cabral, J.J.S.P., Paiva, A.L.R., Veras, T.B., Barcellos, R.L., Santos, P.J.P., Gomes Júnior, E.L., 2022. Evidence of protective effects on aquifer recharge from polluted tropical rivers: An analysis of hyporheic meiofauna and sediments. *River Research and Applications* 38, 345-357.
- Giri, S., 2021. Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. *Environmental Pollution* 271, 1-23.
- Giri, S., Qiu, Z., Zhang, Z., 2018. Assessing the impacts of land use on downstream water quality using a hydrologically sensitive area concept. *Journal of Environmental Management* 213, 309-319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.075>

- Hashim, M., Nayan, N., Setyowati, D.L., Said, Z.M., Mahat, H., Saleh, Y., 2021. Analysis of Water Quality Trends Using the Mann-Kendall Test and Sen's Estimator of Slope in a Tropical River Basin. *Pollution* 7, 933–942.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Censo Brasileiro de 2022. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>. Acesso em: 29 nov. 2023.
- Lønborg, C., Müller, M., Butler, E.C.V., Jiang, S., Ooi, S.K., Trinh, D.H., Wong, P.Y., Ali, S.M., Cui, C., Siong, W.B., Yando, E.S., Friess, D.A., Rosentreter, J.A., Eyre, B.D., Martin, P., 2021. Nutrient cycling in tropical and temperate coastal waters: Is latitude making a difference? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 262, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107571>
- Mack, L., Andersen, H.E., Beklioglu, M., Bucak, T., Couture, R.M., Cremona, F., Ferreira, M.T., Hutchins, M.G., Mischke, U., Molina-Navarro, E., Rankinen, K., Venohr, M., Birk, S., 2019. The future depends on what we do today – Projecting Europe's surface water quality into three different future scenarios. *Science of the Total Environment*, 668, 470–484.
- Naghetini, M., Pinto, E.J.A., 2007. *Hidrologia Estatística*. ABRH, Porto Alegre.
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2023. Brasil. Disponível: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/>. Acesso: 29 nov. 2023.
- Soro, M.P., N'goran, K.M., Ouattara, A.A., Yao, K.M., Kouassi, N.L.B., Diaco, T., 2023. Nitrogen and phosphorus spatio-temporal distribution and fluxes intensifying eutrophication in three tropical rivers of Côte d'Ivoire (West Africa). *Marine Pollution Bulletin* 186, 1-20.
- Trindade, A.L.C., Almeida, K.C.B., Barbosa, P.E., Oliveira, S.M.A.C., 2017. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do rio das velhas, estado de minas gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22, 13–24.
- Tucci, C.E., 2012. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. ABRH, Porto Alegre.
- UN – United Nations. 6 Clean Water and Sanitation. In: *Sustainable Development Goal 6 – Synthesis Report on Water and Sanitation*. United States of America: United Nations Publications, 195 pp., 2018. Disponível em: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/12/SDG6_SynthesisReport2018_WaterandSanitation_04122018.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.
- Ustaoglu, F., Tepe, Y., Tas, B., 2020. Assessment of stream quality and health risk in a subtropical Turkey river system: A combined approach using statistical analysis and water quality index. *Ecological Indicators* 113, 1-12.
- Veras, T.B., Paiva, L.R.A., Duarte, M.M.M.B., Napoleão, D.C., Cabral, J.J.S.P., 2019. Analysis of the presence of anti-inflammatories drugs in surface water: A case study in Beberibe river - PE, Brazil. *Chemosphere* 222, 961–969.
- Vigiak, O., Udias, A., Pistocchi, A., Zanni, M., Aloe, A., Grizzetti, B., 2021. Probability maps of anthropogenic impacts affecting ecological status in European rivers. *Ecological Indicators* 126, 1-19.
- Wang, Y., Xu, Y., Tabari, H., Wang, J., Wang, Q., Song, S., Hu, Z., 2020. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China. *Atmospheric Research* 231, 1-14.
- Wu, J., Lu, J., 2021. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes. *Water Research* 191, 1-11.
- Ye, F., Kameyama, S., 2020. Long-term spatiotemporal changes of 15 water-quality parameters in Japan: An exploratory analysis of countrywide data during 1982–2016. *Chemosphere*, 242.
- Yu, S., Du, X., Lei, Q., Wang, X., Wu, S., Liu, H., 2023. Long-term variations of water quality and nutrient load inputs in a large shallow lake of Yellow River Basin: Implications for lake water quality improvements. *Science of the Total Environment*, 900, 1-10.
- Zhang, Z., Fan, Y., Jiao, Z., 2023. Wetland ecological index and assessment of spatial-temporal changes of wetland ecological integrity. *Science of the Total Environment* 862, 1-13.
- Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q., Gao, Z., 2016. A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators* 60, 442–452.