



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

ANDRESSA ALVES DE MOURA

**APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE
POLUENTES DE ORIGEM DIFUSA NO RIO IPOJUCA COMO FERRAMENTA DE
MELHORIA DA GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS NA CIDADE
DE CARUARU**

Recife - PE

2025

ANDRESSA ALVES DE MOURA

**APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE
POLUENTES DE ORIGEM DIFUSA NO RIO IPOJUCA COMO FERRAMENTA DE
MELHORIA DA GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS NA CIDADE
DE CARUARU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos

Área de Concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos

Orientador(a): Profº Dr. Gilson Lima da Silva

Coorientador(a): Profº Dr. Elson Miranda Silva

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Moura, Andressa Alves de.
Aplicação de modelos matemáticos para quantificação de poluentes de origem difusa no Rio Ipojuca como ferramenta de melhoria da gestão integrada de recursos hídricos na Cidade de Caruaru / Andressa Alves de Moura. - Recife, 2025. 129f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e regulação de recursos hídricos, 2025.
Orientação: Gilson Lima da Silva.
Coorientação: Elson Miranda Silva.

1. gestão de recursos hídricos; 2. modelagem matemática para qualidade da água; 3. poluição difusa em águas fluviais; 4. rio ipojuca. I. Silva, Gilson Lima da. II. Silva, Elson Miranda. III. Título.

UFPE-Biblioteca

Central

ANDRESSA ALVES DE MOURA

**APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE
POLUENTES DE ORIGEM DIFUSA NO RIO IPOJUCA COMO FERRAMENTA DE
MELHORIA DA GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS NA CIDADE
DE CARUARU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Gilson Lima da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dra. Maiara Gabrielle de Souza Melo (Examinador Interno)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

Profº. Dr. Rogerio Ferreira da Silva (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus; que me concedeu disposição para desenvolver esta
pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que, com sua infinita bondade me conferiu a oportunidade de realizar o mestrado e a disciplina necessária para executar esta pesquisa;

À minha mãe, por todo o apoio e pela insistência de acreditar em mim, sendo sempre a minha fonte de inspiração e força, meu exemplo e a minha energia que me impulsiona a seguir em frente. Seu amor e sua coragem me ensinaram que, com determinação e resiliência, posso alcançar qualquer objetivo. Tudo o que conquistei foi graças à sua presença constante e ao seu amor incondicional. A senhora sempre será o combustível que mantém meu sonho vivo;

À minha irmã Alice, que foi minha base desde a inscrição no mestrado, compartilhando sonhos e conquistas, encorajando-me a seguir em frente e sendo uma fonte inesgotável de inspiração. Obrigada por acreditar em meus sonhos como se fossem seus.

Ao meu amado noivo, Bruno, pelo apoio incondicional e por compartilhar seu conhecimento e esforço durante todo o processo, especialmente na desafiadora tarefa da coleta de água no Rio Ipojuca. Sem você, essa caminhada teria sido muito mais difícil.

Ao meu afilhado João Victor, que, com dedicação e entusiasmo, mergulhou comigo no mundo da pesquisa. Seu apoio foi fundamental, sempre disposto a ajudar com as coletas. Sua presença trouxe leveza e alegria a este trabalho. Obrigada, João, por estar ao meu lado e fazer parte dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof.Dr. Gilson Lima da Silva, por todos os conselhos e por ter aceitado me guiar nesta jornada. Sua presença foi uma luz em meio aos momentos de incerteza, especialmente quando eu mesma duvidava da minha capacidade. Sua paciência e palavras de encorajamento me fizeram enxergar que os desafios que enfrentei são pequenos diante de tudo o que o senhor já superou. Sua força e dedicação me inspiraram a seguir em frente. Muito obrigada por acreditar em mim, mesmo quando eu não acreditava. Sou imensamente grata por não ter desistido de mim.

Ao Mestre em Engenharia Civil José Vitor Aragão sua generosidade foi fundamental para o meu crescimento. Sua disposição em ajudar tornaram essa jornada mais serena e enriquecedora.

Às minhas queridas amigas do mestrado: Deisyane, Mona, Petrúcia e Priscila, por todos os momentos compartilhados e por todos os sonhos que sonhamos juntas, desde as primeiras aulas até o tão esperado dia de nossas defesas. A companhia de vocês tornou essa caminhada mais leve e especial, e a amizade que construímos é um dos maiores presentes que levarei desta jornada.

Às minhas amigas Bárbara e Gabrielle. Bárbara, sua compreensão e apoio em momentos tão desafiadores da minha vida de mestranda foram fundamentais. Você esteve ao meu lado, oferecendo ajuda quando eu mais precisei e, com sua generosidade, me deu a tranquilidade para continuar. Sua amizade foi um verdadeiro presente. Gabrielle, obrigada por me ouvir, por acreditar em mim e por enxergar na minha trajetória algo inspirador, mesmo quando eu mesma não conseguia ver. Saber que, de alguma forma, minha caminhada tocou você me dá forças para continuar sonhando e acreditando.

Ao meu querido amigo Esdras, que esteve ao meu lado durante aqueles momentos em que o sonho de fazer um mestrado parecia distante e inalcançável. Você me ouviu com a paciência e a lealdade de um verdadeiro escudeiro, compartilhando minhas esperanças e frustrações. Sua amizade e apoio constante me deram forças para não desistir e continuar acreditando.

Ao Programa de Pós-graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos e à UFPE pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e contribuir para o avanço do conhecimento na área.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

EPÍGRAFE

Ele transforma o deserto em lençóis de água e a terra seca em mananciais.

Salmos 107, 35

RESUMO

A poluição de origem difusa, ainda pouco explorada no Brasil, impacta diretamente a qualidade da água, comprometendo a saúde e sustentabilidade dos recursos naturais, o que torna os estudos sobre ferramentas matemáticas para quantificação de poluentes, essenciais para prever o aporte de cargas de origem difusa em cursos de água. Apesar disso, os dados necessários nem sempre estão disponíveis e as vezes são difíceis de serem mensurados, dificultando o uso desses modelos como ferramentas para a gestão de recursos hídricos pelo poder público. Portanto, esta pesquisa teve como objetivo estimar e validar o potencial de lançamento de carga poluidora difusa no Rio Ipojuca, no trecho que corta o município de Caruaru, através de modelos matemáticos de qualidade. A metodologia desenvolvida contou com uma revisão sistemática da literatura sobre os temas: Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água – MQUAL, e *Pollutant Loading Application Overview* – PLOAD, com o objetivo de identificar os métodos mais utilizados na estimativa da poluição difusa, compreender suas aplicações e embasar tecnicamente a abordagem adotada. A partir dessa revisão, foram elaborados mapas bibliométricos através do *software VOSviewer* permitindo visualizar tendências, abordagens metodológicas e lacunas de pesquisa. Em seguida foi realizada a associação do uso e ocupação do solo com a precipitação utilizando estas duas temáticas a fim de aprofundar o conhecimento sobre a poluição de origem difusa como fator essencial para a qualidade da água em bacias hidrográficas, destacando a eficácia de modelos matemáticos na quantificação da poluição difusa. Como resultados, a revisão sistemática evidenciou a relevância internacional da modelagem de poluição difusa, com destaque para estudos na Alemanha, Canadá e China. No caso do Rio Ipojuca, as análises físico-químicas e o uso dos modelos MQUAL e PLOAD permitiram estimar cargas poluidoras, de origem difusa, significativas nos períodos seco e chuvoso. A validação dos modelos com os dados coletados indicou boa correspondência, reforçando sua aplicabilidade na gestão ambiental. Esses resultados subsidiam a formulação de políticas públicas locais voltadas à redução da poluição difusa e à melhoria da qualidade hídrica na bacia do Rio Ipojuca.

Palavras-chave: gestão de recursos hídricos; modelagem matemática para qualidade da água; poluição difusa em águas fluviais; rio ipojuca.

ABSTRACT

Diffuse-source pollution, still underexplored in Brazil, directly impacts water quality, compromising the health and sustainability of natural resources. This makes studies on mathematical tools for pollutant quantification essential to predict the input of diffuse loads into watercourses. Despite this importance, the necessary data are not always available and are sometimes difficult to measure, hindering the use of such models as tools for water resource management by public authorities. Therefore, this research aimed to estimate and validate the potential diffuse pollutant load discharged into the Ipojuca River, in the section that crosses the municipality of Caruaru, using water quality mathematical models. The methodology developed included a systematic literature review on the following topics: the Mathematical Model for Land Use/Water Quality Correlation – MQUAL, and the Pollutant Loading Application Overview – PLOAD, with the objective of identifying the most commonly used methods for estimating diffuse pollution, understanding their applications, and technically supporting the chosen approach. Based on this review, bibliometric maps were created using VOSviewer software, allowing visualization of trends, methodological approaches, and research gaps. Subsequently, land use and land cover were associated with precipitation data to deepen the understanding of diffuse pollution as a critical factor for water quality in river basins, highlighting the effectiveness of mathematical models in quantifying diffuse-source pollution. As results, the systematic review demonstrated the international relevance of diffuse pollution modeling, with notable studies in Germany, Canada, and China. For the Ipojuca River, physicochemical analyses and the application of the MQUAL and PLOAD models allowed for the estimation of significant diffuse pollutant loads during both dry and rainy periods. Model validation with collected data showed good agreement, reinforcing their applicability in environmental management. These results support the development of local public policies aimed at reducing diffuse pollution and improving water quality in the Ipojuca River basin.

Keywords: water resources management; mathematical modeling for water quality; diffuse pollution in river systems; ipojuca river.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	35
Figura 2 - Trecho urbano do Rio Ipojuca	37
Figura 3 - Fluxograma dos processos da elaboração da revisão sistemática	38
Figura 4 - Mapeamento dos pontos de coleta – Rio Ipojuca.....	41
Figura 5 – Parque São Francisco (Ponte do Cano) período chuvoso: 24/05/2024 ...	42
Figura 6 - Parque São Francisco (Ponte do Cano) período seco: 17/01/2025.....	42
Figura 7 - Salgado (Ponte Irmã Jerônima) período chuvoso: 24/05/2024.....	43
Figura 8 - Salgado (Ponte Irmã Jerônima) período seco: 17/01/2025	43
Figura 9 - Feira José Liberato período chuvoso: 24/05/2024.....	44
Figura 10 - Feira José Liberato período seco: 17/01/2025	44
Figura 11 - Alto do Moura (Antigo Matadouro) período chuvoso: 24/05/2024.....	45
Figura 12 - Alto do Moura (Antigo Matadouro) período seco: 17/01/2025	45
Figura 13 - Vila Gonçalves Ferreira período chuvoso: 24/05/2024	46
Figura 14 - Vila Gonçalves Ferreira período seco: 17/01/2025.....	46
Figura 15 - Ponte do Distrito período chuvoso: 24/05/2024.....	47
Figura 16 - Ponte do Distrito período seco: 17/01/2025	47
Figura 17 - Citação por documento	58
Figura 18 – Citações por autores	58
Figura 19 – Publicações por Países	59
Figura 20 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte do Distrito (maio 2024)	60
Figura 21 - Resultado da coleta no ponto localizado no Alto do Moura (maio 2024)	61
Figura 22 - Resultado da coleta no ponto localizado no Parque São Francisco (maio 2024).	62
Figura 23 - Resultado da coleta no ponto localizado na Feira José Liberado (maio 2024).	63
Figura 24 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte Irmã Jerônima (maio 2024).	63
Figura 25 - Resultado da coleta no ponto localizado na Vila Gonçalves Ferreira (maio 2024).	64
Figura 26 - Resultado da coleta no ponto localizado no Alto do Moura (janeiro 2025)	65
Figura 27 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte do Distrito Industrial (janeiro 2025).	67
Figura 28 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte São Francisco (janeiro 2025).	68
Figura 29 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte Irmã Jerônima (janeiro 2025).	70
Figura 30 - Resultado da coleta no ponto localizado na Feira Liberato (janeiro 2025)	71
Figura 31 - Resultado da coleta no ponto localizado na Vila Gonçalves (janeiro 2025)	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação da Fonte no MQUAL para o Rio Ipojuca no trecho que corta o município de Caruaru	40
--	----

LISTA DE ABREVIações

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
CD	Carga Difusa
CE	Coefficiente de Exportação
EMC	<i>Event Mean Concentration</i>
GIRH	Gestão Integrada dos Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MQUAL	Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PLOAD	<i>Pollutant Loading Application Overview</i>
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
ONU	Organização das Nações Unidas

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivo Específico	20
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Poluição Difusa	21
3.2	Modelos matemáticos aplicados à qualidade da água	23
3.2.1	Modelagem MQUAL.....	24
3.2.2	Modelagem PLOAD	26
3.2.3	Integração das modelagens	28
3.3	Gestão Integrada dos Recursos Hídricos	29
3.4	Legislação e Instrumentos de Planejamento para a Bacia do Rio Ipojuca	32
4.	METODOLOGIA	35
4.1	Área de Estudo	36
4.2	Revisão Sistemática	37
4.2.1	Análise Quantitativa	38
4.2.2	Meta-Análise	39
4.2.3	Análise Qualitativa	40
4.3	Coleta e análise de amostras de água para determinar os parâmetros de qualidade	40
4.3.1	Classificação das áreas quanto o uso e ocupação do solo	40
4.3.2	Coleta e Análise de Amostras de Água para Avaliação da Poluição Difusa no Rio Ipojuca	48
4.4	Cálculo da carga de poluição difusa por meio das ferramentas matemáticas	48
4.4.1	Desenvolvimento da modelagem do MQUAL para calcular a carga difusa associada a cada tipo de uso do solo	49

4.4.2	Desenvolvimento da modelagem do PLOAD para calcular a carga difusa associada a precipitação.....	50
4.5	Validação das modelagens MQUAL e PLOAD com parâmetros observados de qualidade da água.....	52
4.6	Avaliação da aplicabilidade dos modelos como ferramenta de gestão	52
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	Análise Bibliométrica.....	54
5.2	Análise da Qualidade da Água: Variações dos Parâmetros nos Diferentes Pontos de Amostragem do Rio Ipojuca	59
5.3	Estimativa do Potencial de Carga Poluidora através de Modelos Matemáticos de Qualidade de Água	75
5.4	Validação dos Resultados da Modelagem com os Parâmetros de Qualidade da Água.....	78
6.	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICES	91

1. INTRODUÇÃO

A poluição em rios, especialmente a de origem difusa, tem se mostrado, ao longo dos anos e conforme estudos recentes, um dos maiores desafios no gerenciamento dos recursos hídricos urbanos, devido à sua natureza não pontual, de difícil mensuração, e ao aumento significativo das cargas poluidoras nos corpos d'água após eventos de precipitação (Kozak; Fernandes, 2022).

Em escala global, essa forma de poluição tem afetado a qualidade da água em bacias hidrográficas de diferentes continentes, sendo agravada por processos de urbanização acelerada, uso inadequado do solo e mudanças nos regimes hidrológicos, especialmente em razão das alterações climáticas (UNESCO, 2024).

No Brasil, embora a legislação ambiental avance no controle de fontes pontuais, o enfrentamento das fontes não pontuais, especialmente a poluição difusa ainda apresenta fragilidades. Entre os principais desafios estão a ausência de instrumentos regulatórios específicos, a escassez de sistemas de monitoramento contínuo e o uso ainda limitado de ferramentas de modelagem que permitam estimar e acompanhar a carga poluidora difusa com precisão (Gondim; Ohnuma Júnior; Obraczka, 2023).

Nesse cenário, as mudanças climáticas assumem um papel ainda mais crítico, pois intensificam os processos que contribuem para a poluição difusa. Alterações no regime de chuvas e o aumento na frequência de eventos extremos, como secas e enchentes, ampliam o carreamento de poluentes para os corpos hídricos. Projeções realizadas pela Agência Nacional de Águas indicam que a disponibilidade de água poderá diminuir em mais de 40% em bacias hidrográficas das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e parte do Sudeste até 2040, impactando diretamente a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos disponíveis (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2023).

No Estado de Pernambuco, essa realidade se evidencia de forma acentuada na bacia hidrográfica do Rio Ipojuca, que percorre diversos municípios e sofre intensas pressões antrópicas ao longo de seu curso, principalmente pela ausência de cobertura de esgotamento sanitário e pelo descarte inadequado de resíduos sólidos e efluentes industriais (CPRH, 2024; APAC, 2024).

No município de Caruaru, localizado no Agreste pernambucano, a situação se agrava pela presença do Arranjo Produtivo Local (APL) de confecções, responsável

por significativa geração de efluentes líquidos, frequentemente lançados sem tratamento adequado no Rio Ipojuca, comprometendo sua qualidade e dificultando a gestão ambiental urbana (Silva, 2023; INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO, 2022).

“A poluição difusa não tem um ponto de lançamento específico, o que torna seu controle mais difícil, pois ocorre principalmente em função da lavagem das superfícies durante as chuvas” (Pereira *et al.*, 2021, p. 577). Apesar de reconhecida como uma das principais formas de contaminação dos corpos hídricos, a poluição difusa no Rio Ipojuca ainda é pouco monitorada e carece de estudos técnicos com aplicação prática para a gestão local. Até o momento, a literatura apresenta escassez de estimativas consolidadas da carga poluidora difusa no trecho urbano de Caruaru, o que compromete a formulação de políticas públicas e estratégias de controle ambiental. Diante disso, esta pesquisa busca justamente preencher essa lacuna, estimando a carga difusa no Rio Ipojuca com o uso de ferramentas matemáticas e dados de campo, a fim de subsidiar ações de gestão ambiental mais eficazes.

Diante da dificuldade de monitoramento direto e da ausência de estimativas consolidadas, vários autores chamam a atenção para o uso de modelagens matemáticas para quantificar o aporte de cargas difusas presentes nos corpos hídricos. Essas cargas poluidoras, incluindo nutrientes como fósforo e nitrogênio, bem como metais pesados, podem ser quantificadas considerando suas concentrações nos corpos hídricos, sendo transportadas principalmente pelo escoamento superficial decorrente de eventos de precipitação (NEIVA, 2021).

Segundo Gondim *et al.* (2023) é possível quantificar poluição difusa por meios de técnicas como medições diretas de qualidade da água em pontos estratégicos ou simulações computacionais baseadas em modelos hidrológicos.

Neiva (2021) defende que a poluição difusa deve ser mensurada por meio de modelos matemáticos, como o Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água (MQUAL). Esse modelo, possibilita a correlação entre o uso e a ocupação do solo com a qualidade da água, o que facilita o planejamento e a gestão eficaz dos recursos hídricos.

Outra ferramenta amplamente utilizada é o *Pollutant Loading Application Overview* (PLOAD), sua finalidade é estimar as cargas poluentes que chegam aos corpos d'água em áreas urbanas e rurais, principalmente no que diz respeito ao escoamento superficial das águas, que transporta aportes de poluentes como fósforo e nitrogênio para os cursos d'água, impactando negativamente sua qualidade.

Oliveira, Pinto e Maillard (2023) destacam a importância de modelos como o MQUAL e o PLOAD, que auxiliam na estimativa de cargas poluentes como fósforo, nitrogênio e metais pesados que chegam aos corpos d'água através do escoamento superficial, fornecendo suporte para a tomada de decisões no planejamento ambiental e controle de poluentes.

O Brasil possui poucas pesquisas sobre poluição difusa em comparação com outros países, como Estados Unidos e China, o que evidencia a necessidade de ampliar o uso dessas ferramentas no contexto nacional (Gondim *et al.*, 2023). Nesse cenário, observa-se que os impactos da poluição difusa já são evidentes em diversas regiões do país. A crescente urbanização e industrialização em regiões como o Agreste pernambucano, especialmente na cidade de Caruaru, têm intensificado a poluição difusa no Rio Ipojuca, comprometendo sua qualidade hídrica. Estudos indicam que os efluentes industriais e esgotos domésticos não tratados são as principais fontes de poluição nas águas do Rio Ipojuca, agravando a situação ambiental local (COMPESA, 2023).

Nesse contexto, destaca-se a importância de integrar a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) às estratégias de adaptação climática. As alterações nos padrões das chuvas e a ocorrência de fenômenos climáticos extremos representam desafios adicionais para a gestão dos recursos hídricos. A adoção de medidas adaptativas, como a proteção de mananciais, o aumento da capacidade de armazenamento e a reutilização de águas residuais, torna-se primordial para garantir a segurança hídrica e a resiliência dos ecossistemas e das comunidades (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Isto posto, visando nesta pesquisa a necessidade de se acompanhar e monitorar poluição difusa, foi proposta a avaliação quanto a aplicabilidade de ferramentas matemáticas (Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água – MQUAL, e *Pollutant Loading Application Overview* – PLOAD) para quantificação de aporte de carga difusa no Rio Ipojuca, no trecho que corta a cidade de Caruaru-PE, uma vez que a região agreste do estado vem apresentando desenvolvimento imobiliário, e possui forte presença de atividades agrícolas e polos industriais.

Essas ferramentas permitem uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos, alinhando-se às metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), que visa “melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejos e

minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos” (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2023). O ODS 6 integra a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas e contempla, além da melhoria da qualidade da água, o acesso universal à água potável, o saneamento adequado e a gestão integrada dos recursos hídricos. No contexto brasileiro, onde ainda persistem desigualdades no acesso à água e ao esgotamento sanitário, bem como sérios desafios relacionados à poluição de rios e mananciais – sobretudo por fontes difusas, iniciativas voltadas ao monitoramento e controle da carga poluidora, como o uso de modelagens matemáticas, tornam-se fundamentais para o cumprimento das metas estabelecidas.

Assim, essas ferramentas fornecem um suporte essencial para a tomada de decisões estratégicas, visando a diminuição de impactos ambientais e a preservação dos recursos hídricos (Santos, 2021).

As ferramentas de modelagem matemática desempenham um papel importante na gestão de recursos hídricos, pois permitem prever e mitigar problemas relacionados à qualidade e disponibilidade da água. De acordo com o Relatório Mundial da ONU sobre Recursos Hídricos de 2024, a modelagem matemática é essencial para prever a concentração de poluentes, como o fósforo, em bacias hidrográficas. Ferramentas como essas facilitam a tomada de decisões estratégicas, auxiliando na preservação o uso sustentável dos recursos hídricos (UNESCO, 2024).

Ainda, segundo UNESCO (2024), as ferramentas matemáticas melhoram a gestão hídrica ao fornecerem simulações e previsões precisas sobre o comportamento dos recursos hídricos em diferentes cenários. Os modelos matemáticos além de ajudarem a identificar fontes de poluição e a quantificar cargas difusas eles preveem a disponibilidade da água com base em variáveis (precipitação, uso do solo e vazão). Isso permite uma tomada de decisão mais eficaz, tanto para a preservação ambiental quanto para o planejamento de políticas públicas voltadas ao uso sustentável dos recursos hídricos.

De acordo com Araújo (2021) e Sousa (2024), o Rio Ipojuca, que atravessa o município de Caruaru, está entre os mais poluídos do Brasil. A poluição é em grande parte causada pelo despejo de esgotos domésticos não tratados, além de resíduos industriais e agrícolas. De acordo com dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), Caruaru contribui com 40% dessa poluição, sendo que 67% da contaminação resulta do lançamento direto de esgotos domésticos no rio, o que

agrava os problemas ambientais na região. Diante desse contexto, evidencia-se a necessidade de ferramentas que subsidiem o diagnóstico e a tomada de decisão no enfrentamento da poluição difusa no Rio Ipojuca, especialmente no trecho urbano de Caruaru. Assim, esta pesquisa propõe uma abordagem que busca contribuir para a mitigação desses impactos, oferecendo subsídios técnicos que fortaleçam a gestão ambiental da bacia hidrográfica.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Estimar o potencial de lançamento de carga poluidora difusa no Rio Ipojuca no trecho urbano do Município de Caruaru-PE, através de modelos matemáticos de qualidade.

2.2 Objetivo Específico

- Realizar uma revisão sistemática da literatura para identificar as principais pesquisas científicas internacionais sobre poluição difusa, com ênfase nas abordagens metodológicas e nas ferramentas de modelagem aplicadas;
- Identificar possíveis variações na qualidade da água do rio Ipojuca a partir da análise de parâmetros obtidos em diferentes pontos de amostragem.
- Estimar o potencial de carga poluidora de origem difusa do rio Ipojuca através de ferramentas matemáticas;
- Validar os resultados da simulação com os parâmetros de qualidade de água do rio Ipojuca.
- Avaliar a aplicabilidade dos modelos MQUAL e PLOAD como ferramentas de suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia do Rio Ipojuca.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Poluição Difusa

A poluição difusa em rios é um tema ambiental de grande relevância e complexidade, caracterizada pela dispersão de poluentes oriundos de múltiplas fontes, cuja identificação e monitoramento são desafiadores. Diferente da poluição pontual, que se origina de fontes específicas, como efluentes industriais ou domésticos, a poluição difusa provém de áreas extensas, como zonas agrícolas e urbanas e é transportada para os corpos d'água principalmente pelo escoamento superficial durante eventos de precipitação (Kozak; Fernandes, 2022).

Quando analisado o setor agrícola, é possível identificar que a principal fonte de poluição difusa está relacionada ao uso de agroquímicos, entre eles os fertilizantes e pesticidas. Quando aplicado em excesso, esses compostos, podem ser carregados pelas águas pluviais para os rios e lagos, ocasionando eutrofização, impactando negativamente na qualidade da água. Esse processo envolve o enriquecimento dos corpos hídricos com nutrientes, como nitrogênio e fósforo, promovendo o crescimento excessivo de algas e outras plantas aquáticas, o que compromete o equilíbrio ecológico e a biodiversidade (ECOANGOLA, 2024). Além disso, a decomposição das algas gera consumo elevado de oxigênio, resultando na ausência de oxigênio dissolvido que afeta a sobrevivência de espécies aquáticas sensíveis.

Ao se analisar as zonas urbanas, a poluição difusa está profundamente associada ao escoamento superficial em áreas impermeáveis, como calçadas e ruas asfaltadas. Durante o período de precipitação pluviométrica intensa, esses ambientes contribuem para o transporte de grande variedade de poluentes, incluindo metais pesados, óleos, graxas e resíduos sólidos, que são arrastados para os rios, afetando de forma negativa os ecossistemas aquáticos e a saúde humana (Costa *et al.*, 2021). A ausência de drenagem urbana adequada e o crescimento desordenado das cidades agravam esse problema, tornando a gestão da poluição difusa um desafio significativo para as administrações municipais. No caso específico do rio Ipojuca, a expansão urbana sem o devido planejamento, aliada à precariedade dos sistemas de drenagem e esgotamento sanitário, tem intensificado o aporte de poluentes difusos ao longo do curso do rio (Araújo, 2021; APAC, 2024).

No contexto da bacia hidrográfica do rio Ipojuca, a APAC (2024) destaca que o escoamento superficial decorrente das chuvas intensas tem contribuído significativamente para a poluição difusa, especialmente em áreas urbanas como Caruaru, onde se verifica a ausência de infraestrutura de saneamento e manejo adequado de resíduos.

Outro aspecto relevante no contexto do rio Ipojuca, frequentemente negligenciado nas discussões sobre poluição difusa, é o lançamento de efluentes têxteis provenientes das atividades das lavanderias industriais localizadas no polo de confecções de Caruaru.

Segundo Silva (2023), esses efluentes possuem alta carga orgânica e significativa concentração de corantes, sais e agentes químicos utilizados nos processos de lavagem e tingimento, os quais, mesmo quando lançados de forma aparentemente difusa, exercem impacto direto na qualidade das águas do rio. Além disso, observaram que, devido à ausência de sistemas de tratamento adequados, muitos desses estabelecimentos acabam lançando resíduos diretamente nos corpos hídricos ou em redes de drenagem pluvial, agravando o aporte de cargas poluidoras.

Esse tipo de poluição contribui para alterações físico-químicas expressivas, como aumento da turbidez e alteração do pH, além de gerar efeitos tóxicos à biota aquática, reforçando a necessidade de um controle mais rigoroso por parte do poder público e de ações fiscalizatórias específicas no setor têxtil local.

A contribuição da poluição difusa advém das intensas práticas agrícolas e atividades de construção que levam ao uso inadequado do solo, resultando na remoção da vegetação natural, o que aumenta a susceptibilidade à erosão e, conseqüentemente, o aporte de sedimentos nos corpos hídricos. Esses sedimentos além de reduzem a limpidez da água, prejudicando a fotossíntese aquática, também atuam como “vetores” de outros poluentes, como nutrientes e metais pesados (Costa *et al.*, 2021). Portanto, a sedimentação em excesso pode levar à degradação aquática e à diminuição da diversidade biológica.

Para trabalhar com a poluição difusa em rios, é necessário adotar abordagens integradas que envolvam tanto medidas de controle quanto de prevenção. No âmbito agrícola, práticas de manejo sustentável podem reduzir consideravelmente o transporte de poluentes para curso d'água, como a adoção de sistemas de plantio direto e a implementação de faixas de vegetação ripária, (Mendes; Santos, 2021; BRASIL, 2022). Já em áreas urbanas, a utilização de infraestrutura verde e

pavimentos permeáveis, tem se mostrado eficaz na redução do escoamento superficial, bem como na redução da carga poluente associada (PREFEITURA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, 2024; Palheta, 2023).

Além das medidas práticas, é crucial o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a gestão integrada dos recursos hídricos, com ênfase na prevenção da poluição difusa, considerando que é essencial controlá-la desde a sua origem. Dentre essas medidas estão inclusas a criação de zonas de proteção de mananciais, a regulamentação do uso de agroquímicos e o controle do crescimento urbano (BRASIL, 2022). Outro fator importante está associado a participação da sociedade civil e a conscientização pública para o sucesso das estratégias de mitigação, uma vez que a poluição difusa é um problema que afeta a todos e exige uma resposta coletiva e coordenada. A atuação conjunta de diferentes setores é especialmente necessária na bacia do rio Ipojuca, considerando a diversidade das fontes de poluição e os desafios apontados por estudos que destacam o papel do escoamento superficial e da falta de infraestrutura urbana como agravantes da poluição difusa no município de Caruaru (APAC, 2024; Silva, 2023).

Sucintamente, a poluição difusa em rios representa um desafio significativo para a conservação dos corpos hídricos e a qualidade ambiental. Por ter uma natureza dispersa, com fontes de origem variadas, dificulta sua identificação, assim como seu controle, exigindo abordagens mais integradas. A sociedade, por meio da comunidade em geral, agricultores, gestores públicos e pesquisadores, deve atuar em conjunto a fim de reduzir os impactos desse tipo de poluição e assegurar a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos e a qualidade da água para as futuras gerações.

3.2 Modelos matemáticos aplicados à qualidade da água

As ferramentas de modelagens hidrológicas desempenham um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos, possibilitando a análise e a previsão de impactos ambientais decorrentes de várias fontes de poluição.

Para mensurar poluição difusa, a literatura apresenta diversas ferramentas matemáticas que avaliam a contaminação de corpos d'água provenientes de fontes não pontuais, como o escoamento superficial agrícola e urbano.

Uma das ferramentas amplamente utilizadas é o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela EPA. Ela é utilizada para modelar o escoamento

pluvial urbano e prever a poluição difusa resultante. O SWMM é um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão que permite simular eventos de precipitação e avaliar as concentrações de poluentes em áreas urbanas, auxiliando no planejamento de estratégias de mitigação da poluição difusa (U.S. EPA, 2023).

O Hydrological Simulation Program (HSPF) – FORTRAN é uma ferramenta robusta que permite a modelagem de processos hidrológicos e a avaliação de poluentes em águas superficiais e subterrâneas, auxiliando na gestão integrada de recursos hídricos (U.S. EPA, 2023).

O Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) é uma ferramenta inovadora que integra serviços ecossistêmicos e qualidade da água. Esse modelo ajuda a estimar como diferentes usos do solo podem afetar a poluição da água, sendo eficaz na integração de dados ambientais e sociais para fornecer estimativas de poluição difusa em várias escalas (NATURAL CAPITAL PROJECT, 2025).

Dentre as ferramentas metodológicas adotadas nesta pesquisa, destacam-se o Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água (MQUAL) e o Pollutant Loading Application Overview (PLOAD). Ambas as modelagens foram selecionadas por sua reconhecida capacidade de representar, de forma integrada, as relações entre os usos do solo e a dinâmica da poluição difusa em bacias hidrográficas. Essas ferramentas oferecem suporte analítico à estimativa de cargas poluidoras, subsidiando, assim, o planejamento de estratégias de controle e mitigação dos impactos ambientais (Perin, 2023; KIM *et al.*, 2021).

Essas ferramentas matemáticas contribuem significativamente para a compreensão da poluição difusa e ajudam a medir a poluição difusa e a prever impactos ambientais, contribuindo para a formulação de políticas de gestão ambiental e a proteção dos recursos hídricos.

3.2.1 Modelagem MQUAL

O modelo matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da água - MQUAL, desenvolvido pela Secretaria de Estadual de Meio Ambiente de São Paulo é um módulo de qualidade da água integrado ao modelo hidrológico SWMM (Storm Water Management Model), utilizado para simular a dinâmica de transporte e transformação de poluentes em sistemas de drenagem urbana. Com este modelo é possível avaliar

a concentração de substâncias como metais pesados, nutrientes e sedimentos em corpos hídricos, considerando distintas condições de precipitação, uso do solo e práticas de manejo. De acordo com Costa e Oliveira (2020), o modelo MQUAL possibilita uma análise detalhada da contribuição de fontes de poluição tanto pontuais quanto difusas, sendo uma ferramenta preciosa para o planejamento urbano e a gestão dos sistemas de drenagem.

Vale ressaltar que o MQUAL é constituído de três módulos interrelacionados: Módulo de Geração de Cargas, que calcula as cargas de poluentes geradas em diferentes tipos de uso do solo, como áreas urbanas, rurais e industriais, utilizando coeficientes de exportação específicos; Módulo de Simulação dos Principais Tributários, responsável por simular o transporte das cargas poluentes através dos principais tributários da bacia hidrográfica, considerando a dinâmica hidrológica; e o Módulo de Simulação do Reservatório, que modela a qualidade da água no reservatório, considerando os processos de mistura, sedimentação e transformação dos poluentes.

Como neste trabalho pretende-se calcular o aporte de cargas difusas do Rio Ipojuca, no trecho que corta a cidade de Caruaru, o módulo do MQUAL mais adequado é o Módulo de Geração de Cargas. Esse módulo permite estimar a quantidade de poluentes gerada em diferentes tipos de uso do solo, como áreas rurais, urbanas e industriais, utilizando coeficientes de exportação específicos para cada categoria. Com isto possibilita a quantificação da contribuição de cada tipo de uso do solo para a poluição difusa, oferecendo uma base sólida para a análise dos impactos e o desenvolvimento de estratégias de gestão para mitigação do problema.

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2020), vinculada à Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo, o cálculo da carga difusa utilizando o MQUAL envolve os seguintes passos:

- Identificação do Uso do Solo: Classificação das diferentes áreas na bacia hidrográfica, como urbana, rural, mistas, industriais, comerciais e outras;
- Determinação dos Coeficientes de Exportação: Cada tipo de uso do solo possui um coeficiente de exportação específico (kg/ha/ano) para cada poluente, como fósforo e nitrogênio;
- Estimativa da Carga de Poluentes: A carga difusa (kg/ano) é calculada pela multiplicação do coeficiente de exportação pela área correspondente de cada uso do solo (Equação 1).

$$CD = A * CE \quad (1)$$

Onde:

CD = Carga Difusa (kg/ano);

A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha);

CE = Coeficiente de Exportação (kg/ha/ano).

Esse método permite quantificar a contribuição de diferentes usos do solo na poluição difusa nos corpos d'água, fornecendo subsídios para a gestão integrada dos recursos hídricos.

Dentre as vantagens da modelagem MQUAL destaca-se a sua capacidade de integrar dados hidrológicos e de qualidade da água, oferecendo uma visão abrangente do comportamento dos poluentes em função do tempo e do espaço. Dessa forma, é plausível identificar áreas críticas e simular cenários de intervenções, como a modificação de práticas agrícolas e urbanas, bem como a implantação de bacias de retenção. É importante ressaltar que a aplicação do MQUAL em bacias urbanas e periurbanas tem colaborado significativamente para a tomada de decisões na gestão de recursos hídricos (Almeida *et al.*, 2021).

3.2.2 Modelagem PLOAD

A modelagem PLOAD foi desenvolvida pela empresa de consultoria e engenharia CH2M HILL, essa ferramenta foi inicialmente elaborada para ser utilizada com o software ArcView 3.x e, posteriormente, adaptada para versões mais modernas do ArcGIS. É uma ferramenta computacional que utiliza modelos matemáticos específicos para o cálculo da carga de poluentes em bacias hidrográficas. Este modelo calcula a carga anual de diversos poluentes, como nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos e metais pesados, com base em dados de uso e ocupação do solo, intensidade de chuvas e coeficientes de exportação de poluentes. O PLOAD é especialmente útil para avaliar a contribuição de diferentes fontes de poluição difusa (Silva e Souza, 2021). Segundo Santos *et al.* (2020), a ferramenta PLOAD tem sido amplamente utilizada na elaboração de planos de manejo e programas de monitoramento de bacias hidrográficas.

O PLOAD também é utilizado para calcular cargas difusas de poluentes em bacias hidrográficas, auxiliando na avaliação e gestão da qualidade da água,

especialmente em projetos relacionados ao sistema de permissão de descarga de poluentes em águas pluviais.

O *Pollutant Loading Application Overview* pode ser calculado por dois métodos: Coeficiente de Exportação (EC), que utiliza coeficientes específicos para cada poluente e tipo de uso do solo, sem considerar a precipitação; e Método Simples (EMC), que inclui tanto os coeficientes de exportação quanto a precipitação anual, possibilitando uma estimativa mais precisa da carga poluente.

Por esse motivo, este método foi selecionado para a pesquisa em tela, pois considera a influência direta do escoamento superficial gerado pela precipitação, o que é essencial para uma avaliação mais detalhada da poluição difusa.

De acordo com a EPA (2001), "o modelo PLOAD foi desenvolvido como uma ferramenta de extensão para o software de qualidade da água BASINS." Isto posto o cálculo da poluição difusa através do PLOAD, está representado na Equação 2.

$$CD = A \times EC \times P \times CE \times CP \times 10^{-3} \quad (2)$$

Onde:

CD = Carga Difusa (kg/ano);

A = Área (ha);

EC = Coeficiente de Exportação (kg/ha/ano);

P = Precipitação Anual (mm) = soma das precipitações ao longo do ano;

CE = Coeficiente de Escoamento*;

CP = Concentração de Poluentes (mg/L) = média das concentrações de poluentes.

* O coeficiente de escoamento é uma unidade adimensional, que depende das características do solo, cobertura do solo, inclinação, e outros fatores que influenciam a capacidade do solo de absorver a água da chuva. Ele representa a proporção da precipitação que se transforma em escoamento superficial. O valor varia de 0 a 1, onde:

0: Indica que toda a precipitação é absorvida pelo solo ou evapora (nenhum escoamento superficial).

1: Indica que toda a precipitação contribui para o escoamento superficial (nenhuma infiltração ou evaporação).

Uma das principais qualidades do PLOAD é sua simplicidade e mutabilidade, o que permite seu uso em diferentes cenários, mesmo com disponibilidade restrita de

informações. Essa ferramenta viabiliza a realização de análises comparativas entre diferentes situações de uso do solo e técnicas de manejo, facilitando a identificação de fontes prioritárias de poluição e a elaboração de estratégias de controle mais eficazes. A aplicação do PLOAD em bacias com intensa atividade agrícola e urbana tem sido necessária para a efetivação de medidas de controle de poluição difusa, contribuindo para a melhoria da qualidade da água (Ferreira e Martins, 2022).

3.2.3 Integração das modelagens

Comparando as duas modelagens, é possível identificar que, enquanto Modelo de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água destaca na simulação detalhada da dinâmica de poluentes em sistemas urbanos de drenagem, o *Pollutant Loading Application Overview* apresenta uma visão mais abrangente da carga de poluentes em toda a bacia hidrográfica. Deste modo, a escolha do modelo mais adequado depende dos objetivos do estudo e da disponibilidade dos dados.

Segundo Almeida e Santos (2021), a integração dessas modelagens pode proporcionar uma abordagem mais íntegra e segura para a gestão da qualidade da água, permitindo a identificação precisa das fontes de poluição e, conseqüentemente, a elaboração de estratégias eficazes de controle.

Outrossim, a integração dessas modelagens contribui para a análise dos impactos de variados cenários de uso do solo e das mudanças climáticas na qualidade da água, oferecendo subsídios para políticas públicas mais eficazes e sustentáveis. A utilização conjunta do MQUAL e do PLOAD tem demonstrado potencial em estudos que buscam equilibrar desenvolvimento urbano com a preservação ambiental, especialmente em áreas com rápida expansão urbana e aumento das atividades agrícolas (Santos *et al.*, 2021).

Portando, as modelagens MQUAL e PLOAD são instrumentos relevantes da gestão integrada dos recursos hídricos. O uso dessas ferramentas permite uma compreensão mais detalhada dos processos de poluição difusa, além de apoiar a elaboração de estratégias de mitigação mais efetivas. Com o avanço das tecnologias de geoprocessamento e a melhoria na qualidade dos dados ambientais, espera-se que essas ferramentas se tornem ainda mais precisas e acessíveis, contribuindo para a promoção de um desenvolvimento mais sustentável, bem como a preservação dos recursos hídricos (Ferreira e Martins, 2022).

3.3 Gestão Integrada dos Recursos Hídricos

A Gestão Integrada dos Recursos Hídricos – GIRH é uma metodologia estratégica que busca coordenar o uso e a gestão da água, terra e outros recursos interligados de maneira a otimizar o bem-estar econômico e social sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas (Alves; Pereira, 2021). Esse conceito manifestou-se como uma resposta à crescente demanda por água e aos impactos ambientais causadas pelo uso elevado e desordenado dos recursos hídricos, tornando-se fundamental para a elaboração de políticas públicas e para a gestão eficiente dos sistemas aquáticos.

O fundamental princípio da GIRH é a gestão participativa, colaborativa e descentralizada, envolvendo todos os atores interessados, desde as comunidades locais até o poder público e o setor privado. Conforme apontado por Costa e Silva (2020), essa abordagem busca promover a distribuição igualitária da água e a preservação dos ecossistemas, garantindo que as necessidades atuais sejam supridas sem comprometer a habilidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias demandas. Desta forma, a participação social e o fortalecimento das entidades responsáveis pela gestão dos recursos hídricos são elementos essenciais para o êxito da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos.

Um dos obstáculos enfrentados na implementação da GIRH é a fragmentação institucional, que frequentemente resulta em políticas desarticuladas e conflitantes entre diferentes setores e níveis de governo (Santos *et al.*, 2021). Para superar essa problemática, é necessário um planejamento integrado que considere as interdependências entre os variados usos da água, como o abastecimento urbano, produção de energia, irrigação, navegação e preservação ambiental. Além disso, é essencial a criação de instrumentos de gestão que incentivem a cooperação entre instituições, como os comitês de bacia hidrográfica, que atuam como fóruns de discussão e decisão conjunta (Almeida; Souza, 2021).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433/1997, estabelece os fundamentos da gestão integrada e descentralizada das águas no Brasil, reconhecendo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão. Entre seus princípios, destaca-se o uso múltiplo e sustentável da água, bem como a necessidade de preservação da qualidade dos recursos hídricos. Nesse

contexto, o controle da poluição difusa torna-se um desafio central, especialmente em áreas urbanas e rurais com ocupação desordenada, como ocorre na bacia do Rio Ipojuca. A ausência de mecanismos eficazes de monitoramento e controle dessa forma de poluição compromete os objetivos da PNRH, evidenciando a importância de estudos que busquem estimar e mitigar os impactos das cargas poluidoras difusas sobre os corpos hídricos.

Outro aspecto importante da GIRH é a utilização de mecanismos econômicos e regulatórios que incentivem o uso consciente da água. Entre esses mecanismos, destacam-se a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, que visa promover ao consumo responsável, e o enquadramento dos corpos d'água em categoria de uso, definindo padrões de qualidade compatíveis com os diferentes tipos de utilização (Ferreira; Oliveira, 2020). Esses instrumentos contribuem para a conservação dos recursos hídricos e para a redução dos impactos ambientais, além de gerar recursos financeiros para investimentos em infraestrutura hídrica e ações de preservação.

A integração entre as políticas de gestão de recursos hídricos e as políticas de uso e ocupação do solo também é fundamental para o sucesso da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos. Segundo Lima e Carvalho (2021), o uso inadequado do solo, como o desmatamento, a expansão urbana e a agricultura intensiva, afeta diretamente na disponibilidade e qualidade da água, ocasionando problemas como erosão, assoreamento de rios e contaminação por agrotóxicos. Assim, a gestão integrada requer uma abordagem abrangente que considere a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e que promova práticas de manejo sustentável do solo e da água.

Além dos aspectos técnicos e organizacionais, a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos considera as questões sociais e culturais envolvidas na gestão da água. A equidade no acesso à água e a garantia de sua qualidade para todos são objetivos essenciais dessa abordagem. Para isso, é necessário promover a participação de grupos vulneráveis, como comunidades tradicionais e pequenos agricultores, nos processos de decisão e na implementação de políticas hídricas (Silva; Gomes, 2020). A educação ambiental e a sensibilização da população também são fundamentais para mudar comportamentos e construir uma cultura de uso sustentável da água.

No que se refere a ferramentas e tecnologias, a adoção de sistemas de monitoramento e modelos hidrológicos tem se mostrado uma estratégia eficiente para a GIRH. Essas tecnologias possibilitam o acompanhamento em tempo real das

condições dos corpos hídricos, a previsão de eventos extremos, como inundações e secas, e a avaliação de diferentes cenários de uso e preservação (Costa; Melo, 2021). Com isso, gestores têm à disposição informações precisas e atualizadas para a formulação de planos de gestão e para a resposta rápida a situações de emergência.

Isto posto, a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos constitui um avanço significativo na busca por um modelo de desenvolvimento que respeite os limites ambientais e promova o bem-estar das populações. No entanto, sua implementação eficaz depende de uma série de fatores, como o fortalecimento das instituições, o engajamento social e a articulação entre políticas públicas. Somente com uma abordagem colaborativa e multidisciplinar será possível enfrentar os desafios decorrentes do aumento do consumo da água e das pressões ambientais, promovendo um futuro mais sustentável para os recursos hídricos (Santos *et al.*, 2021).

O Rio Ipojuca, um dos principais cursos d'água de Pernambuco, enfrenta desafios significativos relacionados à poluição, especialmente em trechos urbanos como o município de Caruaru. Estudos recentes destacam que a poluição do rio aumentou consideravelmente nos últimos anos, com impactos diretos na qualidade da água e na saúde pública. Segundo Araújo (2021), as atividades antrópicas, como o lançamento de esgotos domésticos sem tratamento e resíduos industriais, têm comprometido a qualidade das águas do Rio Ipojuca, afetando diretamente as comunidades ribeirinhas e a biodiversidade local. Entre as principais fontes de poluição, destaca-se o lançamento de efluentes oriundos do setor têxtil, especialmente das lavanderias industriais vinculadas ao Arranjo Produtivo Local - APL de confecções de Caruaru, que contribuem com elevada carga orgânica e corantes tóxicos, intensificando a degradação ambiental do rio (Silva, 2023; APAC, 2024).

Além disso, a gestão inadequada dos recursos hídricos na bacia do Rio Ipojuca tem sido objeto de análise em estudos recentes. Nascimento (2023) destaca a necessidade de uma governança mais eficaz, com a implementação de políticas públicas que promovam o uso sustentável da água e a recuperação ambiental da região. O estudo enfatiza a importância da participação social e da integração entre os diversos atores envolvidos na gestão da bacia hidrográfica.

Outra abordagem relevante é apresentada por Soares *et al.* (2023), que analisaram o potencial de reúso de efluentes sanitários tratados na bacia do Rio Ipojuca. Os autores identificaram que o reúso de efluentes pode ser uma alternativa

viável para mitigar a escassez hídrica e reduzir a carga poluidora nos corpos hídricos da região. A pesquisa aponta que, com investimentos adequados em infraestrutura e políticas de incentivo, é possível promover a sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia.

Esses estudos evidenciam a complexidade dos problemas enfrentados pelo Rio Ipojuca e a necessidade de soluções integradas que envolvam aspectos técnicos, sociais e políticos. A poluição do rio não é apenas uma questão ambiental, mas também um desafio para a saúde pública e o desenvolvimento sustentável da região. Portanto, é fundamental que as políticas públicas sejam baseadas em evidências científicas e promovam a participação ativa da sociedade na gestão dos recursos hídricos.

3.4 Legislação e Instrumentos de Planejamento para a Bacia do Rio Ipojuca

A gestão da bacia hidrográfica do rio Ipojuca é respaldada por diversos documentos técnicos e normativos que norteiam ações voltadas à preservação ambiental, ao uso sustentável da água e ao enfrentamento da poluição. Entre os principais instrumentos, destacam-se o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco, o Plano Hidroambiental da Bacia do Rio Ipojuca (PHA-Ipojuca) e o Programa de Saneamento da Bacia do Rio Ipojuca.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) de 2010, instituído pelo Governo de Pernambuco, define diretrizes para a gestão dos recursos hídricos em nível estadual, priorizando a integração entre planejamento territorial e conservação ambiental. Ele identifica áreas críticas quanto à disponibilidade e à qualidade da água, além de propor metas de curto, médio e longo prazo para o uso racional e a recuperação dos mananciais (PERNAMBUCO, 2010).

Já o Plano Hidroambiental da Bacia do Rio Ipojuca, publicado no ano de 2016, elaborado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) em parceria com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca, apresenta um diagnóstico aprofundado da bacia, abordando aspectos como uso e ocupação do solo, qualidade da água, fontes de poluição e vulnerabilidades socioambientais. O documento propõe ações estruturantes e não estruturantes voltadas ao controle da poluição, à recomposição de matas ciliares e à ampliação do saneamento básico (APAC, 2012).

O Programa de Saneamento da Bacia do Rio Ipojuca, por sua vez, vem sendo executado com o objetivo de ampliar a cobertura dos serviços de esgotamento

sanitário, melhorar o tratamento de efluentes e reduzir a carga poluidora nos corpos hídricos da região. A iniciativa é coordenada pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e contempla ações integradas em diversos municípios da bacia, com destaque para as intervenções na cidade de Caruaru, um dos principais centros urbanos da região.

Além desses planos e programas, estudos acadêmicos recentes vêm contribuindo para o aprimoramento da gestão da bacia. Vasconcelos Júnior (2020) analisa a viabilidade da implementação de um sistema de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) no rio Ipojuca, destacando o potencial da ferramenta para promover a conservação dos recursos hídricos e estimular práticas sustentáveis em áreas estratégicas da bacia. Esta pesquisa enfatiza que, além dos ganhos ambientais, o PSA pode fortalecer a articulação entre poder público, produtores rurais e a sociedade civil.

Complementarmente, Nascimento (2023) investigou a percepção dos diferentes atores envolvidos na gestão hídrica sobre a aplicação do PSA na bacia do rio Ipojuca. A autora identificou desafios relacionados à governança e à comunicação entre os entes envolvidos, mas também apontou oportunidades para ampliar a participação social e fortalecer políticas públicas voltadas à conservação da água e do solo na região.

Esses documentos e estudos representam uma base sólida para a construção de políticas públicas voltadas à gestão ambiental da bacia, especialmente diante dos desafios impostos pela poluição difusa e pelas mudanças climáticas. A articulação entre planejamento técnico, instrumentos normativos e participação social é essencial para a efetividade das ações propostas.

A gestão integrada dos recursos hídricos da Bacia do Rio Ipojuca é sustentada por um conjunto de normativas legais que orientam tanto o uso racional da água quanto a recuperação ambiental da região. No âmbito nacional, destaca-se a Lei Federal nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico, estabelece a regulação por parte da ANA e prevê diretrizes para a regionalização dos serviços, promovendo maior articulação entre os entes federativos (BRASIL, 2020). Essa legislação fortalece a governança hídrica ao exigir metas de universalização e qualidade, o que impacta diretamente os municípios inseridos na bacia.

No contexto estadual, a Política Estadual de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 12.984/2005, define os princípios para o planejamento e gestão das águas em

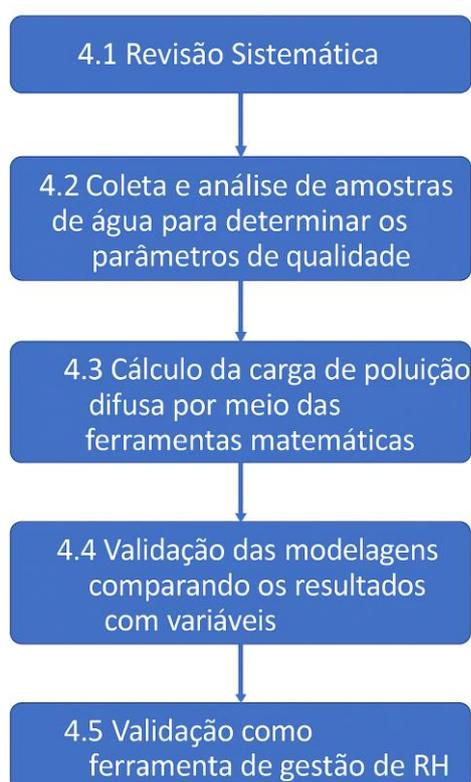
Pernambuco, com ênfase na descentralização e na participação social (PERNAMBUCO, 2005). Esta norma prevê a elaboração dos planos diretores de bacia hidrográfica e a adoção de mecanismos como a outorga e a cobrança pelo uso da água, ambos aplicáveis à Bacia do Ipojuca. Complementando esses instrumentos, a Portaria nº 287/2020 da ANA estabelece condições operacionais específicas para os reservatórios Bitury e Belo Jardim, situados na bacia, visando garantir a regularização de vazões e a segurança hídrica da população (ANA, 2020).

Ademais, o Plano Hidroambiental da Bacia do Rio Ipojuca, elaborado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, identifica zonas críticas de degradação e propõe intervenções estruturantes e não estruturantes para a melhoria da qualidade da água, o que inclui a recomposição vegetal e a expansão do saneamento básico (APAC, 2010). A atuação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca também merece destaque, como instância colegiada responsável pela deliberação sobre o enquadramento dos corpos d'água, aprovação de planos de bacia e articulação entre usuários, poder público e sociedade civil (APAC, 2020). Essas diretrizes são complementadas pela Resolução nº 91/2008 do CNRH, que estabelece critérios para o enquadramento dos corpos hídricos em classes de uso, reforçando a necessidade de monitoramento e controle da qualidade da água (CNRH, 2008).

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi organizada em quatro etapas principais, conforme Figura 1, que se complementam de forma a garantir a consecução dos objetivos propostos.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: A Autora (2025).

A primeira etapa consistiu na revisão sistemática da literatura, com foco na identificação de abordagens metodológicas e ferramentas utilizadas para quantificação da poluição difusa em bacias hidrográficas. Em seguida, foi realizada a aplicação da ferramenta MQUAL para o cálculo da carga de poluição difusa com base no uso e ocupação do solo na bacia do Rio Ipojuca. A terceira etapa correspondeu à aplicação da ferramenta PLOAD, que estimou as cargas poluidoras considerando os dados de precipitação e suas relações com o escoamento superficial. Posteriormente, procedeu-se à análise da qualidade da água por meio da avaliação de variáveis físico-químicas em pontos estratégicos ao longo do Rio Ipojuca. Por fim, foi realizada a validação das modelagens com base na comparação entre os resultados obtidos pelos modelos e os dados observados em campo.

4.1 Área de Estudo

O município de Caruaru, está localizado no agreste de Pernambuco, é um dos principais centros econômicos, culturais e educacionais da região, destacando-se principalmente pelo desenvolvimento do comércio, serviços e indústria. Segundo dados mais recentes do IBGE (2024) a cidade conta com uma população estimada em aproximadamente 377.492 habitantes.

Segundo Climate-Data (2024), a cidade de Caruaru apresenta temperatura média anual de 22,5°C e sua precipitação pode chegar a 540mm. O mês com maior intensidade de calor é março, com temperatura média de 23,8°C, já o mês mais frio é junho, com temperatura média de 20,4°C. O regime de chuvas da região é caracterizado por sua irregularidade e concentração em curtos períodos do ano, típico de áreas de transição entre o agreste e o semiárido nordestino. Essa distribuição sazonal das chuvas, com longos períodos de estiagem intercalados por precipitações intensas, é fundamental para a recarga hídrica local, mas também favorece o carreamento de poluentes para os corpos d'água, contribuindo significativamente para a poluição difusa no Rio Ipojuca, que atravessa o município de Caruaru (APAC, 2024).

Segundo o Instituto Água e Saneamento (2022), o saneamento básico do município ainda enfrenta desafios, pois uma parcela significativa da população não tem acesso adequado ao esgotamento sanitário. A ausência de infraestrutura adequada para a gestão dos resíduos sólidos e o tratamento de esgoto contribui para a poluição dos corpos hídricos da região, incluindo o Rio Ipojuca.

O Rio Ipojuca está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca, localizada totalmente no estado de Pernambuco. A bacia compreende uma área significativa e limita-se ao norte com a Bacia do Rio Capibaribe e o estado da Paraíba, e ao sul com as bacias dos rios Una e Sirinhaém. A oeste, faz limite com as bacias dos rios Ipanema e Moxotó, além do Estado da Paraíba. O rio tem cerca de 320 km de extensão, com seu regime fluvial variando entre intermitente e perene, tornando-se perene a partir do seu médio curso, nas proximidades de Caruaru (CPRH, 2024; APAC, 2024).

De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2012) seus principais afluentes, pela margem direita são riacho Liberal, riacho Taquara e riacho do Mel e, pela margem esquerda, riacho do Coutinho, riacho dos Mocós, riacho do Muxoxo e riacho Pata Choca. O riacho Liberal, seu afluente mais importante, tem suas

nascentes no município de Alagoinha. Drena ao longo dos seus 47km de extensão, áreas dos municípios de Alagoinha, Pesqueira e Sanharó, e deságua no rio Ipojuca.

O rio Ipojuca corta diversos municípios destacando-se: Bezerros, Caruaru, Escada, Chã Grande, Gravatá, Ipojuca, Primavera, São Caetano e Tacaimbó. Sua região costeira, estuário, sofreu mudanças significativas nos últimos anos em decorrência da instalação do Complexo Portuário de Suape.

A Bacia do Rio Ipojuca faz parte da terceira maior bacia hidrográfica de Pernambuco e desempenha um papel fundamental no abastecimento de água e na irrigação agrícola da região. No entanto, o rio enfrenta graves problemas de poluição em razão da influência do uso e ocupação do solo que impacta diretamente na qualidade água, principalmente devido ao lançamento de esgotos, domésticos e industriais (CPRH, 2024).

Figura 2 - Trecho urbano do Rio Ipojuca



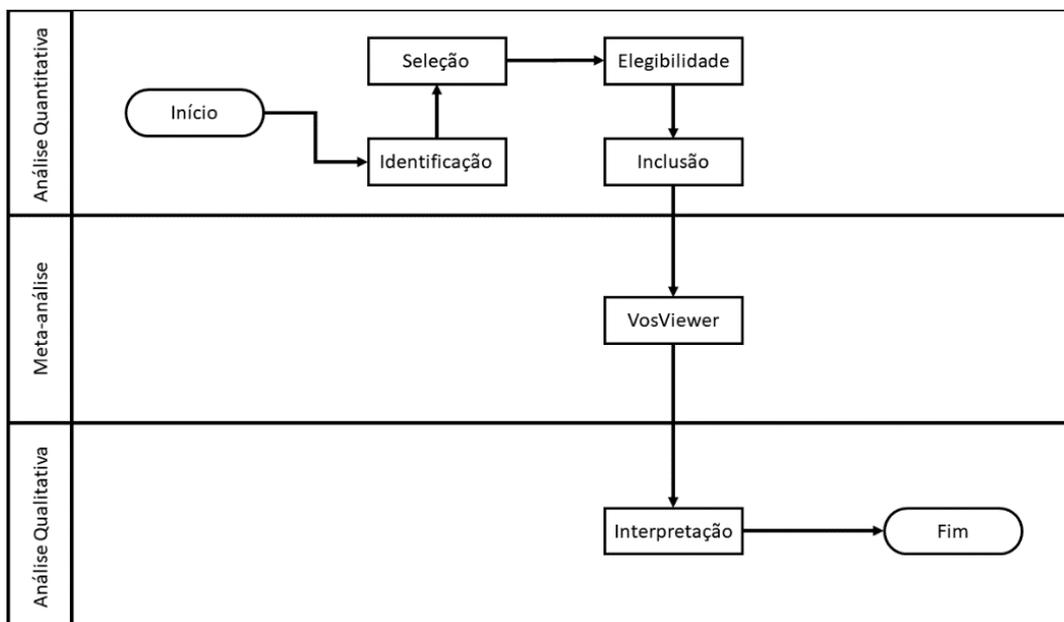
Fonte: Adaptado de G1 (2023). Fotografia de Professor Alexandre Nunes. Disponível em: <https://g1.globo.com/> Acesso em: 29 abril 2023.).

4.2 Revisão Sistemática

Esta pesquisa foi conduzida nas bases de dados Scopus e Web of Science, reconhecidas por reunir periódicos científicos de elevado impacto. Para garantir rigor metodológico e transparência, adotou-se a metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), conforme Moher et al. (2009), para estruturar as etapas da revisão sistemática, desde a seleção de estudos até a análise

final. A Figura 3 elaborada por Aragão (2024) conforme Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), apresenta o fluxograma da revisão sistemática, fundamentado na metodologia PRISMA (Moher *et al.*, 2009). As temáticas abordam Poluição Difusa, as ferramentas MQUAL e PLOAD, Qualidade de água e Gestão Integrada de Recursos Hídricos.

Figura 3 - Fluxograma dos processos da elaboração da revisão sistemática



Fonte: Aragão (2024).

4.2.1 Análise Quantitativa

A etapa de análise quantitativa foi estruturada com base nos princípios da revisão sistemática da literatura. O procedimento adotado consistiu na realização de três buscas independentes, cada uma voltada a um eixo temático específico desta pesquisa: (i) poluição difusa, (ii) aplicação do modelo MQUAL e (iii) aplicação do modelo PLOAD. As buscas foram realizadas de forma separada e não consecutiva, a fim de evitar viés de sobreposição ou dependência entre os conjuntos de resultados. A sistematização dos critérios seguiu as etapas descritas a seguir:

Para os estudos sobre Poluição Difusa:

- **Identificação:** Foram utilizados os termos “*poluição difusa*” como palavra-chave para localizar artigos relacionados ao tema.
- **Seleção:** Para refinar os resultados, foram aplicados filtros que restringiram os artigos ao período de 2020 a 2024, idioma inglês, tipo de documento (artigos) e área de ciências ambientais.

- **Elegibilidade:** Os títulos e resumos dos artigos foram revisados para excluir aqueles que não estavam diretamente relacionados ao tema.
- **Inclusão:** Os artigos selecionados passaram por uma leitura detalhada para inclusão final.

Para os estudos sobre MQUAL:

- **Identificação:** As palavras-chave “*mqual*”, “*uso e ocupação do solo*” foram usadas para buscar publicações pertinentes ao tema.
- **Seleção:** Os resultados foram filtrados por ano de publicação (2020-2024), idioma (inglês), tipo de documento (artigos) e área de estudo (ciências ambientais).
- **Elegibilidade:** Os títulos e resumos foram avaliados para eliminar trabalhos sem relação direta com o foco da pesquisa.
- **Inclusão:** Os artigos que atendiam aos critérios foram lidos integralmente para a inclusão final.

Para os estudos sobre PLOAD:

- **Identificação:** O termo “*pload*” fora utilizado na busca por artigos sobre o tema.
- **Seleção:** Aplicaram-se filtros para restringir os artigos ao período de 2020 a 2024, em língua inglesa, tipo de documento (artigos) e na área de ciências ambientais.
- **Elegibilidade:** Os títulos e resumos foram revisados para excluir documentos que não estavam diretamente relacionados ao tema.
- **Inclusão:** Os artigos selecionados foram lidos na íntegra para inclusão na análise.

O conjunto final de 24 artigos elegíveis apresentado na seção de resultados foi obtido a partir da soma dos artigos selecionados nas três buscas independentes, com a devida verificação para eliminar duplicidades entre os eixos temáticos.

4.2.2 Meta-Análise

Após a tabulação dos dados dos artigos selecionados, foi possível identificar informações como autores, resumos, anos de publicação e países de origem. Com o auxílio do software VOSviewer, os dados foram analisados, e mapas de rede bibliométricos foram criados.

4.2.3 Análise Qualitativa

As redes bibliométricas permitiram avaliar a relevância de cada artigo e as relações entre os diferentes estudos. A partir dessas redes, foi possível mapear os autores, seus países de origem e as conexões potenciais entre os trabalhos, proporcionando uma visão clara das interações e contribuições acadêmicas no campo estudado.

4.3 Coleta e análise de amostras de água para determinar os parâmetros de qualidade

Para atingir ao segundo objetivo específico foi realizado o mapeamento das categorias de uso e ocupação do solo (áreas urbanas e rurais) conforme Plano Diretor de Caruaru do ano de 2024.

4.3.1 Classificação das áreas quanto o uso e ocupação do solo

A partir desse mapeamento, delimitaram-se seis pontos estratégicos ao longo do trecho do Rio Ipojuca que atravessa o município, os quais foram utilizados como referência para a análise da poluição difusa, conforme representado no Quadro 1 e Figura 4.

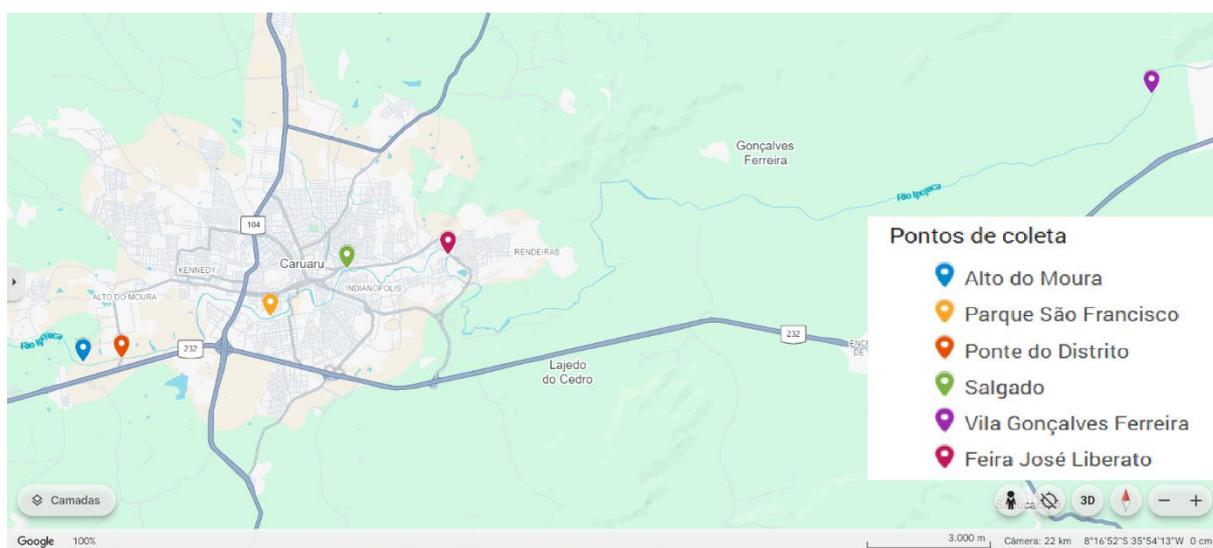
Quadro 1 - Classificação da Fonte no MQUAL para o Rio Ipojuca no trecho que corta o município de Caruaru

Categoria de Uso do Solo	Descrição	Pontos de Coleta
Área urbana	Áreas de residências, comerciais e industriais	Parque São Francisco (Ponte do Cano)
		Salgado (Ponte Irmã Jerônima)
		Feira José Liberato
		Alto o Moura (Antigo Matadouro)
Área Rural	Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira
		Ponte do Distrito

Fonte: A Autora (2025).

Para facilitar a compreensão da localização desses pontos ao longo do trecho urbano do Rio Ipojuca, foi elaborado um mapa com base em imagens do Google Maps. A Figura 4 apresenta a disposição espacial dos pontos de amostragem, permitindo visualizar a área de estudo em relação ao entorno do Rio Ipojuca no trecho que corta o município de Caruaru.

Figura 4 - Mapeamento dos pontos de coleta – Rio Ipojuca



Fonte: A Autora (2025).

Após o mapeamento dos pontos, foram realizadas duas campanhas de coleta de água para análise da qualidade. A primeira ocorreu em 24 de maio de 2024, sob condições climáticas chuvosas, e a segunda em 16 de janeiro de 2025, sob tempo seco, sem ocorrência de precipitação.

As coletas foram executadas nas margens dos cursos d'água, considerando o acesso e segurança dos locais. Portanto não foi registrada profundidade, uma vez que os pontos estavam localizados em áreas rasas. Nas Figuras 5 a 16 é possível visualizar o percurso do Rio Ipojuca ao longo do município de Caruaru.

Figura 5 – Parque São Francisco (Ponte do Cano) período chuvoso: 24/05/2024



Fonte: A Autora (2025).

Figura 6 - Parque São Francisco (Ponte do Cano) período seco: 17/01/2025



Fonte: A Autora (2025).

Figura 7 - Salgado (Ponte Irmã Jerônima) período chuvoso:
24/05/2024



Fonte: A Autora (2025).

Figura 8 - Salgado (Ponte Irmã Jerônima) período seco:
17/01/2025



Fonte: A Autora (2025).

Figura 9 - Feira José Liberato período chuvoso:
24/05/2024



Fonte: A Autora (2025).

Figura 10 - Feira José Liberato período seco:
17/01/2025



Fonte: A Autora (2025).

Figura 11 - Alto do Moura (Antigo Matadouro) período chuvoso:
24/05/2024



Fonte: A Autora (2025).

Figura 12 - Alto do Moura (Antigo Matadouro) período seco:
17/01/2025



Fonte: A Autora (2025).

Figura 13 - Vila Gonçalves Ferreira período chuvoso:
24/05/2024



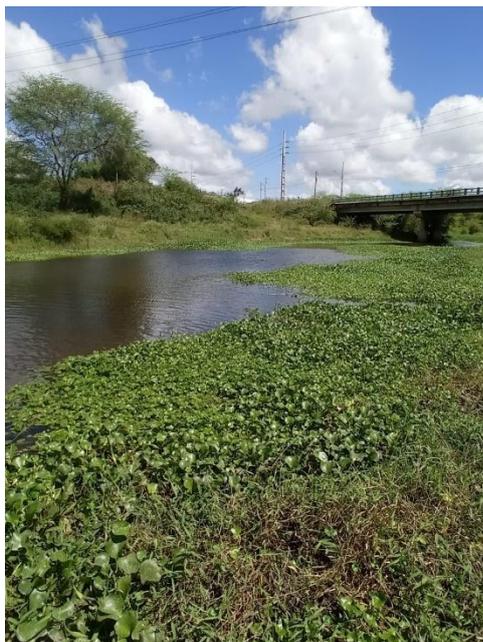
Fonte: A Autora (2025).

Figura 14 - Vila Gonçalves Ferreira período seco:
17/01/2025



Fonte: A Autora (2025).

Figura 15 - Ponte do Distrito período chuvoso:
24/05/2024



Fonte: A Autora (2025).

Figura 16 - Ponte do Distrito período seco:
17/01/2025



Fonte: A Autora (2025).

Foram avaliados os seguintes parâmetros: coliformes totais, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total, nitrogênio total, oxigênio dissolvido, pH, temperatura e turbidez.

As análises in loco dos parâmetros físico-químicos (pH, oxigênio dissolvido, temperatura e condutividade elétrica) foram realizadas por meio de sonda multiparamétrica portátil. Já as análises laboratoriais seguiram os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA *et al.*, 2017) e foram conduzidas pelo laboratório ECO CARUARU, com métodos reconhecidos para monitoramento de corpos hídricos.

4.3.2 Coleta e Análise de Amostras de Água para Avaliação da Poluição Difusa no Rio Ipojuca

Ainda com o propósito de alcançar o segundo objetivo, foram realizadas coletas de amostras de água nos 6 pontos apresentados no Quadro 1 e Figura 4 do Rio Ipojuca, no trecho que corta o município de Caruaru. Essas amostras coletadas com a finalidade de alimentar os dados para o cálculo da poluição difusa através das ferramentas MQUAL e PLOAD. Os parâmetros estudados nesta pesquisa são: análise de concentrações de coliformes totais, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total, nitrogênio total, oxigênio dissolvido, pH, temperatura e turbidez. Esses dados são fundamentais para calibrar e validar os modelos, garantindo maior precisão na estimativa de cargas poluidoras e na simulação dos impactos do uso e ocupação do solo sobre a qualidade da água.

Para efetivação da pesquisa foram realizadas duas amostras, uma em período chuvoso no mês de maio e outra em período seco, no mês de janeiro. A primeira coleta foi realizada no dia 24 de maio de 2024, durante a coleta houve baixo episódio de precipitação. A segunda, realizada no dia 16 de janeiro de 2025, não houve precipitação. Os dados, obtidos diretamente do rio, foram utilizados para calcular a carga poluente difusa, que possibilitará uma avaliação precisa das condições de qualidade da água.

4.4 Cálculo da carga de poluição difusa por meio das ferramentas matemáticas

Para atingir o terceiro objetivo específico desta pesquisa, foram adotados dois Modelos matemáticos, o MQUAL e o PLOAD.

O modelo de Correlação de Uso e Ocupação do Solo e a Qualidade da Água – MQUAL, foi aplicado nesta pesquisa para estimar o potencial de carga poluidora de origem difusa em um corpo hídrico, neste caso o Rio Ipojuca, com base no uso e ocupação do solo determinado pelo plano diretor do município, volume de precipitação e carga de poluente. Seu principal objetivo é avaliar como os diversos tipos de uso e ocupação do solo contribuem para a qualidade da água.

Neste modelo foram utilizados dados de características de ocupação do solo e suas variações, bem como o tipo de cobertura, esses dados permitiram simular a carga difusa através de planilhas desenvolvidas em Excel.

A poluição investigada nesta pesquisa foi do tipo difusa. Para isso, o estudo foi estruturado nas seguintes etapas: classificação das áreas quanto o uso e ocupação do solo, coleta e análise de amostras de água para determinar os parâmetros de qualidade e desenvolvimento da modelagem do MQUAL para calcular a carga difusa associada a cada tipo de uso do solo.

Vale destacar que neste estudo, foi realizada a coleta de amostras de água diretamente do Rio Ipojuca, com o objetivo de mensurar e analisar parâmetros como fósforo, nitrogênio (principais concentrações para o cálculo da poluição difusa) e outros elementos químicos presentes.

O resultado das amostras coletadas do rio permite o cálculo preciso da carga real de poluentes no rio, evitando a dependência de dados prontos ou modelos baseados na literatura. O uso de dados coletados em campo garante uma avaliação mais precisa das condições atuais do corpo hídrico, proporcionando uma fonte confiável para futuras ações de gestão ambiental e mitigação de impactos.

4.4.1 Desenvolvimento da modelagem do MQUAL para calcular a carga difusa associada a cada tipo de uso do solo

Para simular a carga de poluição difusa utilizando o conceito do MQUAL, foi elaborada uma planilha no Excel com o objetivo de calcular a carga difusa de poluentes, baseada nas concentrações medidas em cada ponto de coleta de água. Essa abordagem permite uma análise detalhada e específica das contribuições poluentes em cada local amostrado, facilitando a avaliação dos impactos ambientais e a identificação das principais fontes de poluição na bacia hidrográfica.

Conforme apresentado no Apêndice B, foi desenvolvida uma adaptação do modelo MQUAL em uma planilha eletrônica, permitindo a obtenção da carga difusa para cada fonte classificada, levando em consideração os dados obtidos diretamente das amostras coletadas no rio. Vale ressaltar que o cálculo da poluição difusa deve seguir os parâmetros descritos na Equação 1, garantindo a precisão e a aplicabilidade dos resultados para cada ponto de coleta analisado.

Considerando que os dados aplicados nesta pesquisa, advém da coleta de amostras de água do Rio Ipojuca, será necessário transformar as concentrações encontradas dos poluentes em cargas para entender o impacto real no rio. Para calcular a carga de cada concentração (fósforo, nitrogênio, DBO, sólidos suspensos e coliformes totais), utilizou-se a fórmula que multiplica a concentração dos poluentes pela vazão do rio.

Além disso, para determinar a carga anual de poluentes, multiplicou-se o resultado pelo tempo em que o fluxo de poluentes ocorre, o qual foi estimado em 31.536.000 segundos, correspondentes a um ano.

Portanto, a carga foi obtida por meio da seguinte Equação 3:

$$CARGA (kg/ano) = C (mg/L) \times V (m^3/s) \times T (s/ano) \times 10^{-6} \quad (3)$$

Onde:

C = concentração apresentada na coleta para os parâmetros de fósforo, nitrogênio, DBO, sólidos suspensos e coliformes totais;

V = vazão do rio;

T = número de segundo no ano

Essa abordagem fornecerá uma avaliação mais precisa da carga total de poluentes transportada pelo rio ao longo de um ano, permitindo uma análise detalhada do impacto ambiental.

A área total da classe proposta foi calculada conforme o plano diretor de acordo com o zonamento dos pontos.

4.4.2 Desenvolvimento da modelagem do PLOAD para calcular a carga difusa associada a precipitação

Ainda em atendimento ao terceiro objetivo específico desta pesquisa foi adotado o potencial de carga poluidora, ou seja, poluição difusa, considerando a capacidade

de geração dos poluentes com a precipitação, *Pollutant Loading Application Overview* – PLOAD.

Utilizada para estimar a carga poluente de origem difusa, o PLOAD, também combina dados de uso e ocupação do solo com precipitação, a fim de calcular a quantidade de poluentes que são transportados pela chuva até o corpo hídrico. Os principais poluentes transportados pela precipitação, que têm impacto direto na poluição analisada nesta pesquisa, são o fósforo e o nitrogênio.

Conforme apresentado na Apêndice C, foi desenvolvida uma adaptação do modelo PLOAD em uma planilha eletrônica, permitindo a obtenção da carga difusa para cada fonte classificada, levando em consideração os dados obtidos diretamente das amostras coletadas no rio. Vale ressaltar que na metodologia PLOAD foram considerados apenas fósforo total e nitrogênio total.

Foi considerado a Equação 2 para o cálculo da CD através do PLOAD.

$$CD = A \times EC \times P \times CE \times CP \times 10^{-3} \quad (2)$$

Onde:

CD = Carga Difusa (kg/ano);

A = Área (ha);

EC = Coeficiente de Exportação (kg/ha/ano);

P = Precipitação Anual (mm) = soma das precipitações ao longo do ano;

CE = Coeficiente de Escoamento*;

CP = Concentração de Poluentes (mg/L) = média das concentrações de poluentes.

* O coeficiente de escoamento é uma unidade adimensional, que depende das características do solo, cobertura do solo, inclinação, e outros fatores que influenciam a capacidade do solo de absorver a água da chuva. Ele representa a proporção da precipitação que se transforma em escoamento superficial. O valor varia de 0 a 1, onde:

0: Indica que toda a precipitação é absorvida pelo solo ou evapora (nenhum escoamento superficial).

1: Indica que toda a precipitação contribui para o escoamento superficial (nenhuma infiltração ou evaporação).

4.5 Validação das modelagens MQUAL e PLOAD com parâmetros observados de qualidade da água

Para atender ao terceiro objetivo específico, que consiste em validar os resultados obtidos pelos modelos MQUAL e PLOAD, foi realizada uma análise comparativa das variáveis de qualidade da água coletadas em campo, como temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, pH e turbidez, com os valores simulados pelos modelos. Essas variáveis são fundamentais para verificar a precisão dos cálculos de poluição difusa. A concordância entre os dados observados e os resultados modelados indica a eficácia dos modelos em representar a realidade do Rio Ipojuca quanto a poluição não pontual do tipo difusa.

4.6 Avaliação da aplicabilidade dos modelos como ferramenta de gestão

Com o intuito de atender ao quinto objetivo específico, foi conduzida uma avaliação integrada sobre a aplicabilidade prática das modelagens MQUAL e PLOAD como ferramentas de suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia do Rio Ipojuca. Essa etapa consistiu em analisar criticamente os resultados gerados, considerando aspectos como a facilidade de aplicação dos modelos no contexto local, a adequação dos dados disponíveis, a capacidade de resposta das simulações às condições hidrológicas regionais e a capacidade das ferramentas em identificar áreas críticas de aporte de poluição difusa.

Durante a análise, buscou-se compreender não apenas a performance técnica dos modelos, mas também suas limitações práticas, como as dificuldades enfrentadas no processo de calibração, a dependência de dados regionais detalhados e a necessidade de ajustes metodológicos (simplificação das categorias de uso e ocupação do solo - agregando-as em classes mais amplas, como áreas urbanas e rurais) para melhor representar a realidade local. Além disso, foi avaliada a utilidade das informações geradas para subsidiar decisões estratégicas de gestão, destacando como os resultados das simulações podem orientar ações prioritárias, tais como intervenções em áreas vulneráveis, melhorias no sistema de drenagem urbana e a adoção de práticas agrícolas conservacionistas.

Por fim, foram elaboradas recomendações para o uso futuro dessas ferramentas pelos órgãos gestores locais reforçando a importância da atualização periódica de

bancos de dados e da integração das modelagens a outros instrumentos já utilizados no planejamento e monitoramento ambiental.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Bibliométrica

Em atendimento aos objetivos específicos desta pesquisa, esta seção apresenta os resultados obtidos por meio da revisão sistemática da literatura, com ênfase na identificação, organização e análise das principais contribuições científicas relacionadas à quantificação da poluição difusa por meio de ferramentas matemáticas. A análise bibliométrica realizada fundamenta-se em dados extraídos de bases de elevado impacto, e tem como propósito subsidiar, com evidências consolidadas, a aplicação dos modelos MQUAL e PLOAD na bacia do Rio Ipojuca. Os artigos selecionados oferecem uma visão abrangente e atualizada sobre os métodos de estimativa de cargas poluidoras não pontuais, abordando distintas realidades geográficas, enfoques metodológicos e ferramentas computacionais, permitindo, assim, ampliar a compreensão sobre a aplicabilidade e as limitações dessas modelagens em diferentes contextos hidrológicos.

A quantificação dos artigos obtidos em cada etapa do processo de revisão sistemática resultou nos seguintes números:

- Identificação: 1.584 artigos
- Seleção: 766 artigos
- Elegibilidade: 24 artigos

As pesquisas apresentadas no Apêndice D fornecem informações de forma sucinta referente as observações extraídas a partir de 24 trabalhos que discutem sobre o tema proposto nesta pesquisa. O Apêndice D apresenta perspectivas de diferentes países, evidenciando tantos padrões variados quanto divergências importantes, destacando as abordagens específicas adotadas para lidar com essa questão de grande relevância.

Dentre as pesquisas analisadas observou-se que Yan *et al.* (2021) e Zeiger *et al.* (2021), foram exploradas a modelagem de escoamento e o transporte de poluentes em bacias hidrográficas urbanas e rurais, utilizando, respectivamente, as ferramentas PCSWMM e SWAT, com a finalidade de avaliar o uso do solo e os impactos hidrológicos. As duas pesquisas demonstram a importância de considerar características específicas do uso e da cobertura do solo quando não é possível obter

parâmetros de estudo, sendo esta uma abordagem fundamental para a melhoria da precisão dos modelos.

Ainda, enquanto Yan *et al.* (2021) focam no impacto de superfícies urbanas impermeáveis sobre o escoamento e poluentes em áreas urbanizadas de Calgary, Zeiger *et al.* (2021) abordam os desafios únicos da hidrologia em Bacias Cársticas no centro dos Estados Unidos, onde o transporte rápido de emissões ocorre devido às características geológicas.

A semelhança entre os estudos é o uso de modelagens matemáticas como ferramentas de previsão para o planejamento e gestão hídrica. Essas descobertas são relevantes para a esta pesquisa, pois além de evidenciar a necessidade de adaptar modelos hidrológicos às condições específicas de cobertura do solo, afetam a melhoria da previsão do comportamento hidrológico e do planejamento de intervenções ambientais.

O estudo de Nura Bello *et al.* (2024) foca na utilização do Water Quality Analyser – WQA (Analisador de Qualidade da Água) para estimar cargas poluentes em rios tropicais, demonstrando sua eficiência no cálculo de cargas diárias e na projeção de metas de redução de carga (LRT). Já a pesquisa de Thomas Service *et al.* (2024) utiliza um índice topográfico de solos (STI) e modelos baseados em LiDAR para identificar áreas hidrologicamente sensíveis (HSAs) no gerenciamento de poluição difusa em larga escala. Por outro lado, Markert *et al.* (2024) explora a relação entre o uso do solo e concentrações de micropoluentes em bacias hidrográficas urbanas e agrícolas, destacando a importância de dados espaciais detalhados para a identificação de fontes de poluição.

Embora todos os estudos visem o controle da poluição difusa, suas abordagens variam em termos de escala e especificidade. O trabalho de Bello *et al.* (2024) é mais operacional, concentrando-se em estimativas de carga e metas regulatórias para substâncias específicas, enquanto Service *et al.* (2024) oferece uma perspectiva de planejamento com mapas de risco para a implementação de medidas preventivas em nível nacional.

Markert *et al.* (2024), por sua vez, enfatiza a necessidade de gerenciamento diferenciado para fontes pontuais e difusas, com base em padrões de uso do solo e práticas agrícolas.

Esses estudos são complementares à pesquisa sobre poluição difusa, pois ilustram como diferentes ferramentas matemáticas (como WQA e STI) e abordagens

de modelagem podem ser integradas para estimar e reduzir cargas poluentes, enquanto o uso de PLOAD poderia fornecer um cálculo adicional para cargas de nutrientes e sedimentos em áreas urbanas e agrícolas.

A interseção de métodos inovadores, como o LiDAR e análise espacial detalhada, reforça a importância de abordagens integradas para a gestão eficiente de recursos hídricos.

A poluição difusa em bacias hidrográficas representa um desafio crescente para a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos. A modelagem matemática emerge como uma ferramenta essencial para avaliar os impactos dessa poluição e auxiliar na tomada de decisões para a gestão dos recursos hídricos.

Os estudos de Rosa *et al.* (2024) e Alamdari *et al.* (2022) exemplificam a aplicação do modelo SWMM em diferentes contextos, destacando a importância da infraestrutura verde e dos cenários climáticos futuros, respectivamente. Embora ambos os estudos tenham utilizado o mesmo modelo base, as diferenças nas configurações e nos dados de entrada apresentaram resultados distintos, evidenciando a necessidade de uma cuidadosa seleção dos parâmetros e a importância de considerar as especificidades de cada bacia hidrográfica.

É fundamental reconhecer que os modelos matemáticos possuem limitações e incertezas, relacionadas principalmente à qualidade dos dados de entrada e às simplificações dos processos hidrológicos. No entanto, os resultados obtidos nesses estudos demonstram o potencial da modelagem matemática para auxiliar na previsão de cenários futuros e na avaliação da eficácia de diferentes medidas de controle da poluição difusa.

A crescente urbanização e as mudanças climáticas têm intensificado os problemas relacionados à qualidade da água em bacias hidrográficas urbanas. A poluição difusa, proveniente de diversas fontes como escoamento superficial e descarte inadequado de resíduos, representa um desafio significativo para a gestão ambiental.

Os resultados dos estudos de Jang *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2023) reforçam a necessidade de implementar medidas de controle da poluição difusa em bacias urbanas, como a implantação de sistemas de drenagem sustentável, a recuperação de áreas verdes e o controle da erosão do solo. Além disso, a modelagem matemática pode ser utilizada como ferramenta de apoio para o planejamento e a avaliação da eficácia dessas medidas.

Os estudos de Lencha *et al.* (2022) utilizaram modelos como PLOAD, SWAT e FLUX32 para mapear as fontes de poluição no Lago Hawassa. Os resultados indicam que as atividades agrícolas e urbanas são as principais responsáveis pela contaminação da água, especialmente durante períodos de chuvas intensas. Essa informação é fundamental para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de gestão ambiental na região.

A intensidade das chuvas exerce um papel crucial no aumento da poluição difusa, como demonstrado nos estudos de Lencha *et al.* (2022) e Tawan *et al.* (2020). Eventos de precipitação intensa promovem um aumento significativo no transporte de sedimentos em suspensão (TSS) e nutrientes, como o nitrogênio, a partir de áreas agrícolas e urbanas para os corpos d'água receptores.

Modelos hidrológicos como SWAT e PLOAD são ferramentas indispensáveis para simular e quantificar essas dinâmicas complexas, contribuindo para a compreensão dos processos de degradação da qualidade da água e o desenvolvimento de estratégias de gestão mais eficientes.

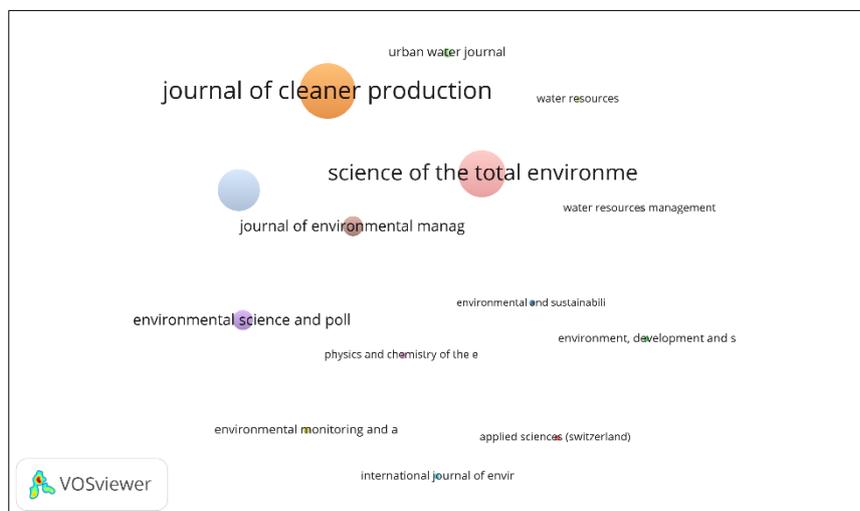
Carvalho *et al.* (2022) revelaram que as chuvas intensas são as principais responsáveis por aumentar a poluição nos rios próximos às cidades. A pesquisa mostrou que a quantidade de partículas sólidas e a demanda por oxigênio na água aumentam significativamente durante as enchentes. Esses resultados são importantes para o desenvolvimento de estratégias para controlar a poluição e proteger os recursos hídricos.

Duan *et al.* (2023), por sua vez, destacaram a importância da erosão orgânica como fonte de poluição em áreas florestais, fornecendo informações valiosas para a gestão de hídrica em bacias.

Como complemento a análise qualitativa e quantitativa realizada, a etapa bibliométrica também permitiu a visualização da distribuição e relevância dos trabalhos científicos que embasam esta pesquisa. Para ilustrar essa conexão e destacar a distribuição das referências bibliográficas utilizadas a Figura 17 demonstra a amplitude do número de citações em periódicos, evidenciando uma variação de 1-48 citações em jornais. Além disso, também não se formaram redes de ligação entre os estudos. O diâmetro do círculo representa uma maior quantidade de citações que o documento recebeu. As informações extraídas dessa revisão sistemática foram fundamentais para nortear a seleção das ferramentas de modelagem (MQUAL e PLOAD), além de embasar metodologicamente as etapas de aplicação e validação,

assegurando que a pesquisa estivesse alinhada às melhores práticas e tendências apontadas na literatura internacional.

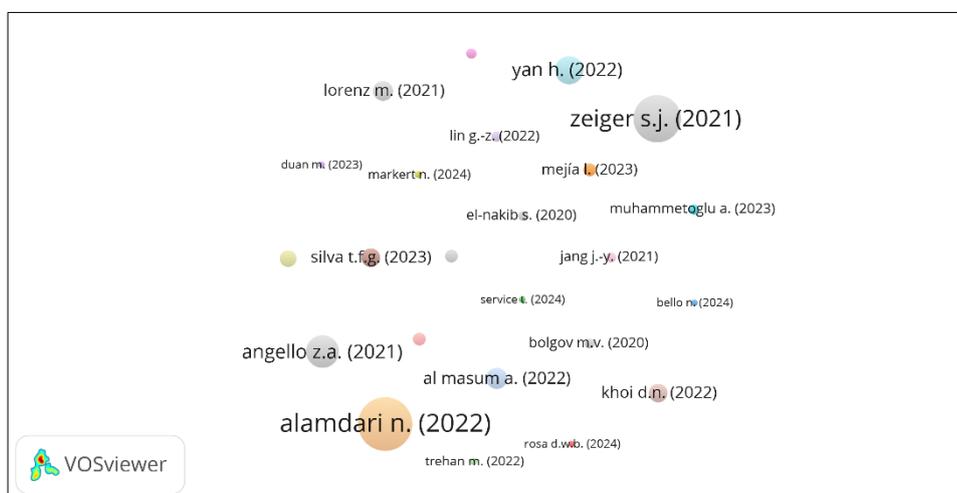
Figura 17 - Citação por documento



Fonte: A Autora (2025).

É possível observar também, na Figura 18, que os trabalhos de Zeiger *et al.* (2021) e Alamdari *et al.* (2022) foram os mais citados, com respectivamente 38 e 48 menções. Os dados exportados do software VOSviewer, mostram que os autores não apresentam nenhuma conexão entre si.

Figura 18 – Citações por autores

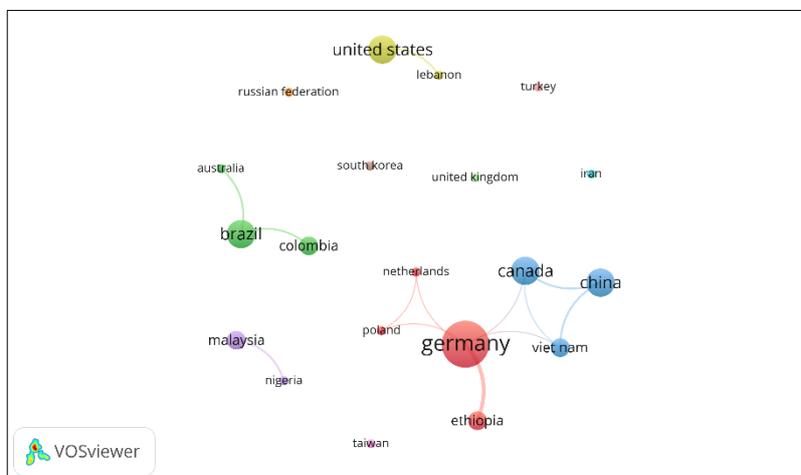


Fonte: A Autora (2025).

Na Figura 19, a atenção se volta para os países de análise dos artigos. Os círculos coloridos representam a quantidade de documentos publicados por instituições de cada nação. Nota-se uma relação proporcional, onde o aumento no diâmetro dos círculos corresponde a um maior número de artigos publicados no país

correspondente. As linhas que conectam os círculos simbolizam as colaborações entre autores de diferentes países. Destacam-se como as nações com maior número de publicações: Alemanha, e Canadá. Por outro lado, os países que acumularam mais solicitações foram: Estados Unidos (88), Etiópia (23).

Figura 19 – Publicações por Países



Fonte: A Autora (2025).

5.2 Análise da Qualidade da Água: Variações dos Parâmetros nos Diferentes Pontos de Amostragem do Rio Ipojuca

Com o intuito de atender ao segundo objetivo específico desta pesquisa, foi realizada a análise espacial da qualidade da água no trecho do Rio Ipojuca que atravessa o município de Caruaru. Essa etapa teve como foco avaliar as variações nos parâmetros de qualidade da água em diferentes pontos de amostragem, considerando dois períodos distintos: o chuvoso (maio de 2024) e o seco (janeiro de 2025). A comparação entre esses momentos permitiu identificar os efeitos da sazonalidade sobre as concentrações de poluentes, especialmente o fósforo total e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que se destacaram como indicadores sensíveis da influência da poluição difusa. Os resultados apresentados nas Figuras 5 a 16 fornecem subsídios relevantes para compreender os padrões espaciais e temporais de contaminação na bacia, refletindo a influência do uso e ocupação do solo sobre a dinâmica da qualidade da água.

Para facilitar a análise comparativa entre os diferentes períodos climáticos, os resultados das amostragens realizadas no período chuvoso de maio de 2024 estão apresentados nas Figuras 20 a 25.

Cada figura representa os parâmetros físico-químicos e microbiológicos obtidos nos seis pontos de coleta ao longo do Rio Ipojuca no trecho que corta o município de Caruaru, permitindo uma avaliação detalhada dos efeitos da sazonalidade sobre a qualidade da água.

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos no ponto de amostragem localizado na Ponte do Distrito, durante o período chuvoso. Os valores observados para fósforo total (3,50 mg/L) e DBO (3,00 mg/L) indicam uma condição de qualidade da água comprometida. O fósforo total excede significativamente o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios em áreas agrícolas (0,1 mg/L), caracterizando um alto potencial de eutrofização. Já a DBO, embora dentro do limite máximo permitido para corpos d'água de classe 2 (5 mg/L), situa-se em uma faixa que sugere carga orgânica moderada. Esses indicadores refletem a influência de fontes difusas e práticas agropecuárias na bacia, características típicas de áreas semirurais.

A influência do uso do solo na exportação de nutrientes, especialmente em áreas com menor grau de urbanização, é amplamente reconhecida na literatura. Segundo Yan *et al.* (2021), o uso agrícola e a presença de áreas permeáveis tendem a contribuir para a carga difusa de poluentes durante eventos de chuva, ainda que em menor intensidade do que zonas urbanas densas. A condutividade elétrica apresentou-se estável, indicando baixa interferência de despejos orgânicos pontuais ou esgotos concentrados nesse ponto, refletindo uma condição hidrológica de maior diluição sazonal.

Figura 20 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte do Distrito (maio 2024)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024
Ponte do Distrito	Condutividade Elétrica 20 °C	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.400,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	3,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,50
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	9,80
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	5,98
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,07
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	22,90
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	2.163,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

A Figura 21 refere-se ao ponto Alto do Moura, onde se observou elevação nos níveis de DBO e turbidez, valores que ultrapassam os limites recomendados para corpos d'água de classe 2 segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, possivelmente associada ao escoamento superficial de áreas urbanizadas com drenagem deficiente. A concentração de fósforo total foi intermediária, indicando influência tanto de resíduos urbanos quanto da ausência de infraestrutura sanitária adequada. Segundo Costa, Carvalho e Koide (2021), rios urbanos em regiões tropicais sofrem aumentos significativos na DBO e turbidez devido à lavagem de resíduos orgânicos acumulados durante episódios de chuva intensa.

Figura 21 - Resultado da coleta no ponto localizado no Alto do Moura (maio 2024)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024
Alto o Moura (Antigo Matadouro)	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.120,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	3,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,10
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	12,80
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	7,47
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,09
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	22,50
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	436,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Além disso, Yan *et al.* (2021) reforçam que a combinação entre ocupação urbana e ausência de saneamento básico resulta em aumento da carga poluidora durante a estação chuvosa.

A Figura 22 apresenta os dados do Parque São Francisco (Ponte do Cano), onde foi registrada elevação na turbidez e no fósforo total. Esse comportamento está relacionado ao escoamento pluvial proveniente de áreas impermeáveis. Tawan *et al.* (2020) destacam que, em áreas urbanas, a precipitação intensa causa aumento significativo da carga de sedimentos e de nutrientes.

Figura 22 - Resultado da coleta no ponto localizado no Parque São Francisco (maio 2024)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024
Parque São Francisco (Ponte do Cano)	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.100,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	3,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,80
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	14,70
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	8,88
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,28
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	24,00
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	155,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

A ausência de infraestrutura de esgoto adequada favorece o transporte de resíduos para o rio. Segundo Carvalho, Costa e Koide (2022), essa condição é típica de bacias urbanas brasileiras onde há lançamento irregular de esgoto e resíduos sólidos.

A Figura 23 apresenta os resultados obtidos no ponto correspondente à Feira José Liberato, local de intensa atividade comercial em Caruaru. Os dados indicam condições críticas de qualidade da água durante o período chuvoso, com elevação expressiva nos níveis de DBO, fósforo total e turbidez. Esse comportamento pode ser atribuído ao escoamento superficial carregando resíduos orgânicos acumulados nas áreas não pavimentadas da feira livre, que ficam expostos entre os eventos de precipitação. Segundo Dutta, Torres e Vojinovic (2021), a ocorrência de chuvas intensas em áreas urbanas comercialmente adensadas intensifica o transporte de resíduos orgânicos e nutrientes para os corpos hídricos, elevando significativamente os níveis de DBO e turbidez.

Figura 23 - Resultado da coleta no ponto localizado na Feira José Liberado (maio 2024)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024
Feira José Liberado	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.040,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	9,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	2,60
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	19,00
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	6,42
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,28
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	24,10
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	760,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

A Figura 24 demonstra que a região do bairro Salgado, onde está localizado o ponto de coleta da Ponte Irmã Jerônima, sofre forte influência de poluição urbana difusa. A DBO elevada e o OD reduzido indicam presença significativa de matéria orgânica, provavelmente vinda de ligações clandestinas ou lançamentos superficiais. Segundo Carvalho, Costa e Koide (2022), esse é um dos efeitos mais comuns em trechos urbanos sem rede de coleta e tratamento de esgoto. Yan *et al.* (2021) também enfatizam que a urbanização densa sem saneamento adequado gera fluxos de poluentes intensificados durante a estação chuvosa.

Figura 24 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte Irmã Jerônima (maio 2024)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024
Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.470,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	37,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	13,90
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	29,70
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	6,41
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,24
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	22,60
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	1.071,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Os resultados obtidos no ponto Vila Gonçalves Ferreira, conforme demonstrado na Figura 25, durante o período chuvoso, revelam forte influência de poluição difusa de origem urbana. A alta turbidez indica o arraste de partículas sólidas e sedimentos pelo escoamento superficial, típico de áreas com solo exposto e deficiente sistema de drenagem. A elevada concentração de DBO reflete o aporte de matéria orgânica, proveniente do carreamento de resíduos domésticos e detritos orgânicos acumulados nas vias públicas. O fósforo total e o nitrogênio total, ambos em níveis bastante acima do limite de quantificação, reforçam a presença de nutrientes oriundos de esgotos não tratados, dejetos animais e resíduos sólidos urbanos. Esses elementos caracterizam fontes difusas de poluição, intensificadas durante eventos de precipitação, e apontam para a ausência ou ineficiência de infraestrutura sanitária e controle ambiental adequados na bacia hidrográfica.

Figura 25 - Resultado da coleta no ponto localizado na Vila Gonçalves Ferreira (maio 2024)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024
Vila Gonçalves Ferreira	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	1.950,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	4,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,50
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	21,90
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	10,85
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,28
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	21,30
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	405,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

A análise dos dados laboratoriais obtidos na coleta de janeiro de 2025 (período seco) revelou valores mais elevados de fósforo total e de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em comparação ao período chuvoso de maio de 2024, em todos os pontos analisados da bacia do Rio Ipojuca, os resultados das análises podem ser conferidos conforme Figuras 26 a 31. Essa tendência é compatível com o comportamento típico de corpos hídricos urbanos e periurbanos durante períodos de estiagem prolongada.

A Figura 26 apresenta os resultados do ponto de coleta do Alto do Moura em período seco. A persistência de valores elevados de fósforo total e DBO, mesmo sem precipitação, aponta para fontes contínuas de poluição, como esgoto doméstico e resíduos orgânicos dispostos em solo urbano não impermeabilizado. A baixa vazão do rio contribui para a concentração desses poluentes. Segundo Carvalho, Costa e Koide (2022), em bacias urbanizadas, a ausência de chuvas não impede a manutenção de altas cargas difusas, especialmente quando há lançamentos diretos de esgoto e acúmulo de resíduos sólidos nas margens dos rios. Para melhor visualização da evolução desses parâmetros.

O Gráfico 1 ilustra a variação entre os períodos seco (2025) e chuvoso (2024), evidenciando que, embora haja redução de turbidez e nitrogênio total no tempo seco, a concentração de DBO e fósforo total permanece crítica, reforçando o caráter da

Figura 26 - Resultado da coleta no ponto localizado no Alto do Moura (janeiro 2025)

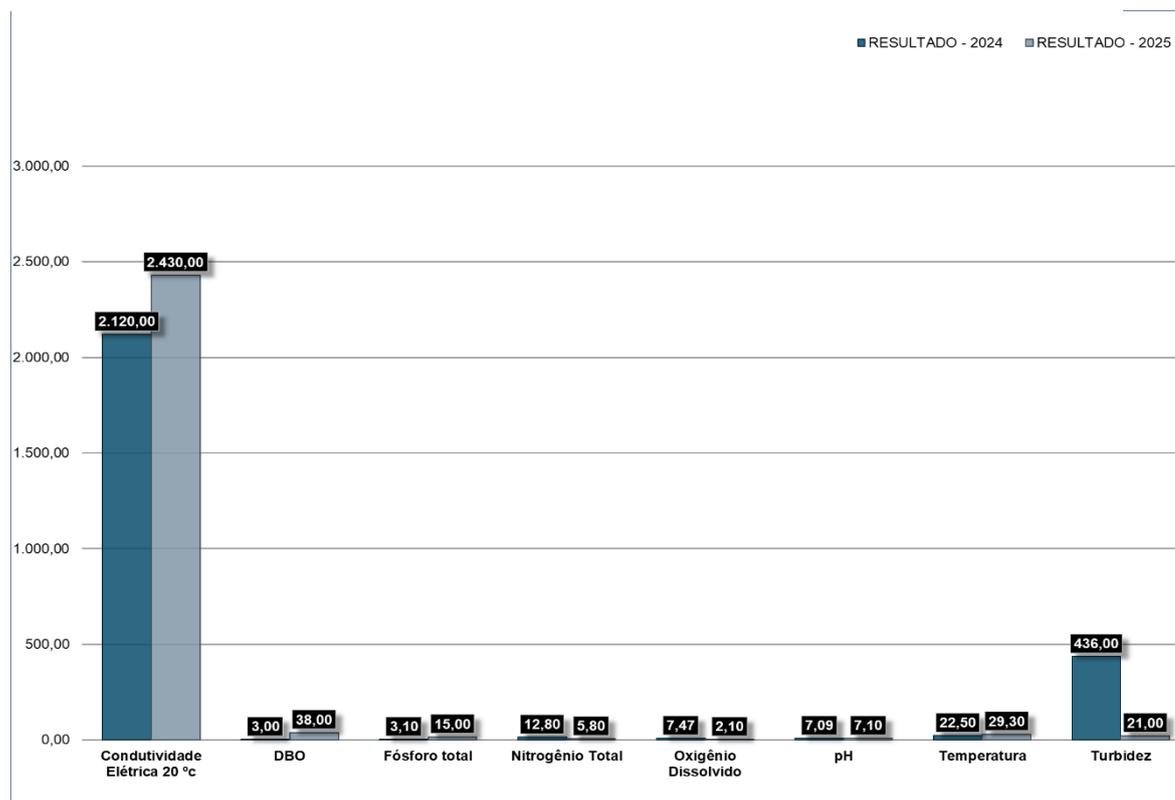
PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024	RESULTADO - 2025
Alto o Moura (Antigo Matadouro)	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.120,00	2.430,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	3,00	38,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,10	15,00
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	12,80	5,80
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	7,47	2,10
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,09	7,10
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	22,50	29,30
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	436,00	21,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

poluição nesse ponto de coleta.

Fonte: A Autora (2025).

Gráfico 1 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no ponto Alto do Moura entre períodos seco (2025) e chuvoso (2024)



Fonte: A Autora (2025).

A Figura 27, referente à Ponte do Distrito Industrial, evidencia elevação nos níveis de fósforo total durante o período seco. Embora a turbidez tenha diminuído, a concentração de íons dissolvidos se manteve elevada, sugerindo lixiviação de solos agrícolas e liberação de compostos acumulados nos sedimentos. Rosa *et al.* (2024) destacam que, em regiões com uso misto do solo, há recorrente liberação de nutrientes mesmo sem precipitação, especialmente durante períodos prolongados de estiagem.

Conforme o Gráfico 2, é possível observar com clareza a variação dos principais parâmetros de qualidade da água entre os períodos chuvoso e seco, destacando que, embora haja redução de turbidez e nitrogênio total, indicadores críticos como DBO e fósforo total apresentaram crescimento acentuado no tempo seco, o que reforça a hipótese de fontes contínuas de poluição difusa na região da Ponte do Distrito.

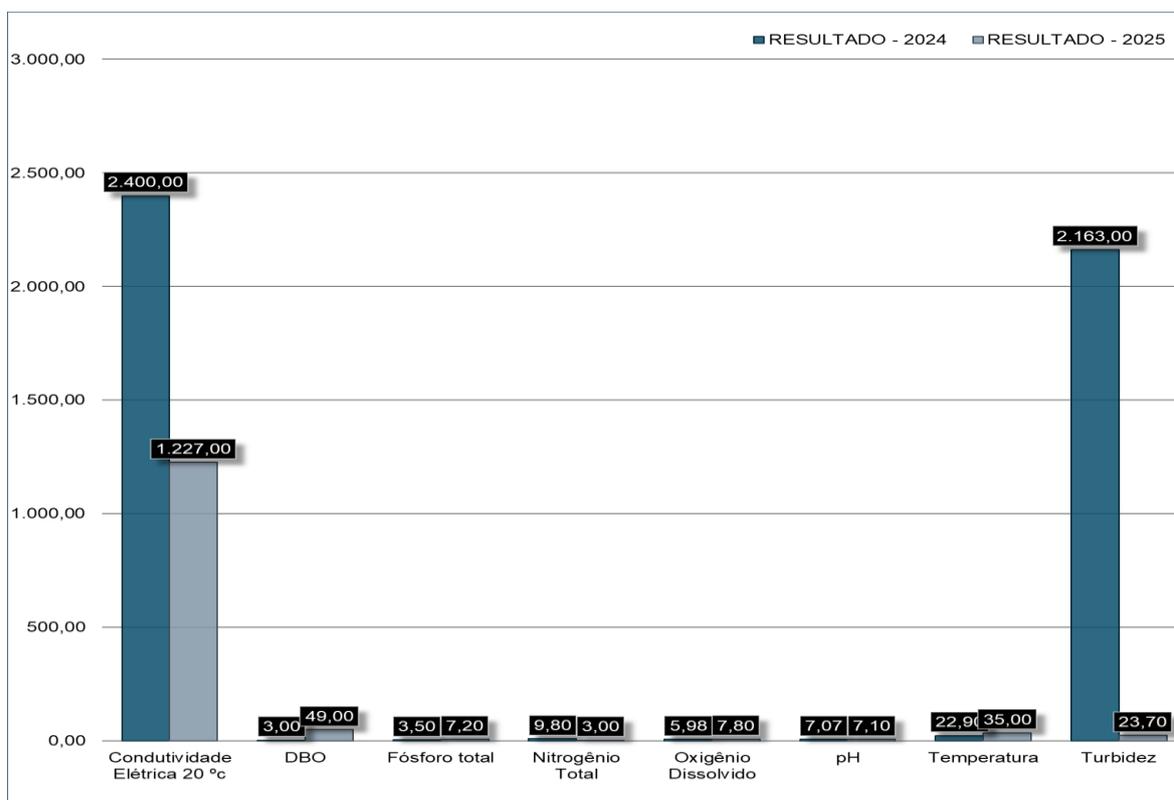
Figura 27 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte do Distrito Industrial (janeiro 2025)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024	RESULTADO - 2025
Ponte do Distrito	Condutividade Elétrica 20 °C	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.400,00	1.227,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	3,00	49,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,50	7,20
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	9,80	3,00
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	5,98	7,80
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,07	7,10
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	22,90	35,00
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	2.163,00	23,70

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Gráfico 2 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no ponto Ponte do Distrito entre períodos seco (2025) e chuvoso (2024)



Fonte: A Autora (2025).

Na Figura 28, observou-se, no ponto da Ponte do Cano, um padrão de qualidade da água deteriorado, com alta DBO e fósforo total. A redução na vazão acentua a influência de esgotos urbanos, resultando em menor oxigenação e aumento

da matéria orgânica. Alamdari *et al.* (2022) apontam que a ausência de infraestrutura sanitária adequada em áreas urbanas densas agrava a concentração de poluentes em períodos secos, quando a autodepuração é limitada pela baixa fluidez do corpo hídrico.

Conforme o Gráfico 03, é possível visualizar a comparação dos parâmetros entre os anos de 2024 (chuvoso) e 2025 (seco). Embora a turbidez e a condutividade elétrica tenham diminuído significativamente, o aumento expressivo nos valores de DBO, fósforo total e nitrogênio total evidencia a permanência de fontes contínuas de poluição orgânica. A queda brusca no oxigênio dissolvido reforça o quadro de degradação acentuada da qualidade da água, incompatível com ambientes que demandam condições mínimas para a vida aquática. Esses dados indicam a ação de fontes difusas, com destaque para o lançamento direto de efluentes sem tratamento.

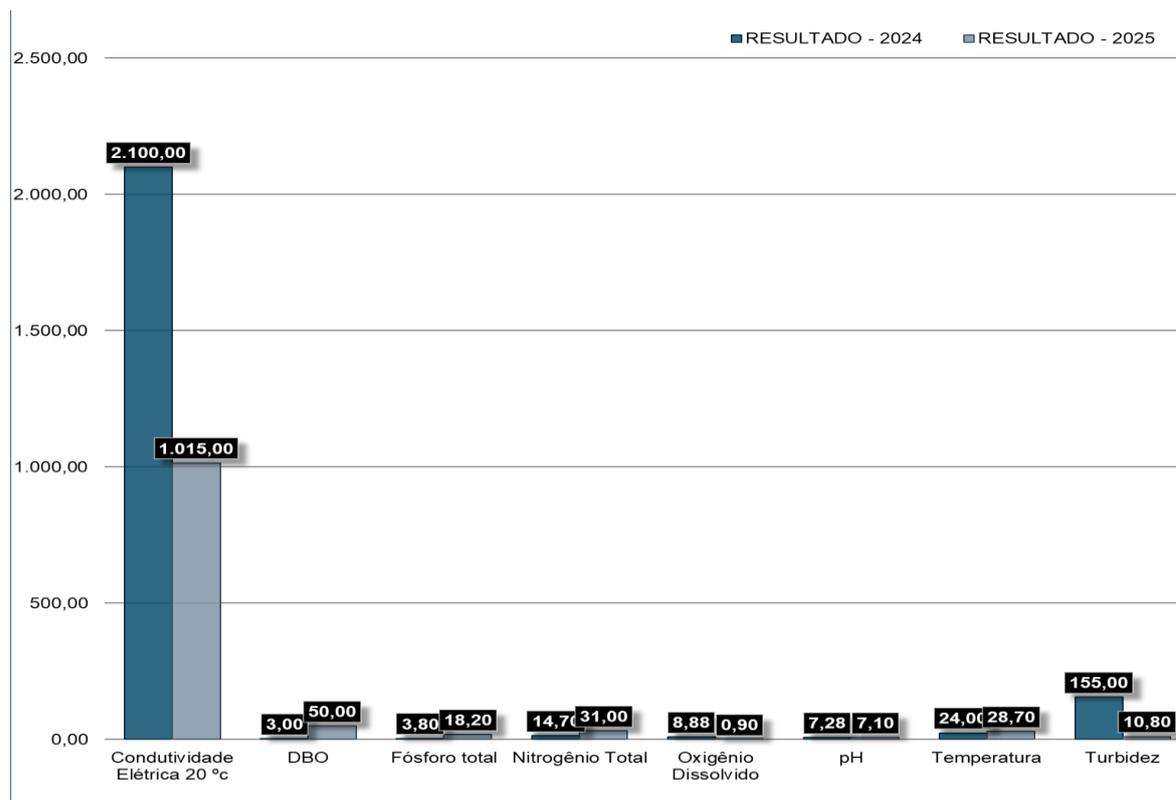
Figura 28 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte São Francisco (janeiro 2025)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024	RESULTADO - 2025
Parque São Francisco (Ponte do Cano)	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.100,00	1.015,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	3,00	50,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,80	18,20
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	14,70	31,00
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	8,88	0,90
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,28	7,10
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	24,00	28,70
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	155,00	10,80

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Gráfico 3 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no ponto Ponte do Cano entre períodos seco (2025) e chuvoso (2024)



Fonte: A Autora (2025)

A Figura 29 mostra que o ponto da amostra coletada na Ponte Irmã Jerônima, no bairro Salgado, apresentou os piores indicadores do período seco, com DBO elevada e OD quase nulo, sinalizando acúmulo de matéria orgânica e atividade bacteriana intensa. A concentração elevada de fósforo total reforça a hipótese de contribuição de fontes contínuas e de processos de ressuspensão do sedimento. Segundo Kozak e Fernandes (2022), a ação de micro-organismos nos sedimentos contaminados, associada à baixa vazão, favorece a liberação de nutrientes ao meio aquático mesmo sem eventos pluviais.

Conforme o Gráfico 4, é possível observar a acentuada piora nos parâmetros de qualidade da água durante o período seco, com destaque para o aumento expressivo da DBO e a drástica redução do oxigênio dissolvido. A concentração de fósforo total também aumentou significativamente, enquanto os níveis de nitrogênio total atingiram 42,00 mg/L, o mais alto entre todos os pontos analisados. Esses resultados reforçam o cenário crítico da Ponte Irmã Jerônima, evidenciando a presença de fontes contínuas de poluição orgânica e elevada carga de nutrientes, mesmo sem chuvas, o que está associado à liberação de contaminantes dos sedimentos e ausência de tratamento adequado de esgotos na região.

Figura 29 - Resultado da coleta no ponto localizado na Ponte Irmã Jerônima (janeiro 2025)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024	RESULTADO - 2025
Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.470,00	2.590,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	37,00	112,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	13,90	22,00
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	29,70	42,00
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	6,41	0,80
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,24	7,00
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	22,60	30,20
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	1.071,00	55,20

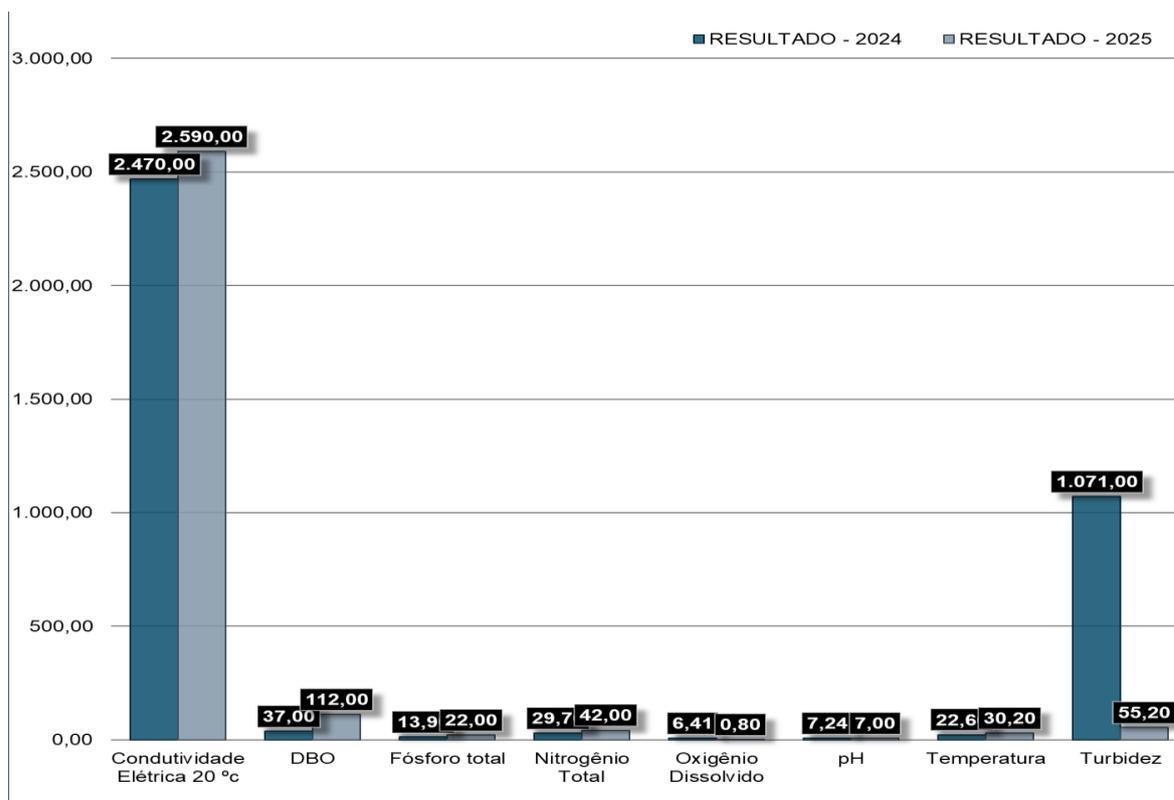
Legenda:

VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.

SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Gráfico 4 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no ponto Ponte Irmã Jerônima entre períodos seco (2025) e chuvoso (2024)



Fonte: A Autora (2025).

Na Figura 30, os dados do ponto da Feira José Liberato indicam redução da turbidez, mas persistência de altos níveis de DBO e fósforo total. Isso sugere que, embora o arraste superficial tenha cessado, os aportes de esgoto e resíduos sólidos

permanecem ativos. De acordo com Silva *et al.* (2023), centros comerciais urbanos com infraestrutura sanitária insuficiente mantêm cargas poluidoras constantes, agravadas pela impermeabilização e má gestão dos resíduos.

Conforme o Gráfico 5, é possível observar que, embora a turbidez tenha sofrido uma redução significativa, os níveis de DBO e fósforo total permaneceram elevados durante o período seco. A queda no oxigênio dissolvido, reforça a hipótese de acúmulo de matéria orgânica e atividade bacteriana intensa, típica de ambientes com lançamentos contínuos de esgoto doméstico. A presença de concentrações elevadas de nitrogênio total também aponta para a influência de resíduos orgânicos urbanos, frequentemente encontrados em áreas com feiras livres e comércio informal.

Esses resultados confirmam que, mesmo na ausência de escoamento superficial, a Feira José Liberato mantém fontes ativas de poluição difusa, refletindo a precariedade da infraestrutura sanitária e a má gestão dos resíduos sólidos no entorno.

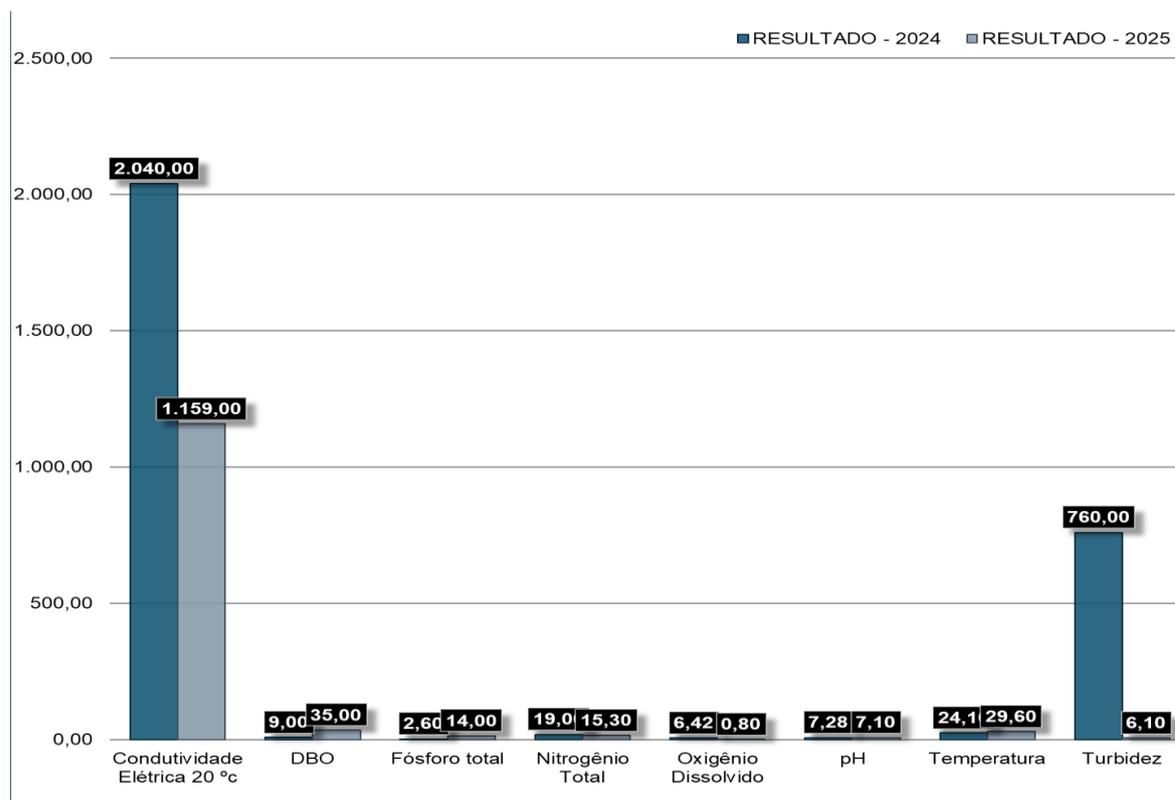
Figura 30 - Resultado da coleta no ponto localizado na Feira Liberato (janeiro 2025)

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024	RESULTADO - 2025
Feira José Liberato	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	2.040,00	1.159,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	9,00	35,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	2,60	14,00
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	19,00	15,30
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	6,42	0,80
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,28	7,10
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	24,10	29,60
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	760,00	6,10

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Gráfico 5 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no ponto Feira José Liberato entre períodos seco (2025) e chuvoso (2024)



Fonte: A Autora (2025).

A Figura 31 revela que o ponto da Vila Gonçalves Ferreira apresentou os maiores níveis de DBO e fósforo total no período seco. No entanto, a condutividade elétrica foi menor, reforçando ainda que concentração de sais dissolvidos oriundos de áreas agrícolas e de solo exposto. Segundo Tawan *et al.* (2020), o uso do solo exerce influência direta na concentração de poluentes difusos, mesmo em áreas de menor adensamento urbano, especialmente quando há deficiência de cobertura vegetal e práticas de manejo inadequadas.

Conforme o Gráfico 06, observa-se que, embora a condutividade elétrica tenha diminuído os valores de DBO e fósforo total permaneceram elevados no período seco, indicando a persistência de fontes orgânicas ativas no entorno da Vila Gonçalves Ferreira. A turbidez, por sua vez, sofreu forte redução, sugerindo que o escoamento superficial com partículas em suspensão foi interrompido, mas os aportes contínuos de nutrientes e matéria orgânica mantiveram a qualidade da água comprometida.

A queda significativa no oxigênio dissolvido reforça a presença de processos de decomposição e elevada atividade bacteriana, típicas de ambientes impactados por lançamentos de esgoto e resíduos não tratados.

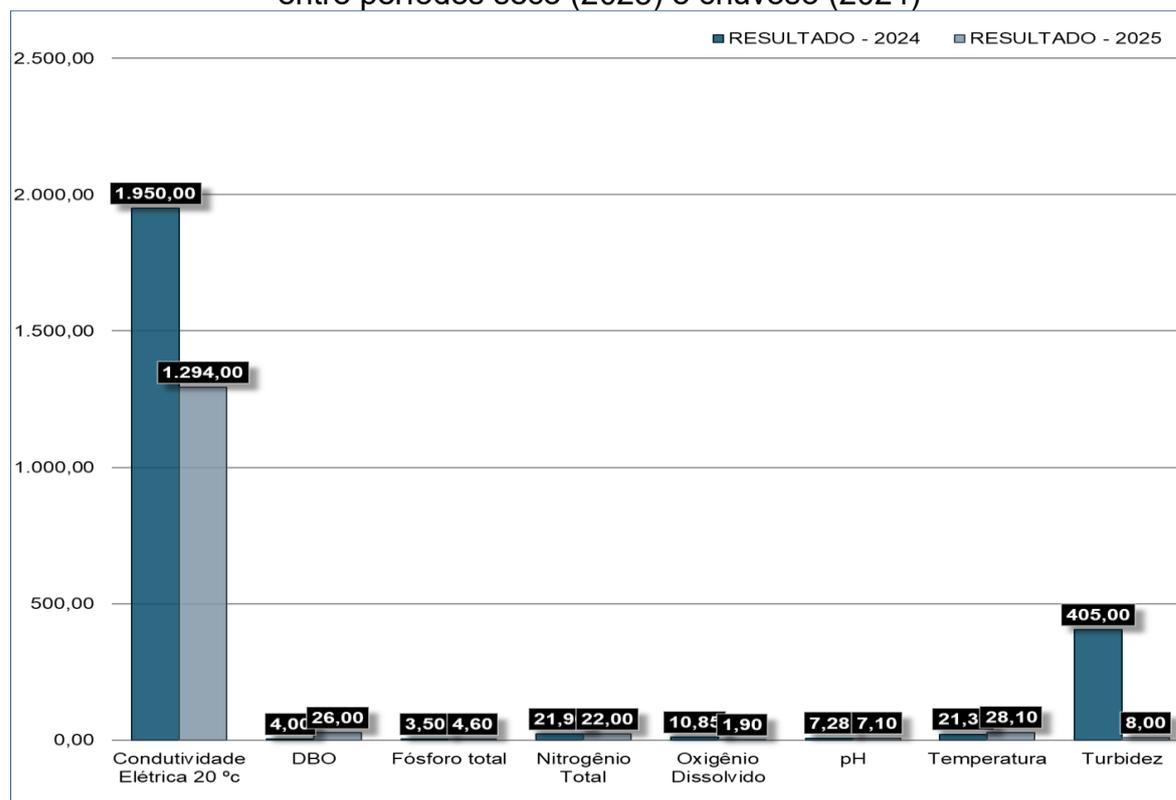
Figura 31 -

PONTO	PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	V. M. P.	L. Q.	RESULTADO - 2024	RESULTADO - 2025
Vila Gonçalves Ferreira	Condutividade Elétrica 20 °c	SMEWW - 2510 B	us/Cm	s/ especificação	2,00	1.950,00	1.294,00
	DBO	SMEWW - 5210 B	mg/L	s/ especificação	3,00	4,00	26,00
	Fósforo total	SMEWW - 4500 - P - D	mg/L	s/ especificação	0,03	3,50	4,60
	Nitrogênio Total	SMEWW - 4500 - N - C	mg/L	s/ especificação	0,30	21,90	22,00
	Oxigênio Dissolvido	SMEWW - 4500 - O - C	mg/L	s/ especificação	0,01	10,85	1,90
	pH	SMEWW - 4500 - H+ B	-	s/ especificação	0,40	7,28	7,10
	Temperatura	SMEWW - 2550 B	° C	s/ especificação	-15,00	21,30	28,10
	Turbidez	SMEWW - 2130 - B	UT	s/ especificação	0,15	405,00	8,00

Legenda:
VMP : Valor Máximo Permissível ; N.D = Não Detectado; < L.Q. = Menor que o Limite de Quantificação.
SMEWW - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition, 2017.

Fonte: A Autora (2025).

Gráfico 6 - Variação dos parâmetros de qualidade da água no ponto Vila Gonçalves entre períodos seco (2025) e chuvoso (2024)



Fonte: A Autora (2025).

Diante do resultado das análises, percebe-se que a elevação do fósforo total no período seco está associada à redução da vazão do rio, o que implica em menor capacidade de diluição dos poluentes lançados diretamente no corpo hídrico. Com a diminuição do volume de água, mesmo cargas constantes de esgoto doméstico e agrícola passam a representar uma fração mais significativa na composição da água, aumentando as concentrações de nutrientes dissolvidos. Segundo Almeida e Souza (2021), o fósforo, proveniente de detergentes, fezes humanas, resíduos de alimentos e fertilizantes, tende a se acumular, sobretudo em trechos com pouca renovação hídrica. Esse fenômeno é agravado pela liberação interna de fósforo dos sedimentos, comum em condições de baixa oxigenação e altas temperaturas.

A DBO, por sua vez, representa a quantidade de oxigênio necessária para a degradação da matéria orgânica presente na água por microrganismos aeróbios. No período seco, os cursos d'água recebem a mesma carga orgânica, mas com menos água disponível para diluição, resultando em valores elevados de DBO. Além disso, a decomposição da matéria orgânica ocorre de forma mais acentuada, devido à maior temperatura e ao menor fluxo hídrico, o que intensifica o consumo de oxigênio dissolvido. Essa condição foi observada com clareza nos pontos Ponte São Francisco, Ponte Irmã Jerônima e Feira José Liberato, cujos valores de DBO em janeiro de 2025 ultrapassaram 30 mg/L — significativamente superior aos valores médios registrados na estação chuvosa de 2024.

Esses padrões reforçam o papel crítico da estação seca como agravante da qualidade da água em bacias urbanizadas, sobretudo na ausência de infraestrutura sanitária e de mecanismos de contenção e tratamento dos esgotos. Conforme apontado por Perin (2023), a gestão dos recursos hídricos deve incorporar estratégias específicas para os períodos de estiagem, considerando a tendência de acúmulo e concentração de poluentes em cursos d'água de baixa vazão.

A análise microbiológica realizada nas duas coletas de campo revelou a presença crítica de coliformes totais em todos os pontos de amostragem, tanto no período chuvoso (maio de 2024) quanto no período seco (janeiro de 2025). Em ambos os períodos, os valores excederam em várias ordens de grandeza o limite máximo permitido para classes de águas doces destinadas ao abastecimento humano após tratamento convencional, conforme estabelece a Resolução CONAMA nº 357/2005.

No período chuvoso de maio de 2024, os valores variaram entre $2,1 \times 10^{11}$ NMP/100 mL (Alto do Moura) e $2,9 \times 10^{12}$ NMP/100 mL (Ponte São Francisco), com

destaque para os pontos urbanos, como Ponte Irmã Jerônima e Feira José Liberato, que registraram $1,1 \times 10^{13}$ NMP/100 mL.

No período seco, os valores permaneceram igualmente elevados, mantendo a mesma ordem de magnitude, o que evidencia descargas contínuas de esgotos domésticos não tratados ao longo da bacia. Em janeiro de 2025, os dados laboratoriais indicaram concentração de coliformes totais da ordem de $1,1 \times 10^{13}$ NMP/100 mL em diversos pontos como Vila Gonçalves Ferreira e Feira José Liberato.

A persistência dessas elevadas concentrações em ambos os períodos reforça a crítica situação sanitária da bacia, indicando ausência de tratamento eficaz de esgoto doméstico e escoamento direto para o rio. Esse cenário compromete não apenas a qualidade da água para uso humano, mas também a integridade ecológica do ecossistema aquático.

5.3 Estimativa do Potencial de Carga Poluidora através de Modelos Matemáticos de Qualidade de Água

Os resultados obtidos nesta pesquisa, utilizando as ferramentas MQUAL e PLOAD, forneceram uma visão detalhada dos diferentes tipos de uso do solo, e como a intensidade das chuvas influencia na poluição difusa do Rio Ipojuca.

A partir da aplicação do MQUAL, foi possível identificar que as áreas urbanas, especialmente aquelas com maior densidade populacional e atividades comerciais, apresentem maiores coeficientes de exportação para poluentes como fósforo e demanda bioquímica de oxigênio, em períodos de estiagem.

A aplicação do modelo MQUAL na estimativa da carga difusa de poluentes na bacia do Rio Ipojuca proporcionou uma análise detalhada das contribuições de diferentes usos do solo para os parâmetros de fósforo total, nitrogênio total e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Os resultados obtidos demonstraram que as áreas urbanas, caracterizadas por alta impermeabilização e ausência de infraestrutura de saneamento, foram as principais fontes de poluição difusa, especialmente durante o período chuvoso. Conforme demonstrado nos Apêndices D e E.

Diferente do comportamento esperado em bacias rurais com cobertura vegetal, na bacia urbana e periurbana do Rio Ipojuca, os resultados mostraram que as cargas difusas estimadas pelo modelo MQUAL no período chuvoso (maio de 2024) foram menores que aquelas observadas no período seco (janeiro de 2025). Esse

comportamento se deve principalmente às menores concentrações laboratoriais observadas nos parâmetros fósforo total, nitrogênio total e DBO, as quais são um insumo direto para o cálculo da carga ($CD = A \times CE$).

A baixa concentração observada durante as coletas de maio pode estar associada à ocorrência de chuvas recentes que antecederam os eventos de amostragem, favorecendo o pré-arraste da carga acumulada e reduzindo a disponibilidade imediata de poluentes sobre as superfícies de escoamento. Ou seja, o solo e as superfícies urbanas já haviam sido lavados por precipitações anteriores, fazendo com que os eventos de chuva monitorados apresentassem menor potencial exportador naquele momento específico.

Esse tipo de resultado foi observado por Castro *et al.* (2022) ao aplicarem o modelo MQUAL em uma bacia urbana no interior de São Paulo. Os autores constataram que, em algumas situações, as chuvas não foram suficientes para mobilizar cargas relevantes, resultando em menores concentrações e cargas totais de poluentes. O mesmo padrão foi identificado por Brito *et al.* (2021), que atribuíram os baixos índices de carga difusa em período úmido à combinação entre baixa intensidade da chuva e cobertura superficial saturada anteriormente.

Além disso, durante o período seco, há maior estabilidade hidrológica e acúmulo de poluentes nas margens e nas áreas urbanas pavimentadas. Esses poluentes, quando não mobilizados por chuvas, permanecem próximos aos pontos de lançamento, podendo ser mais facilmente detectados nas amostragens como ficou evidenciado nas altas concentrações de fósforo e DBO em janeiro de 2025 nos pontos urbanos da bacia.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a importância do contexto local, da intensidade e sequência das chuvas e da natureza do uso do solo na dinâmica da poluição difusa, aspectos que devem ser considerados na interpretação da modelagem hidrológica com MQUAL.

De maneira similar, a aplicação do modelo PLOAD para cálculo da carga difusa no Rio Ipojuca, o qual considera a precipitação anual e os coeficientes de exportação específicos para cada tipo de uso do solo, evidencia que o escoamento superficial de água em áreas rurais, dominadas por práticas agrícolas, apresenta para aporte de fósforo de maneira significativa.

A aplicação do modelo PLOAD na bacia do Rio Ipojuca revelou diferenças significativas nas cargas difusas estimadas para fósforo total e nitrogênio total entre

os períodos chuvoso (maio de 2024) e seco (janeiro de 2025). Contrariando a expectativa comum de maiores cargas durante o período chuvoso devido ao aumento do escoamento superficial, os resultados indicaram cargas mais elevadas no período seco. Conforme demonstrado nos Apêndices F e G.

No ponto de monitoramento da Ponte Irmã Jerônima por exemplo, a carga estimada de fósforo foi de 25,92 kg/ano no período chuvoso, enquanto no período seco atingiu 96,84 kg/ano. Para nitrogênio, os valores foram de 96,37 kg/ano (chuvoso) e 215,66 kg/ano (seco). Essas diferenças podem ser atribuídas às concentrações mais elevadas de poluentes observadas durante o período seco, possivelmente devido à menor diluição e à acumulação de poluentes nas superfícies impermeáveis urbanas.

Estudos recentes corroboram esses achados. Souza *et al.* (2024) observaram que, em rios urbanos como o Tamanduateí, em São Paulo, as concentrações de fósforo e nitrogênio permaneceram elevadas durante períodos secos, atribuídas à baixa diluição e à contribuição contínua de fontes pontuais e difusas. Da mesma forma, Neiva (2020) identificou que, em bacias urbanas, as cargas difusas podem ser mais significativas no período seco devido à acumulação de poluentes e à menor capacidade de autodepuração dos corpos hídricos.

Esses resultados destacam a importância de considerar as características específicas da bacia hidrográfica, como uso e ocupação do solo, infraestrutura de saneamento e padrões de precipitação, na análise da poluição difusa. Em áreas urbanas com infraestrutura de drenagem inadequada, a acumulação de poluentes durante períodos secos pode resultar em cargas difusas elevadas, mesmo com menor volume de escoamento superficial.

Todavia, esperava-se que, ao comparar os resultados dos modelos com os dados coletados em campo, os valores simulados apresentassem uma boa correlação com as medições de qualidade da água em pontos críticos do Rio Ipojuca. Por exemplo, as concentrações calculadas deveriam concordar com as fontes identificadas no início da pesquisa. De fato, a análise comparativa confirmou essa expectativa em grande parte, demonstrando que os modelos foram capazes de reproduzir de forma consistente tanto as variações espaciais, ou seja, as diferenças nas concentrações de poluentes entre os diferentes pontos de coleta ao longo do trecho estudado do Rio Ipojuca, como a maior concentração de fósforo observada na Ponte Irmã Jerônima em comparação com áreas menos urbanizadas, quanto as

variações temporais, observadas entre os períodos chuvoso e seco, nas quais os valores de nitrogênio e fósforo foram significativamente mais elevados durante as chuvas, refletindo o impacto do escoamento superficial. Essa correspondência reforçou a confiabilidade das modelagens aplicadas e validou o uso das ferramentas MQUAL e PLOAD como instrumentos adequados para estimar cargas poluidoras e apoiar estratégias de gestão ambiental na bacia do Rio Ipojuca.

A convergência desses resultados com os estudos supracitados e discutidos neste trabalho em tela é essencial para garantir que os modelos empregados sejam adequados ao contexto local, possibilitando uma calibração contínua e precisa dos parâmetros utilizados. Essa relação entre estudos, fortalece a confiança nos resultados e permite o aperfeiçoamento de modelos futuros, ajustando-os às especificidades de cada bacia.

5.4 Validação dos Resultados da Modelagem com os Parâmetros de Qualidade da Água

Embora esta pesquisa tenha adotado os modelos MQUAL e PLOAD para estimativa de carga difusa de fósforo, nitrogênio e DBO, os dados laboratoriais também revelaram variações em parâmetros como temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e pH entre os pontos de coleta. Embora não tenha sido realizada análise estatística específica para esses indicadores, observou-se que os maiores desvios de condutividade e OD ocorreram em pontos com intensa ocupação urbana e comercial, sugerindo influência antrópica nessas variações.

A análise comparativa com outros estudos também revelou que a metodologia PLOAD deverá ser eficaz para identificar e quantificar fontes difusas de poluição em bacias hidrográficas urbanas e rurais.

Em termos de proposições de melhoria, os resultados propõem a implementação de práticas de manejo sustentável, como a criação de faixas de vegetação ripária para proteção de corpos hídricos e o uso de tecnologias de tratamento de esgotos eficientes, medidas que são essenciais para mitigar a poluição difusa na bacia do Rio Ipojuca.

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam que os modelos matemáticos aplicados, MQUAL e PLOAD, são ferramentas eficazes para a quantificação e gestão da poluição difusa em bacias hidrográficas urbanas e rurais, como a do Rio Ipojuca,

no Agreste de Pernambuco. A análise integrada dos dados laboratoriais, da ocupação do solo e das estimativas modeladas permitiu identificar os principais vetores de aporte de nutrientes como fósforo e nitrogênio, corroborando a hipótese central do estudo.

A validação dos modelos com dados de campo demonstrou forte correspondência entre áreas com uso urbano e comercial intenso e as maiores cargas poluidoras. Especialmente nos pontos localizados em bairros densamente ocupados de Caruaru, observou-se que a ausência de infraestrutura de esgotamento sanitário, drenagem pluvial e manejo adequado dos resíduos contribui diretamente para o lançamento de cargas significativas de matéria orgânica e nutrientes nos corpos hídricos.

Nas áreas rurais, os resultados mostraram que, mesmo com menor densidade populacional, o uso intensivo de fertilizantes e a carência de práticas agrícolas sustentáveis resultam em altos índices de poluição difusa. No entanto, a pesquisa também identificou que no período seco, essas áreas apresentaram carga difusa maior, quando comparada ao período chuvoso, devido ao acúmulo e à posterior mobilização por precipitações pontuais ou irrigação superficial.

Ao considerar a precipitação como fator multiplicador, o modelo PLOAD reforçou que eventos de chuvas intensas representam os momentos de maior criticidade para o aporte de carga difusa, validando a importância do monitoramento hidrológico contínuo. A correlação entre os dados de precipitação da APAC (2024) e as cargas estimadas confirmou que os maiores volumes de poluição coincidiram com as áreas de maior exposição urbana e agrícola.

Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho oferecem contribuições relevantes para o planejamento de políticas públicas e ações integradas voltadas à mitigação da poluição difusa na bacia do Rio Ipojuca. A integração entre os modelos MQUAL e PLOAD, associada à caracterização detalhada do uso do solo e à análise dos parâmetros de qualidade da água, permitiu compreender de maneira aprofundada os principais pontos críticos do sistema hídrico, bem como as fontes de pressão sobre ele. Os dados gerados permitem ao poder público não apenas identificar as áreas que mais contribuem para a carga poluidora, mas também orientar a alocação de recursos de forma mais eficaz, priorizando intervenções em saneamento, recuperação ambiental e controle de drenagem.

Um destaque importante dos resultados refere-se à influência das atividades do polo têxtil de Caruaru, cujos efluentes industriais, especialmente oriundos das lavanderias, foram apontados como um fator relevante para a degradação da qualidade da água em determinados trechos do rio. Com base nos dados levantados, os gestores poderão elaborar estratégias específicas para esse setor, como a revisão de processos produtivos, o fortalecimento das exigências de tratamento de efluentes e a intensificação do monitoramento ambiental. Além disso, a possibilidade de atualização contínua das modelagens com novos dados permite que essas ferramentas sejam incorporadas de forma permanente ao processo de gestão hídrica, não apenas como instrumentos diagnósticos, mas também como apoio à tomada de decisão, à definição de metas de redução de poluentes e à avaliação dos impactos das políticas implementadas. Dessa forma, o presente estudo contribui para reforçar a capacidade técnica e institucional dos gestores locais, oferecendo bases concretas para a construção de uma gestão mais integrada, eficiente e sustentável dos recursos hídricos da bacia do Rio Ipojuca.

Esta pesquisa, portanto, contribui não apenas para a compreensão técnica da poluição difusa na bacia do Rio Ipojuca, mas também para a implementação de soluções sustentáveis e adaptativas (implantação de infraestrutura verde, reforço à coleta e ao tratamento de esgoto nas áreas urbanas e periurbanas, redução ambiental e envolvimento comunitário) alinhadas à gestão integrada dos recursos hídricos e às diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Recursos Hídricos. Os achados estão em consonância com estudos recentes que recomendam abordagens sistêmicas, intersetoriais e sustentadas por dados geoespaciais e ambientais confiáveis, como ferramentas indispensáveis para a efetiva proteção dos mananciais.

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa alcançou de forma consistente os objetivos propostos ao investigar a poluição difusa na bacia do Rio Ipojuca, no trecho urbano de Caruaru, combinando em revisão sistemática, análise de campo e aplicação de modelos matemáticos. Mais do que apenas aplicar ferramentas já consolidadas, o estudo trouxe uma contribuição relevante ao adaptar essas metodologias à realidade local, demonstrando sua aplicabilidade prática e gerando conhecimentos e resultados diretamente utilizáveis pelos gestores públicos. A abordagem adotada possibilitou compreender o comportamento da carga poluidora de origem difusa sob diferentes usos do solo e condições hidrológicas, mas também evidenciar áreas críticas, setores de maior impacto (como o polo têxtil) e lacunas de dados que precisam ser priorizadas em futuras ações de monitoramento. Assim, o trabalho reforça a relevância da modelagem como ferramenta de suporte à gestão ambiental, ao mesmo tempo em que oferece subsídios concretos para a construção de estratégias de gestão mais eficazes, integradas e alinhadas à realidade socioeconômica e ambiental da bacia estudada.

A revisão sistemática identificou os principais modelos utilizados internacionalmente para estimativa de cargas difusas, com destaque para MQUAL e PLOAD, além de evidenciar a concentração de estudos em países como Alemanha, China e Canadá. Mais do que mapear a literatura disponível, a revisão teve papel essencial para embasar as escolhas metodológicas realizadas nesta pesquisa, oferecendo referências sólidas para a seleção das ferramentas de modelagem, para a definição dos parâmetros utilizados e para a estruturação das análises comparativas entre os resultados simulados e os dados observados em campo. Dessa forma, a revisão contribuiu não apenas para consolidar uma base teórica robusta e atualizada, mas também para assegurar o alinhamento do trabalho com as melhores práticas metodológicas reconhecidas internacionalmente.

A caracterização da qualidade da água, por meio de coletas realizadas em períodos seco e chuvoso, permitiu identificar variações espaciais e sazonais expressivas. Os dados revelaram que os pontos urbanos apresentaram maiores concentrações de fósforo, DBO e coliformes totais, principalmente durante a estiagem, quando a baixa vazão do rio compromete a diluição natural. Já os pontos com

influência agrícola demonstraram incremento de poluentes no período chuvoso, sobretudo devido ao arraste superficial de fertilizantes e sedimentos.

As simulações com os modelos MQUAL e PLOAD permitiram estimar o potencial de carga poluidora difusa com base em dados de uso e ocupação do solo e em parâmetros hidrológicos. As áreas com maior densidade urbana e ausência de infraestrutura sanitária apresentaram as maiores cargas simuladas, especialmente de fósforo e DBO. Em áreas rurais, as contribuições estiveram associadas a práticas agrícolas intensivas e ao uso inadequado do solo.

Os resultados simulados foram validados com os dados reais obtidos em campo e de modo geral, demonstraram boa correspondência, sobretudo para os parâmetros de fósforo total e nitrogênio, principalmente nos pontos localizados nas áreas urbanas. Essa validação reforçou a aplicabilidade dos modelos utilizados, confirmando sua capacidade de representar os padrões gerais da poluição difusa na bacia do Rio Ipojuca. No entanto, algumas limitações ficaram evidentes, como a subestimativa das concentrações em determinados pontos rurais, possivelmente relacionada à falta de dados detalhados sobre práticas agrícolas e ao uso de coeficientes de exportação genéricos. Além disso, a calibração dos modelos foi impactada pela disponibilidade limitada de dados de monitoramento com alta resolução temporal e espacial, restringindo a precisão das simulações em condições específicas, como eventos extremos de chuva. Esses resultados indicam que, embora os modelos sejam ferramentas valiosas para o diagnóstico e planejamento de ações, sua aplicação prática exige avanços no refinamento local dos parâmetros e na ampliação das redes de monitoramento para garantir maior precisão e confiabilidade nas análises futuras.

O estudo revelou que a poluição difusa é um problema significativo tanto em áreas urbanas quanto rurais, e que sua mitigação exige planejamento integrado. Os resultados obtidos podem subsidiar políticas públicas voltadas à melhoria do saneamento, ao controle do uso de fertilizantes, à conservação do solo e à implantação de infraestrutura verde. Mais do que oferecer recomendações gerais, este trabalho gera informações práticas que podem ser incorporadas ao cotidiano da gestão pública: os mapas e simulações produzidos permitem identificar áreas prioritárias para ação, guiar o direcionamento de recursos financeiros, embasar decisões de licenciamento e fiscalização, e apoiar campanhas educativas voltadas à redução da poluição difusa. Além disso, os dados gerados podem fortalecer os

instrumentos de planejamento já existentes, como planos municipais de saneamento, planos diretores e planos de bacia, oferecendo uma base técnica robusta para o monitoramento e avaliação das políticas implementadas. A dissertação também propõe um método replicável para outras bacias hidrográficas, contribuindo com dados concretos para o aprimoramento das estratégias de gestão hídrica no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

ALAMDARI, N.; SAMPLE, D. J.; STEINBERG, P.; ROSS, A. C.; EASTON, Z. M. Assessing the effects of climate change on water quantity and quality in an urban watershed using a calibrated stormwater model. **Water**, v. 9, n. 7, p. 464, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/7/464>. Acesso em: 25 abr. 2025.

ALMEIDA, R. S.; PEREIRA, M. L. Infraestrutura verde para controle da poluição difusa urbana. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 3, p. 451–467, 2022.

ALMEIDA, R. S.; SOUZA, M. R. A importância dos comitês de bacia hidrográfica na gestão integrada dos recursos hídricos. **Revista de Gestão Ambiental**, v. 2, p. 215–230, 2021.

ALVES, F. C.; PEREIRA, G. A. Gestão integrada de recursos hídricos: conceitos, desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 1, e50, 2021.

ANGELLO, Z. A.; BEHAILU, B. M.; TRÄNCKNER, J. Selection of optimum pollution load reduction and water quality improvement approaches using scenario-based water quality modeling in Little Akaki River, Ethiopia. **Water**, v. 13, n. 5, p. 584, 2021. DOI: 10.3390/w13050584.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Dados de monitoramento da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/monitoramento>. Acesso em: 12 jun. 2024.

ARAÚJO, L. M. Poluição difusa e suas implicações na qualidade da água: estudo de caso no Rio Ipojuca, Caruaru-PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 198–211, 2021.

BELLO, N.; JAMIL, N. R.; LOOI, L. J.; NG, K. Y. Pollutant load estimation and load reduction target (LRT) projection for total maximum daily load (TMD) allocation on tropical rivers. **Environmental and Sustainability Indicators**, [S.l.], v. 22, p. 100363, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100363>. Acesso em: 11 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022–2040**. Brasília, 2022.

CARVALHO, D. J.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Monitoring of diffuse pollution in an urban catchment in Brazil. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE – ICUD, 15., 2021, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: International Water Association, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/357351963>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CARVALHO, F. A.; SOUZA, D. M. Gestão integrada dos recursos hídricos e a poluição difusa: desafios e perspectivas. **Revista de Políticas Públicas e Gestão Ambiental**, v. 2, p. 112–128, 2020.

CARVALHO, A. R. de; RIEM-GALLIANO, L.; TER HALLE, A.; CUCHEROUSSET, J. Interactive effect of urbanization and flood in modulating microplastic pollution in rivers. **Environmental Pollution**, [S.l.], v. 311, p. 119908, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119908>.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Modelo matemático de correlação uso do solo. *In*: Câmara Técnica de Monitoramento Hidrológico (CTMH), São Paulo, 16 dez. 2020. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <https://comiteat.sp.gov.br/wp-content/uploads/2020/12/MODELO-MATEMÁTICO-DE-CORRELAÇÃO-USO-DO-SOLO-Apresentação-realizada-pela-CETESB-em-reunião-da-CTMH-dia-16.12.2020.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2025.

SILVA, L. L. **Avaliação de qualidade de efluentes em estações de tratamento de esgotos na bacia do rio Ipojuca**. 2023. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023. Acesso em: 20 abr. 2025.

COSTA, J. P.; MELO, L. C. Tecnologias de monitoramento na gestão de recursos hídricos: avanços e desafios. **Revista de Engenharia e Sustentabilidade**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 112–124, 2021.

COSTA, M. E. L.; CARVALHO, D. J.; GARNIER, J.; KOIDE, S. Qualidade das águas urbanas no Córrego Vicente Pires – Distrito Federal. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 47–68, 2021. São Paulo. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/38802>. Acesso em: 20 abr. 2025.

CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco. **Informações sobre o Rio Ipojuca e suas condições ambientais**. Recife, 2024. Disponível em: <https://www.cprh.pe.gov.br/>. Acesso em: 29 dez. 2024.

DADOS CLIMÁTICOS. Dados climáticos para Caruaru, Pernambuco. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/caruaru-34674/>. Acesso em: 05 dez. 2024.

ECOANGOLA. **Eutrofização: processos, causas e impactos no ambiente**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://ecoangola.com/eutrofizacao-processos-causas-e-impactos-no-ambiente/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

FERREIRA, A. S.; OLIVEIRA, T. R. Instrumentos econômicos para a gestão dos recursos hídricos: análise da cobrança pelo uso da água. **Revista de Políticas Públicas e Gestão Ambiental**, São Paulo, v. 4, p. 35–47, 2020.

FERREIRA, L. H.; MARTINS, F. C. O uso da modelagem PLOAD na gestão de bacias hidrográficas: desafios e perspectivas. **Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, São Paulo, v. 1, p. 89–101, 2022.

FERREIRA, M. L.; SILVA, R. C. Avaliação da eficiência do modelo MQUAL na gestão de recursos hídricos urbanos. **Revista de Engenharia Ambiental**, Curitiba, v. 3, p. 134–146, 2020.

GONDIM, F. R.; OHNUMA JÚNIOR, A. A.; OBRACZKA, M. Jardins de chuva: atualizações sobre a técnica a partir de uma revisão sistemática. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 9, n. 5, p. 201–215, 2023. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n5.201-215>. Acesso em: 02 jan. 2025.

INSTITUTO ÁGUA E SANEAMENTO. Caruaru – PE: **informações sobre saneamento básico e desafios locais**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/pe/caruaru>. Acesso em: 05 dez. 2024.

ANG, J.-Y.; KIM, D.-W.; CHOI, Y.-J.; JANG, D.-W. Analysis of the water quality characteristics of urban streams using the flow–pollutant loading relationship and a load duration curve (LDC). **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 20, art. 9694, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11209694>. Acesso em: 05 dez. 2024.

KHOI, D. N. et al. The effects of climate variability and land-use change on streamflow and nutrient loadings in the Sesan, Sekong, and Srepok (3S) River Basin of the Lower Mekong Basin. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 29, p. 7117–7126, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16235-w>. Acesso em: 05 dez. 2024.

KOZAK, C.; FERNANDES, C. V. S. A influência dos eventos de precipitação e poluição difusa em rios: implicações para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, e23, 2022. São Paulo. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/734>. Acesso em: 20 abr. 2025.

LIMA, A. R.; CARVALHO, M. S. Uso do solo e qualidade da água: desafios para a gestão integrada de bacias hidrográficas. **Revista de Ciências Ambientais**, Curitiba, v. 2, p. 98–110, 2021.

LIN, G.-Z. et al. Application of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to evaluate the fates of nitrogenous fertilizer in subtropical mountainous watershed tea farms. **Environmental Monitoring and Assessment**, Heidelberg, v. 194, art. 213, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09858-0>. Acesso em: 05 dez. 2024.

LORENZ, M. et al. Discovering water quality changes and patterns of the endangered Thi Vai estuary in Southern Vietnam through trend and multivariate analysis. **Water**, Basel, v. 13, n. 10, art. 1330, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13101330>. Acesso em: 15 dez. 2024.

MARKERT, N.; SCHÜRINGS, C.; FELD, C. K. Water Framework Directive micropollutant monitoring mirrors catchment land use: importance of agricultural and urban sources revealed. **Science of the Total Environment**, Heidelberg, v. 917, art. 170583, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170583>. Acesso em: 05 dez 2024.

MARTINS, R. R.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; SOUSA, D. N. R. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 759–766, 2019. Natal. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/qYyfFKqt5z7sKVcXW7TmMSg>. Acesso em: 20 abr. 2025.

MASUM, A. A. et al. Urban stormwater runoff pollutant loadings: GIS land use classification vs. sample-based predictions. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 29, p. 45349–45363, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18876-x>. Acesso em: 05 dez. 2024.

McLEOD, S. M.; KELLS, J. A.; PUTZ, G. Urban runoff quality characterization and load estimation in Saskatoon, Canada. **Journal of Environmental Engineering**, v. 132, n. 11, p. 1470–1481, nov. 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:11(1470).

MEJÍA, L.; BARRIOS, M. Identifying watershed predictors of surface water quality through iterative input selection. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Heidelberg, v. 20, p. 7201–7216, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04406-2>. Acesso em: 05 dez 2024.

MARTÍNEZ SILVA, P.; NANNY, M. A. Impact of microplastic fibers from the degradation of nonwoven synthetic textiles to the Magdalena River water column and river sediments by the city of Neiva, Huila (Colombia). **Water**, v. 12, n. 4, p. 1210, 2020. Basel: MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12041210>. Acesso em: 25 abr. 2025.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. **Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar?** Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2022. (Texto para Discussão, n. 2791). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/td2791>. Acesso em: 02 fev. 2025.

MUHAMMETOGLU, A. et al. An integrated modeling approach to assess best management practices (BMPs) for improving stream water quality using the MapShed and WASP8 models. **Water Resources Management**, Heidelberg, v. 37, p. 6237–6253, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03655-1>. Acesso em: 05 dez. 2024.

NASCIMENTO, L. H.; ALVES, M. C. Adaptação às mudanças climáticas na gestão de recursos hídricos: uma análise das políticas públicas no Brasil. **Revista de Clima e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 1, p. 65–78, 2020.

NATURAL CAPITAL PROJECT. InVEST: **Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs**. Stanford: Stanford University, 2025. Disponível em: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>. Acesso em: 21 abr. 2025.

NEIVA, S. S. **Quantificação da carga de poluição difusa e pontual como ferramenta para planejamento no Alto Curso da bacia hidrográfica do Rio Manhuaçu**. 2021. 59 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua) – Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2021. Disponível em:

<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2993>. Acesso em: 6 maio 2025.

OLIVEIRA, T. M.; MENDONÇA, R. L. Eutrofização e poluição difusa: desafios para a qualidade das águas superficiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, n. 1, e27, 2020.

OLIVEIRA, L. M. de; PINTO, É. J. de A.; MAILLARD, P. Estimativa das cargas de poluição difusa avaliando os hidrogramas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 28, n. 1, p. e56, 2023. Porto Alegre. Disponível em: <https://www.dgeo.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/267/2023/09/Artigo-Estimativa-das-cargas-de-polui%C3%A7%C3%A3o-difusa-avaliando-os-hidrogramas-2023.pdf>. Acesso em: 6 maio 2025.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque, 2015. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/pt/>. Acesso em: 20 maio 2024.

PALHETA, J. V. B. **Modelagem da capacidade de infiltração de diferentes cenários de pavimentos permeáveis na Bacia do Una – Belém – PA**. 2023. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/16367/4/Dissertacao_ModelagemCapacidadeInfiltracao.pdf. Acesso em: 6 maio 2025.

PERIN, L. T. Modelagem matemática como suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Araçuaí – MG. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 11, p. 335–348, 2021. Curitiba. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0027>.

PREFEITURA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Manual de Drenagem Sustentável**. São José dos Campos: Prefeitura Municipal, 2024.

REZAGAMA, A. et al. Prediction of spatial pollution load using the PLOAD model. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 623, n. 1, art. 012102, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/623/1/012102>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ROSA, D. W. B. et al. Water quality benefits of implementing Green and Blue Infrastructure in a peri-urban catchment – Case study of a Brazilian metropolis. **Journal of Cleaner Production**, Heidelberg, v. 478, art. 143943, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143943>. Acesso em: 05 dez. 2024.

SANTOS, L. F.; LIMA, E. G.; SOUZA, M. R. Integração de modelagens MQUAL e PLOAD na gestão da qualidade da água em bacias hidrográficas. **Revista de Engenharia Ambiental**, Curitiba, v. 4, p. 289–301, 2021.

SANTOS, L. F.; SOUZA, D. P.; GOMES, R. B. Desafios de gestão integrada de recursos hídricos em contextos de múltiplos usos: uma revisão crítica. **Revista de Gestão e Políticas Públicas**, São Paulo, v. 1, p. 87–101, 2021.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 13.579, de 13 de julho de 2009. Define a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings – APRM-B, e dá outras providências correlatas. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**: Poder Executivo, São Paulo, SP, 14 jul. 2009. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13579-13.07.2009.html>. Acesso em: 02 jan. 2025

SERVICE, T. et al. A national-scale high-resolution runoff risk and channel network mapping workflow for diffuse pollution management. **Journal of Environmental Management**, Heidelberg, v. 368, art. 122110, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122110>. Acesso em: 04 dez. 2024.

SILVA, E. M. **Avaliação dos impactos dos efluentes têxteis no Rio Ipojuca em Caruaru**. 2023. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023. Acesso em: 26 mai. 2025.

SILVA, G. A.; SOUZA, D. R. Estimativa de carga de poluentes em bacias agrícolas utilizando o modelo PLOAD. **Revista de Recursos Naturais e Meio Ambiente**, Brasília, v. 2, p. 155–167, 2021.

SILVA, J. F.; ALMEIDA, V. R.; PEREIRA, A. F. Poluição difusa em bacias hidrográficas: uma abordagem integrada para a gestão de recursos hídricos. **Revista de Hidrologia e Meio Ambiente**, Recife, v. 3, p. 387–402, 2021.

SILVA, M. L.; GOMES, A. M. Participação social na gestão de recursos hídricos: avanços e desafios. **Revista de Participação e Cidadania**, Brasília, v. 3, p. 55–68, 2020.

SOUSA, J. F. Situação do Rio Ipojuca: uma análise dos fatores de manipulação e estratégias de mitigação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 245–257, 2024.

SOUZA, T. M. Legislação sobre poluição difusa no Brasil: lacunas e desafios. **Revista de Direito Ambiental**, São Paulo, v. 2, p. 12–19, 2018.

TAWAN, A.-S. et al. Assessment of water quality and pollutant loading of the Rajang River and its tributaries at Pelagus area subjected to seasonal variation and river regulation. **Environment, Development and Sustainability**, Heidelberg, v. 22, p. 4101–4124, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00374-9>. Acesso em: 25 abr. 2025.

TREHAN, M.; WICHTMANN, W.; GRYGORUK, M. Assessment of nutrient loads into the Ryck River and options for their reduction. **Water**, Basel, v. 14, n. 13, art. 2055, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14132055>. Acesso em: 25 abr. 2025.

UNESCO. **Relatório Mundial da ONU sobre Recursos Hídricos 2024: Água para a prosperidade e a paz**. Paris: UNESCO, 2024. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388950_por. Acesso em: 20 maio 2024.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF)**. National Exposure Research Laboratory, 1997. Disponível em: <https://www.epa.gov/ceam/hydrological-simulation-program-fortran-hspf>. Acesso em: 21 abr. 2025.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **PLOAD: an ArcView GIS tool to calculate nonpoint sources of pollution in watershed and water quality projects**. Washington, DC: EPA, 2001. Disponível em: <https://searchworks.stanford.edu/view/5650435>. Acesso em: 2 jan. 2025.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Storm Water Management Model: reference manual. Volume I – Hydrology (Revised)**. Cincinnati: Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, 2016. (EPA/600/R-15/162A). Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acesso em: 2 jan. 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2022.

WANG, W.; XU, C.; LIN, T.-C.; YANG, Z.; LIU, X.; XIONG, D.; CHEN, S.; CHEN, G.; YANG, Y. Forest structure regulates response of erosion-induced carbon loss to rainfall characteristics. **Forests**, Basel, v. 15, n. 7, p. 1269, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/7/1269>. Acesso em: 25 abr. 2025.

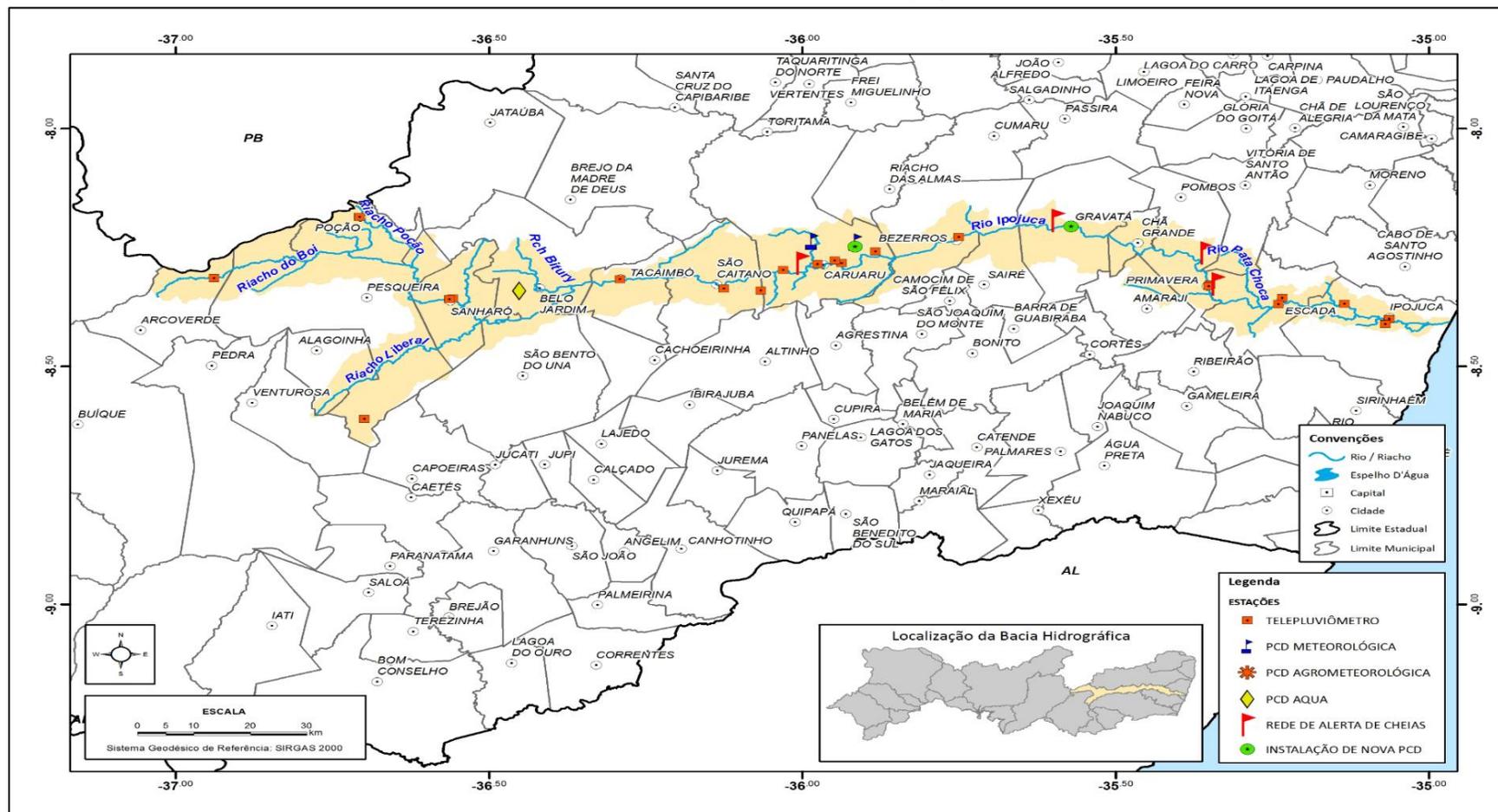
WU, L.; GAO, J. E.; MA, X. Y.; LI, D. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 22, n. 14, p. 10647–10660, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4242-z>.

YAN, H. et al. Land cover based simulation of urban stormwater runoff and pollutant loading. **Journal of Environmental Management**, Heidelberg, v. 303, art. 114147, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114147>. Acesso em: 05 dez. 2024.

ZEIGER, S. J. *et al.* A SWAT model validation of nested-scale contemporaneous stream flow, suspended sediment and nutrients from a multiple-land-use watershed of the central USA. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 727, p. 138705, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.178>. Acesso em: 02 jan. 2025

APÊNDICES

APÊNDICE A - Bacia do Rio Ipojuca



Fonte: APAC (2024)

APÊNDICE B - Modelagem em Excel para o Cálculo da Carga Difusa através do MQUAL

LOCAL: RIO IPOJUCA								
CIDADE: CARUARU								
CÁLCULO DA POLUIÇÃO DIFUSA ATRAVÉS DO MQUAL: $CD = A \times X \times CE$								
CD = carga difusa (kg/ano); A = área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha); CE = coeficiente de exportação (kg/ha/ano).								
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração "x" (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga "x" (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para "x" (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para "x" (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)				31,54	inserir dados	inserir dados	inserir dados
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)				31,54	inserir dados	inserir dados	inserir dados
	Feira José Liberato				31,54	inserir dados	inserir dados	inserir dados
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)				31,54	inserir dados	inserir dados	inserir dados
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira				31,54	inserir dados	inserir dados	inserir dados
	Ponte do Distrito				31,54	inserir dados	inserir dados	inserir dados

Fonte: A Autora (2025).

APÊNDICE C - Modelagem em Excel para o Cálculo da Carga Difusa através do PLOAD

LOCAL: RIO IPOJUCA											
CIDADE: CARUARU											
CÁLCULO DA POLUIÇÃO DIFUSA ATRAVÉS DO PLOAD: $CD = A \times X \times EC \times P \times X \times CE \times CP \times 10^{-6}$											
CD = Carga Difusa (kg/ano) A = Área (ha) EC = Coeficiente de Exportação (kg/ha/ano) P = Precipitação Anual (mm) CE = Coeficiente de Escoamento* CP = Concentração de Poluentes (mg/L)											
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração "x" (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de "x" (kg/ano)	EC = Coeficiente de Exportação "x" (kg/ha/ano)	P = Precipitação Anual (mm)	CE = Coeficiente de Escoamento*	CP = Concentração de Poluentes (mg/L)	CD = Carga Difusa para "x" (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)				31,54	inserir dados	inserir dados	584,90		inserir dados	inserir dados
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)				31,54	inserir dados	inserir dados	584,90		inserir dados	inserir dados
	Feira José Liberato				31,54	inserir dados	inserir dados	584,90		inserir dados	inserir dados
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)				31,54	inserir dados	inserir dados	584,90		inserir dados	inserir dados
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira				31,54	inserir dados	inserir dados	584,90		inserir dados	inserir dados
	Ponte do Distrito				31,54	inserir dados	inserir dados	584,90		inserir dados	inserir dados

Fonte: A Autora (2025).

APÊNCIDE D – Cálculo da Carga Difusa Através do MQUAL (maio_2024)

LOCAL: RIO IPOJUCA								
CIDADE: CARUARU								
								
CÁLCULO DA POLUIÇÃO DIFUSA ATRAVÉS DO MQUAL: CD = A X CE - COLETA EM TEMPO CHUVOSO (24/05/2025)								
CD = carga difusa (kg/ano); A = área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha); CE = coeficiente de exportação (kg/ha/ano).								
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Fósforo Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Fósforo Total (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para Fósforo Total (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para Fósforo Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	3,80	0,02	31,54	2,28	0,01	2,28
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	13,90	0,02	31,54	8,33	0,02	8,33
	Feira José Liberato	56,70	2,60	0,02	31,54	1,56	0,03	1,56
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	3,10	0,02	31,54	1,86	0,02	1,86
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	3,50	0,02	31,54	2,10	0,04	2,10
	Ponte do Distrito	168,00	3,50	0,02	31,54	2,10	0,01	2,10
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Nitrogênio Total (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para Nitrogênio Total (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para Nitrogênio Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	14,70	0,02	31,54	8,81	0,02	8,81
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	29,70	0,02	31,54	17,80	0,04	17,80
	Feira José Liberato	56,70	19,00	0,02	31,54	11,38	0,20	11,38
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	12,80	0,02	31,54	7,67	0,06	7,67
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	21,90	0,02	31,54	13,12	0,26	13,12
	Ponte do Distrito	168,00	9,80	0,02	31,54	5,87	0,03	5,87
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de DBO (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de DBO (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para DBO (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para DBO (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	3,00	0,02	31,54	1,80	0,00	1,80
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	37,00	0,02	31,54	22,17	0,05	22,17
	Feira José Liberato	56,70	9,00	0,02	31,54	5,39	0,10	5,39
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	3,00	0,02	31,54	1,80	0,02	1,80
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	4,00	0,02	31,54	2,40	0,05	2,40
	Ponte do Distrito	168,00	3,00	0,02	31,54	1,80	0,01	1,80

Fonte: A Autora (2025).

APÊNCIDE E - Cálculo da Carga Difusa Através do MQUAL (janeiro_2025)

LOCAL: RIO IPOJUCA								
CIDADE: CARUARU								
CÁLCULO DA POLUIÇÃO DIFUSA ATRAVÉS DO MQUAL: CD = A X CE - COLETA EM TEMPO SECO (17/01/2025)								
CD = carga difusa (kg/ano); A = área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha); CE = coeficiente de exportação (kg/ha/ano).								
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Fósforo Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Fósforo Total (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para Fósforo Total (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para Fósforo Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	18,20	0,02	31,54	10,91	0,03	10,91
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	22,00	0,02	31,54	13,18	0,03	13,18
	Feira José Liberato	56,70	14,00	0,02	31,54	8,39	0,15	8,39
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	15,00	0,02	31,54	8,99	0,08	8,99
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	4,60	0,02	31,54	2,76	0,05	2,76
	Ponte do Distrito	168,00	7,20	0,02	31,54	4,31	0,03	4,31
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Nitrogênio Total (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para Nitrogênio Total (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para Nitrogênio Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	31,00	0,02	31,54	18,57	0,05	18,57
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	42,00	0,02	31,54	25,17	0,06	25,17
	Feira José Liberato	56,70	15,30	0,02	31,54	9,17	0,16	9,17
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	5,80	0,02	31,54	3,48	0,03	3,48
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	22,00	0,02	31,54	13,18	0,26	13,18
	Ponte do Distrito	168,00	3,00	0,02	31,54	1,80	0,01	1,80
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de DBO (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de DBO (kg/ano)	CE = Coeficiente de Exportação para DBO (kg/ha/ano)	CD = Carga Difusa para DBO (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	50,00	0,02	31,54	29,96	0,08	29,96
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	112,00	0,02	31,54	67,11	0,15	67,11
	Feira José Liberato	56,70	35,00	0,02	31,54	20,97	0,37	20,97
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	38,00	0,02	31,54	22,77	0,19	22,77
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	26,00	0,02	31,54	15,58	0,31	15,58
	Ponte do Distrito	168,00	49,00	0,02	31,54	29,36	0,17	29,36

Fonte: A Autora (2025).

APÊNCIDE F - Cálculo da Carga Difusa Através do PLOAD (maio_2024)

LOCAL: RIO IPOJUCA											
CIDADE: CARUARU											
CÁLCULO DA POLUIÇÃO DIFUSA ATRAVÉS DO PLOAD: $CD = A \times EC \times P \times X \times CP \times 10^{-3}$ - COLETA EM TEMPO CHUVOSO (24/05/2024)											
CD = Carga Difusa (kg/ano) A = Área (ha) EC = Coeficiente de Exportação (kg/ha/ano) P = Precipitação Anual (mm) CE = Coeficiente de Escoamento* CP = Concentração de Poluentes (mg/L)											
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Fósforo Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Fósforo Total (kg/ano)	EC = Coeficiente de Exportação para Fósforo Total (kg/ha/ano)	P = Precipitação Anual (mm)	CE = Coeficiente de Escoamento*	CP = Concentração de Poluentes (mg/L)	CD = Carga Difusa para Fósforo Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	3,80	0,02	31,54	2,28	0,01	584,90	1,00	5,07	6,75
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	13,90	0,02	31,54	8,33	0,02	584,90	1,00	5,32	25,92
	Feira José Liberato	56,70	2,60	0,02	31,54	1,56	0,03	584,90	1,00	5,48	4,99
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	3,10	0,02	31,54	1,86	0,02	584,90	1,00	10,90	11,84
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	3,50	0,02	31,54	2,10	0,04	584,90	1,00	14,08	17,27
	Ponte do Distrito	168,00	3,50	0,02	31,54	2,10	0,01	584,90	1,00	15,94	19,55
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Nitrogênio Total (kg/ano)	EC = Coeficiente de Exportação para Nitrogênio Total (kg/ha/ano)	P = Precipitação Anual (mm)	CE = Coeficiente de Escoamento*	CP = Concentração de Poluentes (mg/L)	CD = Carga Difusa para Nitrogênio Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	14,70	0,02	31,54	8,81	0,02	584,90	1,00	17,98	92,65
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	29,70	0,02	31,54	17,80	0,04	584,90	1,00	18,64	194,02
	Feira José Liberato	56,70	19,00	0,02	31,54	11,38	0,20	584,90	1,00	15,88	105,71
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	12,80	0,02	31,54	7,67	0,06	584,90	1,00	14,83	66,54
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	21,90	0,02	31,54	13,12	0,26	584,90	1,00	15,85	121,65
	Ponte do Distrito	168,00	9,80	0,02	31,54	5,87	0,03	584,90	1,00	9,80	33,66

* O coeficiente de escoamento é uma unidade adimensional, que depende das características do solo, cobertura do solo, inclinação, e outros fatores que influenciam a capacidade do solo de absorver a água da chuva. Ele representa a proporção da precipitação que se transforma em escoamento superficial. O valor varia de 0 a 1, onde:
 0: Indica que toda a precipitação é absorvida pelo solo ou evapora (nenhum escoamento superficial).
 1: Indica que toda a precipitação contribui para o escoamento superficial (nenhuma infiltração ou evaporação).

Fonte: A Autora (2025).

APÊNCIDE G - Cálculo da Carga Difusa Através do PLOAD (janeiro_2025)

LOCAL: RIO IPOJUCA											
CIDADE: CARUARU											
CÁLCULO DA POLUIÇÃO DIFUSA ATRAVÉS DO PLOAD: $CD = A \times EC \times P \times CE \times CP \times 10^{-3}$ - COLETA EM TEMPO SECO (17/01/2025)											
CD = Carga Difusa (kg/ano) A = Área (ha) EC = Coeficiente de Exportação (kg/ha/ano) P = Precipitação Anual (mm) CE = Coeficiente de Escoamento* CP = Concentração de Poluentes (mg/L)											
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Fósforo Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Fósforo Total (kg/ano)	EC = Coeficiente de Exportação para Fósforo Total (kg/ha/ano)	P = Precipitação Anual (mm)	CE = Coeficiente de Escoamento*	CP = Concentração de Poluentes (mg/L)	CD = Carga Difusa para Fósforo Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	18,20	0,02	31,54	10,91	0,03	664,00	1,00	13,50	97,75
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	22,00	0,02	31,54	13,18	0,03	664,00	1,00	12,56	109,94
	Feira José Liberato	56,70	14,00	0,02	31,54	8,39	0,15	664,00	1,00	14,36	79,99
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	15,00	0,02	31,54	8,99	0,08	664,00	1,00	19,96	119,12
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	4,60	0,02	31,54	2,76	0,05	664,00	1,00	20,02	36,64
	Ponte do Distrito	168,00	7,20	0,02	31,54	4,31	0,03	664,00	1,00	20,26	58,04
CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	PONTOS	A = Área total de cada classe proposta de uso e ocupação do solo (ha)	Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) da amostra	Vazão do Rio Ipojuca (m³/s) - conforme APAC	Tempo (s/ano) x 10 ⁻⁶	Carga de Nitrogênio Total (kg/ano)	EC = Coeficiente de Exportação para Nitrogênio Total (kg/ha/ano)	P = Precipitação Anual (mm)	CE = Coeficiente de Escoamento*	CP = Concentração de Poluentes (mg/L)	CD = Carga Difusa para Nitrogênio Total (kg/ano)
Área Urbana: Inclui áreas residenciais, comerciais e industriais.	Parque São Francisco (Ponte do Cano)	361,40	31,00	0,02	31,54	18,57	0,05	664,00	1,00	19,85	244,82
	Salgado (Ponte Irmã Jerônima)	452,20	42,00	0,02	31,54	25,17	0,06	664,00	1,00	17,62	294,43
	Feira José Liberato	56,70	15,30	0,02	31,54	9,17	0,16	664,00	1,00	11,53	70,16
	Alto o Moura (Antigo Matadouro)	119,00	5,80	0,02	31,54	3,48	0,03	664,00	1,00	10,27	23,69
Área Rural: Abrange áreas agrícolas e de pastagem.	Vila Gonçalves Ferreira	51,00	22,00	0,02	31,54	13,18	0,26	664,00	1,00	12,50	109,41
	Ponte do Distrito	168,00	3,00	0,02	31,54	1,80	0,01	664,00	1,00	3,00	3,58

* O coeficiente de escoamento é uma unidade adimensional, que depende das características do solo, cobertura do solo, inclinação, e outros fatores que influenciam a capacidade do solo de absorver a água da chuva. Ele representa a proporção da precipitação que se transforma em escoamento superficial. O valor varia de 0 a 1, onde:
 0: Indica que toda a precipitação é absorvida pelo solo ou evapora (nenhum escoamento superficial).
 1: Indica que toda a precipitação contribui para o escoamento superficial (nenhuma infiltração ou evaporação).

Fonte: A Autora (2025).

APÊNDICE H – Resumo da Bibliografia

AUTORES	OBJETIVO	METODOLOGIA	RESULTADOS
Haibin Yan, Arlette Fernandez, David Z. Zhu, Wenming Zhang, Mark R. Loewen, Bert van Duin, Lei Chen, Khizar Mahmood, Stacey Zhao e Haifeng Jia.	Desenvolver e comparar dois métodos de simulação de escoamento pluvial urbano e carregamento de poluentes, avaliando o impacto da heterogeneidade da cobertura do solo na precisão das simulações, na transferência de parâmetros e na contribuição das diferentes coberturas do solo para o escoamento e qualidade da água.	Foram utilizadas áreas residenciais em Calgary, Canadá, e o modelo PCSWMM para realizar simulações baseadas em cobertura do solo (LCB) e no método tradicional de delimitação de bacias (WDT). Dados coletados entre 2018 e 2019 foram usados para calibração, validação e análise comparativa, avaliando parâmetros hidrológicos e de qualidade da água.	O modelo LCB mostrou melhor desempenho na simulação de escoamento, com maior precisão e capacidade de transferir parâmetros hidrológicos para áreas não monitoradas. Estradas e telhados foram os maiores contribuintes para escoamento e poluição, enquanto áreas verdes desempenharam um papel relevante apenas em eventos de chuva intensa. Ambos os modelos tiveram desempenho semelhante na qualidade da água, mas a transferência de parâmetros de qualidade foi limitada.
Nele Markert, Christian Schürings, Christian K. Feld.	O estudo investigou como o uso da terra, especialmente	Foram analisados dados de monitoramento de 109 locais na	Áreas urbanas estavam associadas a altos níveis de

	<p>áreas urbanas e agrícolas, influencia as concentrações de micropoluentes em rios, analisando suas fontes e padrões de exposição para propor melhores estratégias de gestão de poluição.</p>	<p>Renânia do Norte-Vestfália, Alemanha, usando Modelos Lineares Mistos (LMMs) para correlacionar o uso da terra (urbano, agrícola, florestal) com as concentrações de 39 micropoluentes, incluindo pesticidas, produtos farmacêuticos e químicos industriais.</p>	<p>produtos farmacêuticos e químicos industriais, enquanto o uso agrícola, especialmente cultivos permanentes e vegetais, se correlacionou com concentrações significativas de pesticidas. Áreas florestais mostraram impacto negativo nas concentrações de poluentes. Esses resultados destacam a necessidade de estratégias diferenciadas para gerenciar fontes pontuais e difusas de poluição.</p>
<p>Nura Bello, Nor Rohaizah Jamil, Ley Juen Looi e Keng Yap Ng.</p>	<p>Estimar a carga de poluentes em rios tropicais e projetar metas de redução de carga (LRT) para implementação do Total Maximum Daily Load</p>	<p>O estudo utilizou o Water Quality Analyser (WQA) para calcular a carga de poluentes e projetar metas de redução para parâmetros críticos como BOD, NH3 e TSS. Dados de fluxo</p>	<p>Os poluentes BOD, NH3 e TSS foram identificados como os mais críticos. Para restaurar o rio à classe II de qualidade da água, são necessárias reduções de</p>

	(TMDL), visando melhorar a gestão da qualidade da água.	contínuo e monitoramento intermitente foram usados para estimar as cargas diárias e determinar os TMDLs usando a abordagem de duração de carga.	carga de 3.898,88 kg/dia para BOD, 1.053,28 kg/dia para NH3 e 444.716,50 kg/dia para TSS. A ferramenta WQA demonstrou ser eficaz e econômica para estimativas de carga e projeções de metas de redução.
Thomas Service, Rachel Cassidy, Kevin Atcheson, Luke Farrow, Taylor Harrison, Paddy Jack, e Phil Jordan.	Desenvolver um fluxo de trabalho nacional de mapeamento de redes de canais e áreas hidrologicamente sensíveis (HSAs) com alta resolução, utilizando dados de LiDAR, para gerenciar a poluição difusa em paisagens agrícolas.	Dados de LiDAR de alta resolução foram usados para mapear redes de drenagem e identificar áreas de risco de escoamento em zonas agrícolas da Irlanda do Norte. Modelos topográficos e índices hidrológicos foram aplicados para calcular o índice topográfico de solo (STI) e definir áreas prioritárias para mitigação.	A rede de canais mapeada alcançou densidade de 5,39 km/km ² , significativamente superior aos 0,9 km/km ² anteriores. Foram identificados 249 km ² de HSAs, oferecendo mapas de risco precisos para agricultores e formuladores de políticas, contribuindo para a gestão eficaz da poluição agrícola difusa.
Dao Nguyen Khoi, Pham Thi Loi, Nguyen Thi Thuy Trang,	Avaliar separadamente e de forma conjunta os impactos da	O modelo SWAT foi utilizado para simular o impacto da	A variabilidade climática e o uso da terra contribuíram

<p>Nguyen Dinh Vuong, Shibo Fang, e Pham Thi Thao Nhi.</p>	<p>variabilidade climática e das mudanças no uso da terra (LUC) no fluxo de água e nas cargas de sedimentos e nutrientes na bacia dos rios Sesan, Sekong e Srepok (3SRB) durante o período de 1981–2010.</p>	<p>variabilidade climática e mudanças no uso da terra em diferentes cenários, analisando dados de precipitação, temperatura e mapas de uso da terra em períodos específicos. Foram calibrados e validados dados hidrológicos e de qualidade da água para avaliar variações nos parâmetros de fluxo, sedimentos e nutrientes.</p>	<p>para mudanças significativas no fluxo de água e nas cargas de nutrientes. A variabilidade climática resultou em aumento de 1,00% no fluxo de água e 11,35% na carga de nitrogênio total (T-N), mas redução de 19,12% na carga de fósforo total (T-P). As mudanças no uso da terra aumentaram as cargas de sedimentos (TSS) em 3,70% e de nitrogênio e fósforo em mais de 10%. O impacto combinado mostrou maiores aumentos em fluxo de água, TSS e T-N, mas redução geral de 10,35% em T-P.</p>
<p>L. Mejía e M. Barrios.</p>	<p>Identificar variáveis relevantes da bacia hidrográfica que expliquem os padrões de variabilidade espacial da</p>	<p>Foram analisadas 28 variáveis de uso e cobertura do solo, atributos hidrometeorológicos e pedotopográficos em 76 riachos</p>	<p>A variabilidade nos parâmetros de qualidade da água foi principalmente explicada por variáveis de</p>

	<p>qualidade da água de superfície em condições bioclimáticas neotropicais.</p>	<p>da bacia do rio La Vieja, Colômbia. O algoritmo de seleção iterativa de entrada (IIS) foi aplicado com base em modelos de árvores altamente randomizadas para avaliar as relações entre as variáveis da bacia e seis parâmetros de qualidade da água (pH, temperatura, oxigênio dissolvido, demanda química de oxigênio, condutividade elétrica e nitratos).</p>	<p>uso e cobertura do solo, com destaque para áreas florestais e agrícolas. Variáveis hidrometeorológicas também tiveram influência significativa em parâmetros como oxigênio dissolvido. As variáveis pedotopográficas apresentaram menor impacto geral. O estudo forneceu uma abordagem eficiente para compreender fontes difusas de poluição em bacias hidrográficas.</p>
<p>Malte Lorenz, Hong Quan Nguyen, Trong Dieu Hien Le, Stephanie Zeunert, Duc Huy Dang, Quang Dung Le, Huyen Le e Günter Meon.</p>	<p>Avaliar as mudanças na qualidade da água do estuário do rio Thi Vai, no sul do Vietnã, antes e após um grande escândalo de poluição industrial, identificando os principais impulsionadores da</p>	<p>Foram realizadas análises de tendências, análise de cluster e análise de componentes principais (PCA) em dados de qualidade da água observada ao longo de 15 anos (1999–2013). As parâmetros avaliados</p>	<p>Após a redução de emissões pontuais em 2008, houve melhorias significativas em parâmetros como OD e DBO, embora as concentrações elevadas de NO₂ tenham persistido em algumas áreas.</p>

	qualidade da água e propondo estratégias de gestão.	incluíram demanda biológica de oxigênio (BOD), oxigênio dissolvido (DO), nitrogênio amoniacal (NH ₄), nitrito (NO ₂) e nitrato (NO ₃).	A análise indicou que fontes pontuais e difusas, incluindo atividades industriais e agrícolas, continuam a impactar a qualidade da água, destacando a necessidade de estratégias de mitigação mais eficazes.
Daniela Junqueira Carvalho, Maria Elisa Leite Costa e Sergio Koide.	Avaliar a precisão na estimativa de cargas de poluição difusa em rios periurbanos com base em dados de monitoramento mensal, comparando com metodologias que utilizam monitoramento contínuo.	Foram coletados dados de qualidade da água e vazão em eventos de cheia e durante períodos secos entre 2019 e 2021 na bacia do Riacho Fundo, Distrito Federal, Brasil. Compararam as estimativas de carga utilizando curvas de classificação de emissões e monitoramento mensal para parâmetros como sólidos suspensos totais (TSS), demanda química de oxigênio (COD) e nutrientes.	Eventos de cheia aumentam significativamente de TSS e COD, enquanto a nitrogênio inorgânica (Inorg-N) foi mais elevada no período seco. Estimativas estabelecidas em monitoramento forneceram especificações mensais para nutrientes, mas subestimaram cargas de TSS e COD, desligaram que monitoramento contínuo para maior precisão.

<p>MV Bolgova, EV Zav'yalova, AV Zaitseva e NV Osipova.</p>	<p>Avaliar o escoamento difuso e a exportação de poluentes das áreas urbanas de Rostov, na bacia do Volga, para compreender melhor os impactos da urbanização na qualidade da água.</p>	<p>Utilizou-se o modelo SWMM (Storm Water Management Model) para simular o escoamento de águas pluviais e a dispersão de poluentes, com dados encontrados em pontos de monitoramento durante o período de derretimento de neve. Foram realizadas parcerias como DBO5, DQO, ferro total, produtos de petróleo, amônio, sulfatos, cloretos e matéria particulada.</p>	<p>O estudo revelou concentrações significativas de substâncias, como ferro total e produtos de petróleo, frequentemente excedendo os limites legais. A principal fonte de poluição foi atribuída à infraestrutura urbana envolvida, incluindo sistemas de esgoto pluvial e domésticos conectados. A modelagem mostrou que eventos de derretimento de neve diminuíram significativamente para o transporte de poluentes para corpos d'água, destacando a necessidade de melhorias na infraestrutura urbana e estratégias de mitigação.</p>
<p>Sean J. Zeigera, Marc R. Owenb, Robert T. Pavlowskyb</p>	<p>O estudo teve como objetivo utilizar o modelo SWAT para</p>	<p>O modelo SWAT foi calibrado e validado utilizando 25 anos de</p>	<p>O modelo identificou áreas críticas de carregamento de</p>

	<p>simular os impactos naturais (como o clima) e humanos (como o uso da terra) no fluxo de água, no transporte de sedimentos e na carga de nutrientes em uma bacia hidrográfica cárstica. Os subobjetivos incluíram realizar uma avaliação rigorosa do desempenho do modelo SWAT e identificar áreas críticas de carregamento de poluentes de fontes difusas em uma grande bacia cárstica nos EUA.</p>	<p>dados diários de fluxo de água coletados em sete estações de monitoramento. As contribuições de fluxo de nascentes foram incorporadas ao modelo como fontes pontuais baseadas na separação de fluxos de base. O desempenho do modelo foi avaliado usando critérios como viés percentual (PBIAS) e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), para diferentes escalas temporais (diárias, mensais e anuais). A simulação incluiu entradas de dados de uso da terra, clima, efluentes de estações de tratamento de esgoto e fluxos de nascentes.</p>	<p>sedimentos e nutrientes, destacando que o uso de pastagens foi responsável pela maior parte da carga de sedimentos (62%), nitrogênio total (75%) e fósforo total (66%).</p> <p>As estações de tratamento de esgoto contribuíram com cerca de 37% do fósforo total na saída da bacia, com maior impacto no sub-bacia Middle James River.</p> <p>Apesar de limitações na modelagem de fluxos diários, o desempenho do modelo foi satisfatório para escalas mensais e anuais, indicando que o SWAT pode ser uma ferramenta útil para planejar a gestão de recursos hídricos em bacias cársticas.</p>
--	--	--	--

<p>Erfan Permannoon, Mehdi Mazaheri, Siamak Amiri</p>	<p>O objetivo deste estudo é identificar fontes de poluição em rios utilizando uma solução analítica da equação de advecção-dispersão (ADE) no tempo inverso. O método proposto combina o método de quase-reversibilidade (QR) e a ferramenta de transformada de Fourier (FT), fornecendo uma abordagem inovadora para solucionar a ADE em fluxos unidimensionais e estacionários.</p>	<p>O estudo emprega o método QR com um termo de quarta ordem, que garante a estabilidade e a convergência das soluções no modelo inverso. A transformada de Fourier é utilizada para resolver analiticamente a ADE. Dois exemplos hipotéticos foram considerados para avaliar o desempenho do modelo analítico, incluindo condições simples e complexas, com e sem erros nos dados de entrada. O impacto do parâmetro de estabilidade ϵ foi analisado por meio de uma análise de sensibilidade.</p>	<p>O modelo analítico proposto demonstrou alta precisão na identificação de padrões de carga de poluentes, mesmo em condições com erros nos dados de entrada. A estabilidade da solução foi garantida pelo parâmetro ϵ, com valores ajustados para minimizar oscilações nos resultados. Em cenários complexos, o modelo apresentou desempenho robusto, reconstruindo padrões de concentração de poluentes com mínimas flutuações. A análise de sensibilidade mostrou que valores inadequados de ϵ podem causar instabilidade ou suavização excessiva, mas o</p>
---	--	---	---

			método de tentativa e erro foi eficaz para definir o valor ideal.
Deyvid Wavel Barreto Rosa, Camilla Vivian Porto Satler Hot, Isadora Teixeira Gomes, Diogo Ferreira Ventura, Talita Fernanda das Graças Silva, Joanne Chong, Damien Giurco, Nilo de Oliveira Nascimento	O objetivo deste estudo foi avaliar os impactos do desenvolvimento urbano na qualidade da água e demonstrar os benefícios potenciais das Infraestruturas Verde e Azul (GBI) para mitigar esses impactos em uma bacia hidrográfica periurbana. O estudo focou na construção de cenários alternativos para o desenvolvimento, analisando o custo-benefício de diferentes técnicas de Desenvolvimento de Impacto Reduzido (LID).	O modelo hidrológico e de qualidade da água da bacia do reservatório Vargem das Flores foi calibrado e validado no software SWMM, integrando fontes pontuais e difusas de poluição. Três cenários de uso e cobertura da terra (LULC) foram avaliados: atual, máximo desenvolvimento urbano (PDM) e um cenário futuro alternativo com a implementação de GBI. Foram simuladas combinações de dispositivos LID, incluindo células de biorretenção, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis, para	As células de biorretenção foram identificadas como a alternativa mais custo-efetiva, removendo 52% de sólidos suspensos totais (TSS), 19,5% de fósforo total (TP) e 17,1% de demanda química de oxigênio (COD). O cenário GBI manteve os níveis de carga de poluentes próximos aos cenários atuais, mesmo com aumento da urbanização, reduzindo o impacto das fontes de poluição difusa. Em comparação ao cenário PDM, o cenário GBI diminuiu significativamente a carga de TSS, COD e TP nos

		<p>tratar novas áreas impermeáveis.</p> <p>O desempenho foi analisado considerando a eficiência na remoção de poluentes (TSS, COD, TP) e os custos de implementação e manutenção.</p>	<p>principais tributários, mitigando o risco de assoreamento e eutrofização do reservatório.</p> <p>O estudo mostrou que a adoção de GBI é uma alternativa viável para gerenciar a poluição difusa e preservar a funcionalidade do reservatório como fonte de água para 600 mil pessoas.</p>
<p>Nasrin Alamdari, Peter Claggett, David J. Sample, Zachary M. Easton, Mohammad Nayeb Yazdi</p>	<p>O estudo avaliou os impactos combinados das mudanças climáticas e do uso/cobertura do solo (LULC) no escoamento e nas cargas de poluentes em uma bacia hidrográfica em rápido desenvolvimento no norte da Virgínia, EUA. Os objetivos específicos incluíram estimar o efeito isolado e conjunto dessas mudanças na</p>	<p>Foi utilizado o modelo SWMM (Storm Water Management Model) para simular o escoamento e as cargas de poluentes (sólidos suspensos totais, nitrogênio total e fósforo total).</p> <p>Dados climáticos foram obtidos de dois Modelos Climáticos Globais (GCMs) com cenários de emissões RCP 4.5 e 8.5.</p>	<p>Projeções indicaram que o aumento na impermeabilização da bacia (de 6,3% para 13,1%) devido ao desenvolvimento urbano aumentará significativamente o escoamento e as cargas de poluentes.</p> <p>Sob o cenário RCP 8.5 e a tendência histórica de LULC, o aumento combinado no</p>

	<p>hidrologia e qualidade da água, além de comparar os impactos relativos entre as alterações no LULC e o clima.</p>	<p>Cenários futuros de LULC foram gerados pelo Chesapeake Bay Land Change Model, incluindo conservação agrícola, conservação florestal, gestão do crescimento e tendência histórica.</p> <p>O modelo foi calibrado e validado com dados de medição de escoamento e qualidade da água.</p> <p>Simulações foram realizadas para o período base (1995–2020) e projeções futuras (2040–2065).</p>	<p>escoamento, TSS, TN e TP foi de 67,6%, 66,7%, 63,4% e 69,4%, respectivamente.</p> <p>O LULC teve maior impacto no aumento do escoamento e das cargas de poluentes do que o clima isolado.</p> <p>A combinação de mudanças climáticas e de LULC amplificou os impactos em comparação com os efeitos isolados de cada fator.</p> <p>As alterações projetadas indicam desafios para esforços de restauração de bacias hidrográficas, destacando a necessidade de estratégias robustas de mitigação, como práticas de manejo sustentável.</p>
--	--	---	--

<p>Ji-Yun Jang, Dae-Woong Kim, Ye-Ji Choi and Dong-Woo Jang</p>	<p>O estudo teve como objetivo analisar as características da qualidade da água e as fontes de poluição no córrego Gul-po, uma área urbana sujeita ao programa de carga diária máxima total (TMDL) na Coreia do Sul. O foco foi na utilização da relação carga de poluente–vazão e da curva de duração de carga (LDC) para propor medidas eficazes de gerenciamento da qualidade da água.</p>	<p>Dados de qualidade da água e vazão foram coletados de 2016 a 2020 em três pontos do córrego Gul-po. Foram avaliados parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (BOD), demanda química de oxigênio (COD), carbono orgânico total (TOC), sólidos suspensos (SS), nitrogênio total (T-N) e fósforo total (T-P). A relação carga de poluente–vazão foi derivada com base nos dados para entender como as cargas de poluentes variam em diferentes condições de fluxo. A LDC foi utilizada para identificar se a qualidade da água atendia aos padrões-alvo em diferentes condições de</p>	<p>A qualidade da água melhorou nas partes superior e média do córrego após a implementação do projeto de fornecimento de água tratada com ozônio em 2019, embora o T-N tenha aumentado devido à alta concentração de nitrogênio na água tratada. A equação de carga de poluente–vazão mostrou que: Na parte superior, a maioria dos poluentes (exceto T-N) diminuiu à medida que o fluxo aumentou, indicando maior influência de fontes pontuais. Nas partes média e inferior, as concentrações de poluentes aumentaram com o fluxo, revelando influência significativa de fontes não</p>
---	---	--	--

		<p>fluxo, distinguindo fontes pontuais e não pontuais de poluição.</p>	<p>pontuais durante períodos de chuva.</p> <p>A análise da LDC indicou que a qualidade da água foi geralmente satisfatória na parte superior, mas as partes média e inferior apresentaram taxas de excedência em fluxos altos, especialmente para BOD, devido à poluição de áreas urbanas e agrícolas próximas.</p> <p>A gestão diferenciada da qualidade da água é necessária: fontes pontuais devem ser priorizadas na parte superior, enquanto fontes não pontuais requerem atenção nas partes média e inferior.</p>
--	--	--	---

<p>Talita Fernanda das Graças Silva, Diana Beltrán, Nilo de Oliveira Nascimento, Juan Pablo Rodríguez & Nestor Mancipe-Muñoz</p>	<p>O objetivo do estudo foi avaliar os principais fatores que influenciam a qualidade da água de escoamento em duas bacias urbanas tropicais, localizadas na Colômbia e no Brasil. Para isso, foram aplicadas análises de correlação e análise de componentes principais (PCA) para explorar as relações entre parâmetros de qualidade da água, características de eventos de chuva e variáveis meteorológicas.</p>	<p>A coleta de dados foi realizada em duas bacias urbanas: uma em Bogotá, Colômbia, e outra em Belo Horizonte, Brasil. Foram monitorados parâmetros de qualidade da água, como sólidos suspensos totais (TSS), fósforo total (TP), nitrogênio total Kjeldahl (TKN) e carbono orgânico total (TOC). Também foram analisados dados meteorológicos (temperatura do ar, radiação solar) e características de eventos de chuva (profundidade, intensidade, duração e descarga máxima específica). A análise estatística incluiu o uso de correlação de Spearman para identificar associações entre as variáveis e PCA para</p>	<p>Correlações: Altas correlações foram observadas entre TSS e TP, indicando que o fósforo está majoritariamente na forma particulada, associado ao transporte de sedimentos. TKN e TOC apresentaram forte correlação, sugerindo fontes pontuais de poluição, como descargas inadequadas de esgoto. Componentes Principais: O primeiro componente principal (RC1) indicou a influência de variáveis meteorológicas, como temperatura do ar e radiação solar, na adsorção de fósforo em sedimentos. O segundo componente (RC3) associou TKN e TOC a</p>
--	---	---	--

		<p>determinar os principais componentes que explicam a variabilidade da qualidade da água.</p>	<p>fontes pontuais de poluição, mostrando um efeito de diluição em eventos de chuva mais intensos.</p> <p>O terceiro componente (RC5) relacionou TSS e TP a fontes difusas, destacando o transporte de sedimentos durante eventos de alta descarga.</p> <p>Implicações:</p> <p>Ambos os tipos de poluição, pontual e difusa, foram identificados nas bacias estudadas.</p> <p>O estudo destaca a necessidade de incluir variáveis meteorológicas em modelos de qualidade de água e propõe melhorias no monitoramento e gestão de águas pluviais urbanas.</p>
--	--	--	--

<p>Sania El-Nakib, Ibrahim Alameddine, May Massoud, Majdi Abou Najm</p>	<p>O estudo teve como objetivo determinar a contribuição relativa de cargas de poluentes provenientes de fontes pontuais e difusas na bacia do rio Beirute, um rio sazonal mediterrâneo. Além disso, buscou-se desenvolver um modelo para estimar e compreender a dinâmica das cargas de nutrientes, incluindo nitrogênio total (TN), fósforo total (TP) e sólidos suspensos totais (TSS), em bacias hidrográficas pouco monitoradas.</p>	<p>Amostras de qualidade da água foram coletadas semanalmente durante dois anos consecutivos (2016 e 2017) em quatro pontos representativos do gradiente de urbanização da bacia. Modelos de regressão foram utilizados para prever as concentrações de TN, TP e TSS em função do fluxo e da sazonalidade. Foi aplicado o método de razão de Beale para estimar as cargas totais de poluentes, complementando os modelos de regressão. O modelo geoespacial OpenNSPECT foi usado para calcular as cargas de fontes difusas de poluentes e correlacioná-las com o uso e</p>	<p>Fontes pontuais foram responsáveis pela maior parte da poluição ao longo de toda a bacia, variando de 75% nas cabeceiras florestadas a 98% nas seções urbanizadas a jusante. As estimativas das cargas anuais de TN e TP mostraram um aumento significativo a jusante, com as maiores cargas registradas nos trechos urbanos da bacia. As áreas urbanas e industriais foram identificadas como os principais contribuintes de poluição, destacando a relevância da descarga de esgoto doméstico e industrial não tratado.</p>
---	---	--	--

		cobertura do solo nas sub-bacias.	As fontes difusas foram responsáveis por uma pequena parcela das cargas totais de poluentes, exceto nas áreas de cabeceira, onde chegaram a representar até 25% das cargas de TP. A urbanização intensiva foi associada a altas cargas de poluentes por área, enquanto áreas florestadas apresentaram as menores contribuições por quilômetro quadrado.
Guan-Zhou Lin, Shao-Yiu Hsu, Chia-Chun Ho, Chi-Feng Chen, Jr-Chuan Huang, Tsung-Yu Lee	O estudo teve como objetivo aplicar o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simular os fluxos de nitrato (NO ₃ -N), a produção de chá e o ciclo de nitrogênio em fazendas de chá situadas em bacias subtropicais	O estudo foi realizado na bacia hidrográfica de Ping-Lin (PLW), subdividida em 12 sub-bacias. Dados meteorológicos, de uso do solo e de qualidade da água foram utilizados para configurar e calibrar o modelo SWAT.	Perda de Nitrogênio e Eficiência da Fertilização: Fazendas de chá apresentaram baixa eficiência na utilização de fertilizantes (47% do nitrogênio aplicado foi absorvido pelas plantas).

	<p>montanhosas de Taiwan. Além disso, avaliou a eficácia de práticas agrícolas sustentáveis (SAPs) projetadas para reduzir a perda de nitrogênio e aumentar sua absorção pelas plantas de chá.</p>	<p>Amostras de água foram coletadas e analisadas quanto ao conteúdo de nitrato em pontos representativos da bacia entre 2012 e 2014.</p> <p>Foram simulados fluxos de nitrato, produtividade do chá e o balanço de nitrogênio no solo, considerando práticas agrícolas convencionais e uma estratégia modificada de fertilização.</p>	<p>Cerca de 50% do nitrogênio aplicado foi perdido para o solo, água subterrânea e fluxo superficial.</p> <p>Impacto do Uso do Solo:</p> <p>Fazendas de chá contribuíram com 47 kg/ha/ano de nitrato para os fluxos de água, aproximadamente 9 vezes mais que florestas (5,1 kg/ha/ano).</p> <p>Fluxos de nitrato foram maiores nas sub-bacias com maior percentual de terras ocupadas por fazendas de chá.</p> <p>Eficácia de SAPs:</p> <p>A adoção de uma estratégia de fertilização modificada (aplicação em eventos de baixa chuva) aumentou a</p>
--	--	---	--

			<p>absorção de nitrogênio em 14%, reduziu a perda de nitrogênio em 10% e aumentou a produtividade do chá em 4%.</p> <p>A perda de nitrogênio em fluxos superficiais foi reduzida em 75%, em fluxos laterais em 36%, e em percolação para o solo em 50%.</p>
<p>Angela-Sanoh Tawan, Teck-Yee Ling, Lee Nyanti, Siong-Fong Sim, Jongkar Grinang, Chen-Lin Soo, Karen-Suan-Ping Lee, Tonny Ganyai²</p>	<p>O estudo teve como objetivo determinar a qualidade da água e estimar a carga de poluentes no rio Rajang e seus afluentes na área de Pelagus, avaliada sob variações sazonais e influências da regulação do rio causada pela operação do reservatório hidrelétrico de Bakun.</p>	<p>Foram realizadas coletas em 11 estações ao longo do rio Rajang e seus afluentes, em três períodos distintos: julho de 2015 (estação seca, com o vertedouro aberto), janeiro de 2016 (estação chuvosa, com o vertedouro fechado) e março de 2016 (estação chuvosa, com o vertedouro aberto).</p>	<p>Qualidade da Água:</p> <p>A qualidade da água se deteriorou durante a estação chuvosa devido ao aumento de sólidos suspensos causados pela erosão do solo, especialmente nas áreas próximas a atividades de desmatamento e plantações de óleo de palma.</p>

		<p>Parâmetros in situ como temperatura, pH, turbidez e oxigênio dissolvido (DO) foram medidos, além da coleta de amostras para análises laboratoriais de sólidos suspensos totais (TSS), demanda bioquímica de oxigênio (BOD5) e nutrientes (amônia, nitrito, nitrato e nitrogênio orgânico).</p> <p>O índice de qualidade da água (WQI) foi calculado utilizando os parâmetros medidos, conforme normas do Departamento de Meio Ambiente da Malásia (DOE).</p> <p>A carga de poluentes foi estimada com base nos dados de descarga do rio e nas concentrações médias dos poluentes.</p>	<p>Os níveis de DO foram críticos durante o fechamento do vertedouro, caindo abaixo de 5 mg/L em trechos até 204 km a jusante da barragem de Bakun.</p> <p>Carga de Poluentes:</p> <p>Durante a estação chuvosa, as cargas de TSS atingiram 945.763 Mg/dia, destacando o impacto das chuvas intensas e do escoamento superficial na carga de sedimentos.</p> <p>As cargas de nutrientes (amônia e nitrogênio orgânico) foram mais elevadas nos períodos de chuva, devido ao aumento do escoamento agrícola e doméstico.</p>
--	--	--	---

			<p>Classificação da Qualidade da Água:</p> <p>Durante a estação seca, 91% dos locais monitorados foram classificados como Classe II. Durante a estação chuvosa, essa porcentagem caiu para 64–82%, refletindo a piora na qualidade da água.</p> <p>Impacto da Barragem de Bakun:</p> <p>A operação da barragem influenciou significativamente a qualidade da água a jusante. O fechamento do vertedouro reduziu a oxigenação da água, enquanto a abertura do vertedouro contribuiu para uma melhora dos níveis de DO.</p>
--	--	--	---

<p>Ayşe Muhammetoğlu, Pelin Orhan, Ozgun Akdegirmen, Secil Tuzun Dugan, Habib Muhammetoğlu</p>	<p>O estudo propôs a aplicação integrada dos modelos MapShed e WASP8 para avaliar práticas de manejo sustentável (BMPs) destinadas a melhorar a qualidade da água em riachos, com foco na redução de sedimentos, nitrogênio (N) e fósforo (P) em uma bacia hidrográfica no sul da Turquia.</p>	<p>Área de Estudo: A bacia do riacho Acisu foi selecionada, caracterizada por intensa atividade agrícola e urbana.</p> <p>Monitoramento: Realizou-se o monitoramento mensal de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos durante um ano.</p> <p>Modelagem Integrada: O modelo hidrológico MapShed foi calibrado e validado para estimar cargas de sedimentos e nutrientes provenientes de fontes difusas.</p> <p>Esses dados foram usados como entrada para o modelo WASP8, que simulou a qualidade da água, incorporando fontes pontuais e difusas.</p> <p>Cenários de manejo (S1, S2, S3) foram criados para avaliar a</p>	<p>Eficácia das BMPs:</p> <p>S1 (gestão de pastagens e resíduos animais): Reduziu as cargas de nitrogênio total (TN) e fósforo total (TP) em 43% e 34%, respectivamente, em áreas de pastagem, e em 61,5% e 57,9% de resíduos animais. Contudo, o impacto na redução total da bacia foi modesto (4%).</p> <p>S2 (práticas agrícolas sustentáveis): Reduziu as cargas de TN e TP em 46% e 30% nas áreas agrícolas, com reduções totais na bacia de 31,2% e 24,8%.</p> <p>S3 (combinação de S1 e S2): Foi o mais eficaz, reduzindo 35% de TN e 29% de TP nas cargas totais da bacia.</p>
--	--	---	--

		<p>eficácia de BMPs em áreas agrícolas e de pastagem, além de cenários para controle de descargas de estações de tratamento de esgoto (WWTPs).</p>	<p>Controle de Descargas Pontuais:</p> <p>A redução de 25% nas descargas de WWTPs (S4) teve impacto limitado.</p> <p>Um novo WWTP (S5) aumentou concentrações de BOD5, TN e TP devido à mudança de localização das descargas.</p> <p>Impacto Geral: As práticas propostas demonstraram eficiência na redução de poluentes, especialmente durante períodos de alta precipitação, mas ressaltaram a importância de abordagens integradas para manejo de bacias hidrográficas.</p>
Abdullah Al Masum, Nathan Bettman, Scott Read, Markus	O estudo teve como objetivo comparar estimativas de	Classificação de Uso do Solo com GIS:	Estimativas de GIS:

<p>Hecker, Markus Brinkmann, Kerry McPhedran</p>	<p>cargas de poluentes provenientes do escoamento de águas pluviais urbanas usando duas abordagens: (i) modelagem baseada em classificações de uso do solo via GIS (estudo "desktop") e (ii) estimativas baseadas em amostragem real de saídas de escoamento (estudo de "monitoramento"). O foco foi avaliar áreas de captação de águas pluviais em Saskatoon, Canadá, e os impactos dessas cargas no rio South Saskatchewan.</p>	<p>As áreas de captação foram classificadas em oito categorias de uso do solo utilizando ferramentas de GIS, como Google Earth Pro e ArcGIS. As cargas de poluentes foram estimadas combinando concentrações médias de poluentes por área (SMC) com dados de precipitação local. Estudo Baseado em Amostragem: Amostras de águas pluviais foram coletadas em sete saídas de escoamento durante quatro eventos de chuva no verão de 2018. Parâmetros analisados incluíram sólidos suspensos totais (TSS), demanda química de oxigênio (COD), metais (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni) e</p>	<p>A área de captação Preston Crossing foi identificada como a maior fonte de TSS e COD, representando 42–44% das cargas totais estimadas para as áreas estudadas. As áreas industriais contribuíram proporcionalmente com cargas mais elevadas, enquanto áreas verdes apresentaram as menores cargas. Monitoramento Baseado em Amostragem: As cargas totais para TSS e COD baseadas em amostragem foram de 835.700 kg e 1.568.400 kg, respectivamente, sendo Preston Crossing também a maior fonte de poluição.</p>
--	---	---	--

		<p>hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs).</p> <p>Comparação das Abordagens:</p> <p>As cargas de poluentes estimadas via GIS foram comparadas com as cargas obtidas pelo monitoramento em campo para avaliar diferenças e identificar os fatores que impactam as estimativas.</p>	<p>Os resultados mostraram variação significativa nas concentrações entre os pontos monitorados, refletindo as características específicas de uso do solo em cada área.</p> <p>Comparação entre Métodos:</p> <p>Diferenças entre as estimativas de GIS e de amostragem variaram de 29% a 156% para os poluentes avaliados.</p> <p>As estimativas baseadas em GIS foram consideradas razoáveis como aproximações iniciais, mas destacaram a necessidade de validação com dados reais para maior precisão.</p> <p>Implicações:</p>
--	--	---	--

			O estudo ressaltou a importância de monitorar saídas específicas de escoamento e integrar abordagens de modelagem e amostragem para desenvolver estratégias eficazes de tratamento e mitigação de poluentes em águas pluviais urbanas.
Zelalem Abera Angello, Beshah M. Behailu, Jens Tränckner	O estudo teve como objetivo aplicar o modelo QUAL2Kw para avaliar diferentes cenários de redução de carga poluente e melhoria da qualidade da água no rio Little Akaki, na Etiópia. O foco foi identificar as abordagens mais eficazes para controlar a poluição e atender aos objetivos de qualidade da água (WQO) na bacia hidrográfica.	Modelo Utilizado: O QUAL2Kw foi empregado como uma ferramenta para simular o transporte e a dinâmica de poluentes no rio. Cenários Avaliados: S1: Redução de cargas de fontes pontuais (e.g., estações de tratamento de esgoto). S2: Redução de cargas de fontes difusas (e.g., escoamento agrícola e urbano).	Desempenho dos Cenários: S1 reduziu a BOD em 17,7%, mas não alcançou os WQOs para BOD e PO4-P. S2 apresentou maior redução de poluentes (BOD: 58,7%; NO3-N: 51%; PO4-P: 30,9%), mas também não atendeu aos WQOs. S3 alcançou uma redução significativa de BOD (76,4%),

		<p>S3: Redução simultânea de cargas de fontes pontuais e difusas.</p> <p>S4: Aplicação de medidas in-stream, como rampas de rocha em cascata para oxigenação local.</p> <p>S5: Cenário integrado combinando as abordagens anteriores.</p> <p>Parâmetros Monitorados: Oxigênio dissolvido (DO), demanda bioquímica de oxigênio (BOD), nitrato (NO₃-N) e fósforo (PO₄-P).</p> <p>Análise: O modelo foi calibrado e validado utilizando dados coletados de 22 estações ao longo do rio, e a sensibilidade de parâmetros chave foi analisada.</p>	<p>mas ainda ficou abaixo dos WQOs para PO₄-P.</p> <p>S4, com medidas in-stream, reduziu a BOD em 51,5%, mas foi insuficiente para atender aos WQOs.</p> <p>S5 foi o mais eficaz, com redução de BOD (87,8%), NO₃-N (55,6%) e PO₄-P (53,7%), embora ainda não tenha atendido totalmente aos padrões exigidos.</p> <p>Conclusões:</p> <p>A poluição do rio é fortemente influenciada por fontes difusas, e medidas integradas (pontos e difusas) são essenciais.</p> <p>Medidas in-stream são complementares, mas não suficientes isoladamente.</p>
--	--	---	---

			Para atingir os WQOs, uma combinação de redução de carga pontual e difusa com medidas in-stream é recomendada.
Semaria Moga Lencha, Mihret Dananto Ulsido, Jens Tränckner	O artigo visa determinar as cargas anuais de poluentes provenientes de fontes pontuais e difusas, além de águas pluviais, para a bacia hidrográfica do Lago Hawassa, na Etiópia. O estudo também busca identificar áreas críticas de fluxo de poluição e calibrar coeficientes de exportação de poluentes para a região, utilizando modelos como PLOAD, SWAT, FLUX32, HEC-GeoHMS e SCS-CN integrados com dados de monitoramento.	Foram coletadas e analisadas amostras de água, águas residuais e águas pluviais em estações de monitoramento da bacia hidrográfica. O modelo SWAT foi utilizado para simular os fluxos nos sub-bacias e os dados de poluentes foram integrados no FLUX32 para estimativa de cargas de poluentes. A análise das águas pluviais urbanas foi realizada utilizando o método SCS-CN. O modelo PLOAD foi calibrado utilizando coeficientes de exportação de poluentes com base em dados locais e	As maiores cargas de poluentes foram observadas no ponto de monitoramento MS6, localizado a jusante, recebendo contribuições de fontes pontuais como fábricas e de águas pluviais urbanas. A carga de poluição por fontes difusas foi significativa nas áreas de uso agrícola, com destaque para as sub-bacias superiores. Fontes pontuais, como a indústria de bebidas e o parque industrial de Hawassa, foram identificadas como principais contribuintes

		<p>validações foram feitas para garantir a precisão das estimativas.</p>	<p>de carga de poluentes, com desafios relacionados à falta de tratamento adequado de efluentes.</p> <p>A integração dos modelos permitiu identificar áreas críticas e fornecer subsídios para o manejo sustentável da qualidade da água na bacia.</p>
<p>Mridul Trehan, Wendelin Wichtmann, Mateusz Grygoruk</p>	<p>O estudo teve como objetivo avaliar as cargas de nitrogênio geradas por atividades agrícolas na bacia hidrográfica do rio Ryck, no nordeste da Alemanha, e propor soluções para reduzir essas cargas, como a restauração de zonas úmidas tamponadoras (WBZs), contribuindo para melhorar a qualidade da água no rio Ryck e no Mar Báltico.</p>	<p>Modelagem Empírica:</p> <p>Um modelo empírico foi usado para estimar a perda total de nitrogênio proveniente das atividades agrícolas na bacia hidrográfica, considerando dados sobre precipitação, escoamento e uso do solo.</p> <p>O modelo foi calibrado e validado com dados de monitoramento de qualidade da água coletados no local.</p>	<p>Cargas de Nitrogênio:</p> <p>O modelo estimou uma perda média anual de nitrogênio de 14,7 kg/ha/ano na bacia hidrográfica do Ryck, sendo 3,1 kg/ha/ano atribuídos ao uso agrícola em áreas de turfeiras degradadas.</p> <p>Validação do Modelo:</p> <p>Após calibração, o modelo apresentou uma boa correspondência com os dados de monitoramento,</p>

		<p>Proposta de Zonas Úmidas Tamponadoras:</p> <p>Critérios específicos foram usados para identificar 13 locais adequados para criação de WBZs em sub-bacias do Ryck. Esses critérios incluíram localização em áreas de menor elevação e potencial para interceptar escoamento de áreas agrícolas.</p> <p>Eficiência das WBZs:</p> <p>A eficiência de remoção de nitrogênio das WBZs foi calculada para uma sub-bacia, com base em dados do modelo e taxas de eficiência reportadas na literatura.</p>	<p>indicando adequação para estimar perdas de nitrogênio no Ryck.</p> <p>Propostas de WBZs:</p> <p>Os 13 locais propostos abrangem uma área total de 155 ha, representando 0,65% da bacia e cerca de 4% das turfeiras.</p> <p>A eficiência média de remoção de nitrogênio pelas WBZs foi estimada em 43%, com um intervalo de remoção de 1.267 a 7.113 kg/ano, dependendo das condições locais.</p> <p>Impacto Potencial:</p> <p>A conversão de turfeiras para WBZs foi identificada como uma medida eficaz para reduzir cargas de nitrogênio e melhorar a qualidade da</p>
--	--	---	---

			<p>água. Outras ações recomendadas incluem a redução do uso de fertilizantes e a reidratação de turfeiras para minimizar a mineralização.</p>
<p>Maoqing Duan, Qi Liu, Yu Zhang, Feiyan Yuan, Xianzhi Meng, Shilu Zhang and Jun Zhang</p>	<p>O estudo teve como objetivo propor e aplicar um método de estimativa de fluxos de poluição ambiental de fundo em rios de áreas de nascente florestais no nordeste da China. O foco foi fornecer uma estratégia eficaz para estimar cargas de poluentes de fundo em áreas com dados limitados ou ausentes, além de fornecer uma base teórica para a formulação de um sistema de avaliação ambiental baseado em valores de fundo.</p>	<p>Experimentos in situ: Experimentos de imersão e lixiviação foram conduzidos nas camadas de húmus do solo e de folhiço em floresta para determinar a concentração máxima possível de poluentes (COD, CODMn, NH₄-N). Um experimento de chuva natural foi realizado para avaliar os processos de perda e lixiviação de poluentes para os rios. Modelagem Estatística e Empírica:</p>	<p>Perdas de Poluentes: A camada de folhiço apresentou concentrações mais altas de poluentes (média de 736,5 mg/L para COD) em comparação com a camada de húmus do solo (média de 247,5 mg/L para COD). Os coeficientes de lixiviação variaram de 0,23 a 0,72 para os diferentes parâmetros analisados. Estimativas de Fluxos de Poluentes:</p>

		<p>Um modelo de coeficiente de saída foi utilizado para estimar os poluentes não pontuais, baseado em análises estatísticas de dados de hidrologia, qualidade da água e precipitação.</p> <p>Para estimar os fluxos de poluentes em larga escala, foram combinados o modelo de coeficiente de saída aprimorado e a equação universal de perda de solo.</p> <p>Validação: Os resultados do modelo foram validados com dados coletados in situ na bacia hidrográfica do Rio Kamalan, utilizando medições de qualidade da água e quantidade de fluxo em pontos específicos.</p>	<p>Os fluxos anuais estimados de COD, CODMn e NH4-N no Rio Kamalan foram 2338,7 t, 877 t e 12,7 t, respectivamente, utilizando o modelo de coeficiente de saída aprimorado.</p> <p>Validação e Aplicação: Os resultados do modelo apresentaram erro relativo de 14,1% a 30% em relação aos dados medidos, demonstrando sua aplicabilidade em áreas remotas e com poucos dados. O estudo fornece uma abordagem viável para avaliar poluentes de fundo e apoiar a gestão de qualidade da água em áreas naturais de nascente.</p>
--	--	--	--