

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Engenharias
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Mestrado em Ciências Ambientais



Dissertação

QUALIDADE DA ÁGUA DOS RIOS NO BRASIL: Uma Abordagem Socioambiental

Roseane Borba dos Santos Cruz

Pelotas, 2024

Roseane Borba dos Santos Cruz

QUALIDADE DA ÁGUA DOS RIOS NO BRASIL: Uma Abordagem Socioambiental

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestra em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Pascal Silas Thue

Coorientador: Dr. Everton Anger Cavalheiro

Coorientadora: Dr^a. Rubia Flores Ramoni

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

C955q Cruz, Roseane Borba dos Santos

Qualidade da água dos rios no Brasil [recurso eletrônico] : uma abordagem socioambiental / Roseane Borba dos Santos Cruz ; Pascal Silas Thue, orientador ; Everton Anger Cavalheiro, Rubia Flores Ramoni, coorientadores. — Pelotas, 2024.

137 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Crescimento econômico. 2. Qualidade da água. 3. Poluição ambiental. 4. Saneamento básico. I. Thue, Pascal Silas, orient. II. Cavalheiro, Everton Anger, coorient. III. Ramoni, Rubia Flores, coorient. IV. Título.

CDD 363.7



DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aluno	22100975 - ROSEANE BORBA DOS SANTOS CRUZ		
CPF	06111067362	Nacionalidade	BRASILEIRA
Naturalidade			
Ingresso	SELEÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO - 2022/1		
Programa	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS		
Curso	7071 - CIÊNCIAS AMBIENTAIS	Nível	MESTRADO ACADÊMICO
Modalidade	PRESENCIAL		

Dados pessoais dos membros da banca examinadora

Nome completo	Documento	Nasc	Titulação		
			Área	Local	Ano
PASCAL SILAS THUE	87510561000	1984	QUÍMICA	UFRGS	2017
EVERTON ANGER CAVALHEIRO	93395507068	1979	ADMINISTRAÇÃO	UFSC	2015
RUBIA FLORES ROMANI	00241047013	1979	ENGENHARIA QUÍMICA	UFSC	2012
ROBSON ANDREAZZA	95375236087	1979	CIÊNCIA DO SOLO	UFRGS	2009
ERICO KUNDE CORREA	62023730082	1970	BIOTECNOLOGIA	UFPEL	2007
LEONARDO BTEMPS KONTZ	8048337805	1978	ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS	UNISINOS	2021

Membros da banca examinadora	Título	Assinatura
87510561000 - PASCAL SILAS THUE	DOUTORADO	
93395507068 - EVERTON ANGER CAVALHEIRO	DOUTORADO	
00241047013 - RUBIA FLORES ROMANI	DOUTORADO	
95375236087 - ROBSON ANDREAZZA	DOUTORADO	
62023730082 - ERICO KUNDE CORREA	DOUTORADO	
8048337805 - LEONARDO BTEMPS KONTZ	DOUTORADO	

Ao(s) **29** dia(s) do mês de **julho** de **2024** os membros acima nomeados para a defesa da DISSERTAÇÃO do estudante ROSEANE BORBA DOS SANTOS CRUZ matriculado no PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, consideram **APROVADO** estabelecendo o título definitivo da DISSERTAÇÃO como sendo "**QUALIDADE DA ÁGUA DOS RIOS NO BRASIL: Uma Abordagem Socioambiental**", e estabelecendo um prazo máximo de **60** dia(s) para as correções e entrega da versão definitiva.

Eu, **PASCAL SILAS THUE**, atesto que o(s) membro(s) da banca listado(s) acima sem assinatura participou/aram da sessão de forma remota e/ou por parecer.

PASCAL SILAS THUE

Presidente da Banca

Roseane Borba dos Santos Cruz

QUALIDADE DA ÁGUA DOS RIOS NO BRASIL: Uma Abordagem Socioambiental

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas-RS.

Data da Defesa: 29/ 07/ 2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pascal Silas Thue (Titular) Doutor em PPGQ/UFRGS pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Orientador).

Prof. Dr. Everton Anger Cavalheiro Doutor em Administração pela Universidade Federal de Santa Maria (Coorientador).

Prof. Dr^a. Rubia Flores Ramoni (Titular) Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina (Coorientadora).

Prof. Dr. Robson Andreazza (Titular) Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Leonardo Betemps Kontz (Avaliador Externo). Doutor em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e discernimento concedidos ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença constante me proporcionou a motivação necessária para superar os desafios e concluir esta dissertação. Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Everton Anger Cavalheiro. Sua orientação incansável, apoio contínuo e paciência foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por suas valiosas sugestões, críticas construtivas e pelo incentivo constante. Sua dedicação e compromisso com a excelência acadêmica foram inspirações que me guiaram durante todo o processo.

Agradeço também à minha família, por seu amor incondicional, paciência e suporte inabalável. Vocês foram meu alicerce em momentos de dificuldade e celebração, e sem vocês, este sonho não teria sido possível. Obrigado por acreditarem em mim e por sempre estarem ao meu lado, oferecendo palavras de encorajamento e compreensão. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento. Seja através de discussões acadêmicas, apoio emocional ou companheirismo, cada um de vocês teve um papel importante na conclusão desta dissertação. Finalmente, agradeço aos amigos e colegas, que compartilharam esta jornada comigo. Suas companhias tornaram esta experiência mais leve e enriquecedora. Finalmente, expresso minha gratidão à Banca Examinadora pela análise criteriosa e contribuição para a validação deste trabalho.

A todos, meu muito obrigado.

Resumo

Esta dissertação aborda a interação entre crescimento econômico, infraestrutura de saneamento básico, legislação ambiental e qualidade da água dos rios no contexto brasileiro. Por meio de três estudos distintos, investiga-se como o crescimento econômico e populacional influenciam a poluição hídrica, o papel da legislação ambiental na melhoria da infraestrutura de saneamento e os impactos dessas variáveis na incidência de doenças de veiculação hídrica. O primeiro estudo examina a relação entre o crescimento econômico, medido pelo Produto Interno Bruto (PIB) per capita, e a poluição dos rios, usando a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) como indicador de poluição. Realizado em 950 municípios brasileiros em 2020, o estudo revela que regiões mais desenvolvidas tendem a enfrentar níveis mais elevados de poluição devido a atividades industriais e urbanas concentradas. Por outro lado, áreas menos desenvolvidas sofrem com desafios na melhoria da infraestrutura de saneamento básico, contribuindo para a degradação hídrica. O estudo identifica pontos de inflexão na relação entre PIB per capita e poluição dos rios, sugerindo estágios específicos de desenvolvimento que demandam medidas de preservação ambiental. O segundo estudo investiga a relação entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e variáveis econômicas e populacionais de 2008 a 2020 em 73 municípios brasileiros. Utilizando técnicas como o Teste de Cointegração de Pedroni e o teste de causalidade de Granger, o estudo evidencia uma forte relação de longo prazo entre a DBO e o PIB agropecuário per capita, o PIB industrial per capita e a população. Os resultados destacam a influência significativa da produção industrial, agrícola e do crescimento populacional na qualidade da água dos rios, sugerindo a necessidade de políticas que promovam o crescimento econômico sustentável e o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos. O terceiro e último estudo investiga a influência da legislação ambiental municipal e da infraestrutura de saneamento básico na qualidade da água dos rios e na incidência de doenças de veiculação hídrica em 1.048 municípios brasileiros em 2020, utilizando Modelagem de Equações Estruturais (SEM). Os resultados indicam que melhorias na infraestrutura de saneamento básico reduzem as doenças de veiculação hídrica e estão associadas à redução da poluição hídrica. A qualidade da água dos rios é influenciada por legislações ambientais mais rigorosas, que medeiam a relação entre infraestrutura de saneamento e saúde pública. O estudo destaca a importância de políticas integradas que promovam desenvolvimento sustentável e gestão eficiente dos recursos hídricos. As conclusões destes três estudos destacam a necessidade de investimentos em infraestrutura de saneamento básico, especialmente em áreas menos desenvolvidas, e de regulamentações ambientais que equilibrem crescimento econômico com conservação ambiental. Os resultados têm implicações para a formulação de políticas públicas direcionadas à gestão sustentável dos recursos hídricos e ao desenvolvimento socioeconômico do país.

Palavras-Chaves: Crescimento Econômico; Qualidade da Água; Poluição Ambiental; Saneamento Básico

Abstract

This dissertation addresses the interaction between economic growth, basic sanitation infrastructure, environmental legislation, and river water quality in the Brazilian context. Through three distinct studies, we investigate how economic and population growth influence water pollution, the role of environmental legislation in improving sanitation infrastructure, and the impacts of these variables on the incidence of waterborne diseases. The first study examines the relationship between economic growth, measured by Gross Domestic Product (GDP) per capita, and river pollution, using Biochemical Oxygen Demand (BOD) as an indicator of pollution. Conducted in 950 Brazilian municipalities in 2020, the study reveals that more developed regions tend to face higher levels of pollution due to concentrated industrial and urban activities. On the other hand, less developed areas face challenges in improving basic sanitation infrastructure, contributing to water degradation. The study identifies turning points in the relationship between GDP per capita and river pollution, suggesting specific stages of development that require environmental preservation measures. The second study investigates the relationship between Biochemical Oxygen Demand (BOD) and economic and population variables from 2008 to 2020 in 73 Brazilian municipalities. Using techniques such as the Pedroni Cointegration Test and the Granger causality test, the study shows a strong long-term relationship between BOD and agricultural GDP per capita, industrial GDP per capita and population. The results highlight the significant influence of industrial and agricultural production and population growth on river water quality, suggesting the need for policies that promote sustainable economic growth and effective water resource management. The third and final study investigates the influence of municipal environmental legislation and basic sanitation infrastructure on river water quality and the incidence of waterborne diseases in 1,048 Brazilian municipalities in 2020, using Structural Equation Modeling (SEM). The results indicate that improvements in basic sanitation infrastructure reduce waterborne diseases and are associated with reduced water pollution. River water quality is influenced by stricter environmental legislation, which mediates the relationship between sanitation infrastructure and public health. The study highlights the importance of integrated policies that promote sustainable development and efficient management of water resources. The conclusions of these three studies highlight the need for investments in basic sanitation infrastructure, especially in less developed areas, and for environmental regulations that balance economic growth with environmental conservation. The results have implications for the formulation of public policies aimed at sustainable management of water resources and the socioeconomic development of the country.

Keywords: Economic Growth; Water Quality; Environmental Pollution; Basic Sanitation

Lista de Figuras

Figura 1 -	Representação gráfica das sete formas da relação entre crescimento econômico e degradação ambiental.....	21
Figura 2 -	A forma de U invertido (Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets EKC), fases de deterioração ambiental.....	22
Figura 3 -	17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.....	29
Figura 4 -	Curva Ambiental de Kuznets (CAK).....	40
Figura 5 -	Local das amostras de DBO utilizadas na pesquisa.....	47
Figura 6 -	Modelo teórico.....	109
Figura 7 -	Mapa da amostra de municípios analisados.....	111

Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Evidências teóricas e empíricas da Curva Ambiental de Kuznets.....	43
Tabela 2 -	Estatísticas descritivas.....	48
Tabela 3 -	Quantidade de municípios, DBO médio, quantidade de municípios com DBO médio superior a 5 mg/L, quantidade de municípios sem rede coletora de esgoto, média indica do número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes, média da população e PIB per capita médio, segmentado pelo PIB per capita do município.....	49
Tabela 4 -	Coefficientes e significância dos coeficientes dos modelos de regressão OLS da variável exógena log DBO e variáveis endógenas: PIB per capita, PIB per capita ao quadrado e PIB per capita ao cubo, nas formas quadrática e cúbica no ano de 2020.....	51
Tabela 5 -	Estatística descritiva das variáveis utilizadas na pesquisa.....	76
Tabela 6 -	Teste de raiz unitária para as variáveis: DBO, PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e População, em bases anuais e no período de 2008 a 2020.....	77
Tabela 7 -	Teste de Cointegração de Pedroni aplicado para as variáveis: Primeira Diferença do DBO, Primeira Diferença do PIB agropecuário per capita, Primeira Diferença do PIB industrial per capita e Primeira Diferença da população, em bases anuais, para o período de 2008 a 2020.....	78
Tabela 8 -	Teste de Causalidade de Granger aplicado às variáveis: Primeira Diferença do DBO, Primeira Diferença do PIB agropecuário per capita, Primeira Diferença do PIB industrial per capita e Primeira Diferença da população em bases anuais, para o período de 2008 a 2020.....	79
Tabela 9 -	Evidências teóricas e empíricas da influência da infraestrutura do saneamento básico na qualidade da água e na saúde humana.....	102
Tabela 10 -	Evidências teóricas e empíricas da influência da legislação ambiental focadas na gestão da infraestrutura de saneamento básico melhora a qualidade da água dos rios.....	106
Tabela 11 -	Estatística Descritiva das variáveis utilizadas na pesquisa.....	112
Tabela 12 -	Valores do índice de ajuste, autores e valores de referência.....	113
Tabela 13 -	Cargas diretas estimadas (padronizadas) do modelo.....	115

Lista de abreviaturas e siglas

ANA -	Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico
BDTD -	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BRICS -	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
CAK -	Curva Ambiental de Kuznets
CC -	Confiabilidade Composta
CFI -	Comparative Fit Index
DATASUS-	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
DBO -	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EC -	Condutividade Elétrica
EKC -	Curva Ambiental de
EKC -	Environmental Kuznets Curve (Curva Ambiental de Kuznets)
ETE -	Estação de Tratamento de Esgotos
FAO -	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
GFI -	Goodness-of-Fit Index IFI Incremental Fit Index
GL-	qui-quadrado sobre graus de liberdade
IBGE-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFI-	Incremental Fit Index
IPEA-	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
KC -	Curva de Kuznets
KMO -	Kaiser-Meyer-Olkin
MEE -	Modelagem de Equações Estruturais
NFI -	Normed Fit Index
OD -	Oxigênio Dissolvido
ODS -	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS -	Organização Mundial da Saúde

ONU -	Organização das Nações Unidas
PH -	Potencial Hidrogeniônico
PIB -	Produto Interno Bruto
PNRS -	Plano Nacional de Recursos Hídricos
RMSEA-	Root Mean Square Error of Approximation
RMSR -	Root Mean Square Residual
SINGREH -	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
TDS -	Sólidos Totais Dissolvidos
TLI -	Tucker-Lewis Index
VME-	Variância Média Extraída

Sumário

1	Introdução	13
2	Objetivos	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	Justificativa	16
4	Limitações	18
5	Referencial teórico	20
5.1	Curva ambiental de Kuznets	20
5.2	Da falta de infraestrutura de saneamento básico e consequências socioambientais	23
5.3	Regulamentação ambiental e sua influência no Saneamento básico	25
5.4	Qualidade da água: uma análise dos impactos da industrialização, urbanização e agricultura intensiva	26
5.5	Desenvolvimento sustentável e os impactos da poluição da água na saúde humana	27
6	Metodologia	31
6.1	Análise da relação entre qualidade da água dos rios e PIB per capita dos municípios brasileiros	31
6.1.1	Modelo da curva ambiental de Kuznets	32
6.2	Análise de causa e efeito entre PIB setorial, tamanho populacional e qualidade da água dos rios	32
6.2.1	Teste de raiz unitária	33
6.2.2	Teste de Cointegração de Pedroni	33
6.2.3	Teste de causalidade de Granger	33
6.3	Impacto da legislação ambiental na prevenção de doenças de veiculação hídrica: o papel da infraestrutura de saneamento básico e da poluição da água.....	34
6.3.1	Modelo teórico proposto.....	34
6.3.2	Validação dos construtos e do modelo	34
Capítulo I - Análise da relação entre o PIB per capita e a poluição dos rios brasileiros: evidências da hipótese da curva ambiental de Kuznets		36
1	Introdução	37
2	Referencial Teórico	38

2.1	Impactos ambientais do desenvolvimento econômico na qualidade dos rios no Brasil ...	38
2.2	Hipótese da curva ambiental de Kuznets	40
3	Método	44
3.1	O modelo da curva ambiental de Kuznets	45
4	Resultados	46
5	Considerações Finais	55
	Referências Bibliográficas	56
Capítulo II - Desafios e perspectivas na preservação da qualidade da água: uma análise dos impactos da industrialização, urbanização e agricultura intensiva		62
1	Introdução	63
2	Referencial teórico	64
2.1	Relação causal do desenvolvimento econômico na qualidade da água do rio local ao longo dos anos	64
2.2	A produção industrial e sua influência na qualidade da água dos rios	66
2.3	Produção agrícola e poluição da água do rio no Brasil	69
2.4	Densidade populacional e impactos na qualidade da água dos rios	72
3	Metodologia	74
3.1	Teste de raiz unitária	74
3.2	Teste de Cointegração de Pedroni	75
3.3	Teste de causalidade de Granger	75
4	Resultados e Discussões	75
5	Considerações finais	84
	Referências Bibliográficas	86
Capítulo III - Legislação ambiental e estrutura de saneamento: efeitos na qualidade da água dos rios e saúde pública em municípios brasileiros		96
1	Introdução	97
2	Referencial teórico	98
2.1	Causas e consequências da falta de infraestrutura de saneamento básico e o impacto na qualidade	98
2.2	Legislação ambiental alinhada a Infraestrutura de saneamento básico causa impacto na poluição da água e nas incidências de doenças	103
3	Metodologia	108

3.1 Coleta e análise de dados	108
3.2 Modelo teórico proposto	109
3.3 Validação dos construtos e do modelo	110
4 Resultados e Discussão	110
5 Considerações Finais	117
Referências Bibliográficas	118
6 Considerações Finais da Dissertação	128
Referências Bibliográficas da Dissertação	131

1 Introdução

O declínio da qualidade da água tornou-se uma preocupação mundial cada vez mais significativa, à medida que as atividades econômicas se expandem (Mello *et al.*, 2020). De acordo com os autores, o Brasil contém o maior volume de água doce do mundo. Apesar disso, este recurso, natural e essencial, está sendo ameaçado pelo rápido aumento do consumo e pela degradação da qualidade da água dos rios, principalmente como resultado das ações humanas.

Da mesma forma, Wenzhong *et al.* (2022) destacam que rápido crescimento econômico é um dos fatores que contribuem significativamente para a poluição da água, tornando-se um grande problema ambiental em todo o mundo, particularmente em países em desenvolvimento. Meybeck (2002), destaca que rios estão sendo fortemente impactados por atividades antropogênicas altamente poluidoras que perturbam suas características físicas, químicas, biológicas, hidrológicas e morfológicas. Além disso, a poluição da água é um problema global.

Algumas das principais fontes de poluição da água são as descargas de resíduos domésticos e agrícolas, o crescimento populacional, o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes, bem como o desenvolvimento urbano não planejado (Haseena *et al.*, 2017). De maneira análoga, Morin-crini *et al.* (2022), destacam que as principais fontes de contaminação da água dos rios são descargas domésticas, efluentes hospitalares, águas residuais industriais, escoamento da agricultura, dentre outros (Val *et al.*, 2019).

Os autores complementam explicando que o crescimento econômico, e as atividades agrícolas nos últimos 50 anos contribuíram extensivamente para o complexo e delicado cenário da qualidade da água no Brasil, em que a urbanização acelerada, juntamente com o tratamento inadequado de águas residuais, contribuem para o acúmulo de matéria orgânica e a eutrofização de rios brasileiros (Val *et al.*, 2019).

Ademais, como consequências da poluição hídrica, têm-se as doenças bacterianas, virais e parasitárias que requerem a atenção dos gestores (Haseena *et al.*, 2017). Segundo Adelodun *et al.* (2021), outros fatores socioeconômicos são atribuídos as várias doenças transmitidas pela água, em muitos países em desenvolvimento, o nível da renda, acesso a instalações sanitárias, idade, e o nível de escolaridade. Luo *et al.*, (2019), reportam, a falta de infraestrutura de saneamento básico resulta na contaminação da água.

No entanto, a degradação da qualidade da água dos rios ameaça o ecossistema aquático, colocando em risco a saúde dos seres humanos, bem como dificultando o desenvolvimento

social e econômico. Além disso, há dificuldades em coletar informações confiáveis sobre a qualidade da água especialmente em economias em desenvolvimento (Xiaoxue *et al.*, 2020).

Diante desse cenário preocupante, a Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020, atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento básico (Brasil, 2020). Essas políticas têm como função gerenciar o fornecimento e a utilização dos recursos ambientais, de forma que fomente melhorias contínuas no bem-estar das gerações atuais e futuras (Everett *et al.*, 2010).

Salienta-se, que a melhoria na qualidade ambiental pode ser satisfeita através da introdução de uma legislação municipal consistente, impactando significativamente na qualidade da água do rio (Wang *et al.*, 2015). As regulamentações governamentais, em especial as designadamente voltadas à política ambiental, têm um papel importante no incentivo as inovações tecnológicas, causando impactos significativos no desenvolvimento socioeconômico e na qualidade dos recursos (Everett *et al.*, 2010).

Ademais a legislação ambiental desempenha um papel crucial na infraestrutura de saneamento básico. Regulações eficazes podem mitigar os efeitos negativos do desenvolvimento econômico sobre os recursos hídricos, promovendo a sustentabilidade. No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos são fundamentais para a gestão desses recursos (ANA, 2023). Em suma, observa-se a complexidade da problemática abordada neste estudo relacionada à qualidade da água dos rios brasileiros, em que se destacam os impactos diretos do desenvolvimento econômico, da falta de infraestrutura de saneamento básico, legislação ambiental, e dos impactos na saúde humana.

Neste sentido, este estudo busca avaliar a interconexão entre o crescimento econômico, a infraestrutura de saneamento básico e a legislação ambiental municipal. Desta maneira, o estudo visa responder a seguinte problemática: qual é a relação entre o crescimento econômico, a legislação ambiental municipal, a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, a infraestrutura de saneamento básico e a qualidade da água dos rios brasileiros?

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Com o propósito de responder esta pesquisa, este estudo tem como objetivo geral analisar a relação entre o crescimento econômico, a legislação ambiental municipal, a infraestrutura de saneamento básico, a qualidade da água dos rios brasileiros e as doenças de veiculação hídrica.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são fundamentais para entender a complexa relação entre crescimento econômico e qualidade ambiental, com foco particular na qualidade da água dos rios no Brasil. Os objetivos são delineados como segue:

- Analisar a relação do PIB per capita com a poluição da água dos rios no Brasil sob a ótica da Hipótese da Curva ambiental de Kuznets;
- Identificar as consequências socioambientais da falta de infraestrutura do saneamento básico municipal com ênfase na coleta e tratamento de águas residuais;
- Identificar a relação de causa e efeito da qualidade da água dos rios com a infraestrutura de saneamento básico
- Analisar os impactos da industrialização, urbanização e agricultura Intensiva na qualidade da água

Ao abordar esses objetivos específicos, a pesquisa pretende fornecer uma análise abrangente e detalhada das interações entre crescimento econômico, infraestrutura de saneamento e qualidade da água, contribuindo para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes e sustentáveis.

3 Justificativa

A água é um patrimônio natural e estratégico. É um recurso essencial e indispensável na produção de bens e serviços. É um elemento vital para a conservação da vida de todos os seres na terra (Wolkmer e Pimmel, 2013). A dimensão do crescimento econômico pode ser o principal fator dos problemas ambientais relacionado aos recursos hídricos. Neste contexto, os recursos hídricos são consideravelmente afetados pela poluição (Wolkmer e Pimmel, 2013).

Segundo o IPEA (2022), o Brasil é um país privilegiado com relação à disponibilidade hídrica. Possuindo 12% de toda a água doce disponível no mundo. Diante deste contexto, esta pesquisa visa analisar a qualidade dos recursos hídricos no Brasil considerando, fatores como, crescimento econômico, infraestrutura de saneamento básico, regulamentação ambiental e doenças de veiculação hídrica.

A qualidade da água dos rios tem sido comprometida pela pressão antropogênica nas bacias hidrográficas, especialmente nos países em desenvolvimento, em que a cobertura dos sistemas de esgoto não acompanha o desenvolvimento das cidades (Costa, *et al.*, 2022). No entanto, é crucial considerar as questões ambientais, relacionadas ao consumo dos recursos hídricos (Akhtar, *et al.*, 2021). Os desafios enfrentados na gestão dos recursos hídricos incluem: a produção de alimentos, o desenvolvimento urbano, o aumento da produção e instalações de sanitárias inadequadas.

Em situações como essas, a negligência atribuída aos recursos hídricos dificulta ainda mais o sério problema de manutenção da gestão adequada da qualidade da água (Akhtar, *et al.*, 2021). A qualidade da água está intrinsecamente ligada à saúde pública, e a ausência de acesso ao saneamento básico, podendo resultar na propagação de diversas doenças, tais como diarreias, cólera e hepatite A, contribuindo também para o aumento dos casos de desnutrição (OMS, *et al.*, 2020).

Num âmbito internacional, os resultados empíricos de um estudo feito na Nigéria indicam uma relação de longo prazo entre a saúde pública e a presença de uma infraestrutura adequada de saneamento básico (Inabo e Arshed, 2019). Os autores De Troyeret *al* (2016), recomendam que a conscientização ambiental seja promovida por meio de sensibilização, educação e aplicação das leis ambientais, considerando-as essenciais para o desenvolvimento socioeconômico sustentável.

Ao identificar as interconexões entre a infraestrutura de saneamento básico, o crescimento econômico, a saúde pública e a regulamentação ambiental, esta pesquisa se justifica pela urgência e relevância da preservação da qualidade dos recursos hídricos no Brasil.

A abordagem dos desafios enfrentados no crescimento econômico, os impactos diretamente da qualidade da água na saúde dos indivíduos e o potencial de contribuir para a implementação de legislações ambientais direcionadas ao crescimento econômico e a infraestrutura do saneamento básico ressaltam a importância deste estudo para as gerações atuais e futuras.

4 Limitações

Embora os resultados obtidos nesta pesquisa forneçam insights sobre a relação entre a qualidade da água dos rios brasileiros, o crescimento econômico, a legislação ambiental e a incidência de doenças, é importante destacar algumas limitações que podem afetar a generalização e a interpretação dos resultados.

A pesquisa foi conduzida com base em dados do ano de 2020. Mudanças nas condições socioeconômicas, políticas ambientais ou eventos extraordinários podem ocorrer após esse período, impactando a relação entre as alterações climáticas. Portanto, os resultados não podem ser aplicáveis diretamente a outros anos.

Quanto às limitações dos dados utilizados: foi apresentado que há uma escassez de publicações nacionais recentes de pesquisas brasileiras referentes à temática escolhida para este estudo, nas bases de dados (Scielo, Springer, Google Acadêmico, BDTD, e Science Direct). No entanto, a qualidade da análise depende da disponibilidade e confiabilidade dos dados utilizados. Neste caso, a precisão das conclusões está vinculada à qualidade e representatividade dos dados disponíveis para os municípios analisados.

A interpretação dos resultados à luz da Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets baseia-se na premissa de que a relação entre crescimento econômico e poluição ambiental segue um padrão específico. No entanto, essa possibilidade não pode capturar totalmente a complexidade das interações entre variáveis ambientais e econômicas.

Por outro lado, quanto às limitações da metodologia, embora a modelagem de equações estruturais possa ser estatisticamente significativa, é crucial considerar as limitações específicas a essa abordagem em relação à natureza correlacional dos resultados. É importante notar que, na modelagem de equações estruturais, outras variáveis poderiam eventualmente ser omitidas de maneira não intencional, dada a complexidade do tema.

Ademais, este estudo abrange uma ampla variedade de municípios brasileiros, cada um com suas características regionais específicas. Diante disso, diferenças significativas podem existir entre regiões, afetando a generalização dos resultados para o país como um todo, tanto em relação à variação temporal quanto espacial. A pesquisa adota uma análise estática para o ano de 2020, não abordando variações temporais ao longo do ano ou diferenças espaciais que podem influenciar a relação entre variáveis ao longo do tempo e entre diferentes localidades.

Em síntese, ao considerar essas limitações, é fundamental interpretar os resultados desta pesquisa com cautela e consideração que investigações futuras, abordando algumas dessas

questões, podem contribuir para uma compreensão mais abrangente e precisa das relações entre desenvolvimento econômico e qualidade ambiental no contexto dos rios brasileiros.

Em conclusão, esta seção apresenta uma análise abrangente dos principais fatores que influenciam a relação entre o desenvolvimento econômico e a qualidade ambiental, com ênfase na Curva Ambiental de Kuznets (EKC) segundo destaca os autores Su; Qamruzzaman, Karim, (2023). A EKC ilustra como o crescimento econômico pode inicialmente exacerbar a poluição ambiental. Como também, após certo ponto de inflexão, pode levar a melhorias ambientais devido ao aumento da conscientização e à implementação de regulamentações mais rigorosas. A compreensão das diferentes formas da EKC é essencial para orientar políticas públicas que equilibrem desenvolvimento econômico e preservação ambiental, promovendo um futuro mais sustentável (Su; Qamruzzaman, Karim, 2023).

5 Referencial teórico

Esta seção é composta por temas pertinentes ao presente estudo. Estas incluem, as evidências teóricas do crescimento econômico, da Curva Ambiental de Kuznets (EKC) e sua relação com a qualidade da água dos rios, bem como a infraestrutura de saneamento básico, doenças de veiculação hídrica, poluição da água e a regulamentação ambiental municipal. Assim como uma Análise dos Impactos da Industrialização, Urbanização e Agricultura Intensiva.

5.1 Curva ambiental de Kuznets

Desde o início da revolução industrial, diversos países buscaram intensamente o crescimento econômico, negligenciando a proteção ambiental e os impactos negativos (Yang, *et al.*, 2021). Os autores continuam explicando que o crescimento socioeconômico requer grandes quantidades de recursos naturais e, em alguns casos, deteriora significativamente a qualidade da água do rio. A boa qualidade da água é essencial para a vida, sendo indispensável para as atividades humanas, como abastecimento público e industrial, agricultura, produção de energia elétrica e atividades de lazer (Ramos, 2015).

No entanto, a poluição da água está geralmente ligada às atividades antrópicas poluentes, como a poluição por petróleo e derivados, metais pesados, impurezas em suspensão, bactérias e lodos (Sarker *et al.*, 2021). No Brasil, os recursos hídricos são impactados pela crescente exploração econômica. A eutrofização é um dos grandes problemas ambientais do país, com expressivas consequências para a saúde humana, atividades econômicas e meio ambiente (Valet *et al.*, 2019).

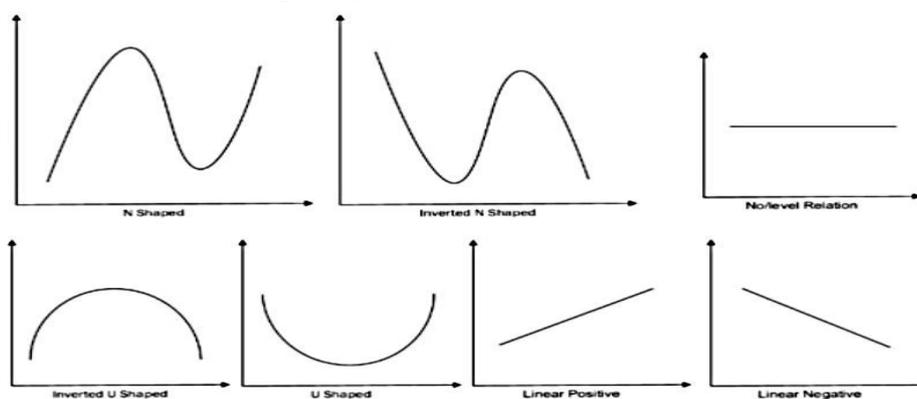
Garantir o acesso à água de qualidade a todos os brasileiros é um dos principais desafios para os próximos gestores do país (Brito, 2018). Segundo Falcão, Arcos e Costa (2021), os impactos na qualidade da água são constantemente observados no Brasil, e a avaliação e o monitoramento dos recursos hídricos tornam-se necessários para um melhor direcionamento das estratégias de planejamento e gestão ambiental. O conceito básico da Curva Ambiental de Kuznets (EKC), define uma relação em forma de U invertido entre a degradação ambiental e o crescimento econômico. Isto significa que à medida que nas fases iniciais do desenvolvimento econômico, na medida em que os níveis de renda aumentam, a poluição ambiental piora, mas eventualmente diminui quando a renda aumenta (Orubu e Omotor, 2011).

Em conformidade, o conceito mais comum afirma que a qualidade ambiental se deteriora nas fases iniciais do crescimento econômico e melhora nas fases posteriores (Dinda, 2004). Segundo Dinda (2004), a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets postula uma relação em forma de U invertido entre os diferentes poluentes e a renda per capita, ou seja, a pressão ambiental aumenta até certo nível na medida em que a renda per capita aumenta. Na fase inicial do desenvolvimento econômico, a poluição cresce rapidamente devido à prioridade dada ao aumento da produção, em detrimento da qualidade ambiental (Dasgupta, *et al.*, 2001).

O rápido crescimento econômico resulta em uma maior utilização de recursos naturais e na emissão de poluentes, exercendo mais pressão sobre o meio ambiente. As preocupações ambientais ficam em segundo plano, uma vez que os indivíduos estão mais focados em empregos e renda (Dinda, 2004). Na fase posterior à industrialização, à medida que a renda per capita aumenta, há uma maior conscientização ambiental pela sociedade, as instituições reguladoras tornam-se mais eficazes, e o nível de poluição diminui gradativamente (Dinda, 2004).

No entanto, existem outras variações na Curva Ambiental de Kuznets (EKC), tem-se a existência de uma relação em forma de N entre o nível de renda e o meio ambiente leva a diferentes instruções em termos de recomendações políticas. A relação em forma de N implica um declínio na poluição ambiental quando a renda aumenta, mas apenas até um certo nível, tendo novamente um aumento da poluição nas rendas mais elevadas. Portanto, as preocupações com as questões ambientais persistem (Acar; Gürdal e Ekeryilmaz, 2018). A Figura 1 demonstra as formas da Curva Ambiental de Kuznets, representando a relação entre crescimento econômico e poluição ambiental, incluindo as formas de U, N, U invertido e N invertido. A compreensão dessas relações é crucial para orientar políticas que busquem conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental.

Figura 1 - Representação gráfica das sete formas da relação entre crescimento econômico e degradação ambiental.



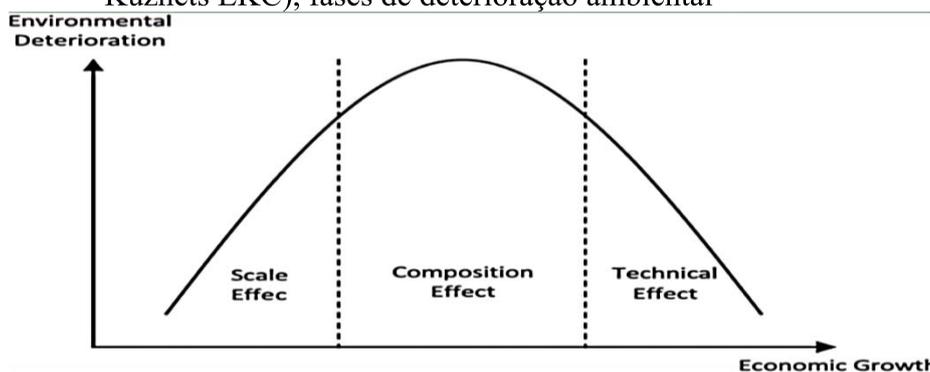
Fonte: Alkhars *et al.* (2022).

Na figura 1, são representados graficamente os sete tipos da relação entre crescimento econômico e indicadores ambientais da Curva Ambiental de Kuznets (EKC). Dentre esses sete tipos, destaca-se a fase em forma de N (1), a qual demonstra uma relação positiva entre a degradação ambiental e o desenvolvimento econômico, ou seja, à medida que o crescimento econômico aumenta, observe-se também o aumento da degradação ambiental. Na fase 2, a relação entre desenvolvimento econômico e degradação ambiental é negativa, ou seja, diminuiu a degradação ambiental, à medida que o crescimento econômico aumenta. Já na fase 3 da curva ambiental de Kuznets na forma de N, novamente se observa uma relação positiva entre degradação ambiental e crescimento econômico. Na segunda forma, é apresentado uma relação no formato de um 'N' invertido, indicando que, no primeiro momento, há uma relação negativa entre poluição ambiental e crescimento econômico. Posteriormente, a forma mostra uma relação positiva entre crescimento econômico e poluição ambiental; no entanto, após determinado ponto de inflexão, essa relação volta a ser negativa. Na terceira forma, não há relação entre as variáveis. No entanto, na quarta forma, no formato de um 'U', no primeiro momento, quando há o aumento do crescimento econômico, há um aumento da poluição ambiental.

Posteriormente, após determinado ponto de inflexão, conforme a renda aumenta, ocorrerá uma queda na poluição ambiental, ou seja, não apresenta relação entre as variáveis. Na quinta forma, no formato de um 'U' invertido, apresenta uma relação inversa à do 'U' normal. E, por fim, as duas últimas formas da figura 1 apresentam uma relação linear positiva e linear negativa entre crescimento econômico, renda e poluição ambiental.

A seguir a figura 2, demonstra o modelo tradicional da Curva Ambiental de Kuznets em forma de U invertido, descrevendo as fases da relação crescimento econômico e degradação ambiental.

Figura 2 - A forma de U invertido (Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets EKC), fases de deterioração ambiental



Fonte: Alkhars *et al.* (2022).

Na figura 2, é evidente a conexão entre o crescimento econômico e a qualidade ambiental. Nas etapas iniciais desse crescimento econômico, observa-se um aumento nos impactos ambientais à medida que as economias se industrializam e se expandem. Isso se deve à exploração intensiva de recursos naturais, ao crescimento da produção industrial e ao aumento no consumo de energia. No entanto, um ponto de inflexão surge na curva, indicando que, após atingir um determinado nível de renda per capita, há uma redução nos impactos ambientais (Alkhars, *et al.*, 2022).

Em resumo, o ponto de inflexão marca uma crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade ambiental. Esse reconhecimento impulsionou a implementação de regulamentações ambientais e a adoção de práticas mais eficientes na busca por fontes de energia mais limpas. A hipótese da Curva Ambiental de Kuznets é amplamente testada em vários indicadores de crescimento econômico, incluindo a relação entre renda per capita e degradação ambiental (Bayer; Uranga e Fochezatto, 2022). Por fim, o crescimento econômico não ocorre isoladamente; ele traz uma variedade de especificações já mencionadas, como o processo de urbanização e a produção em grande escala de bens e serviços. Essas características é, portanto, significativas para impactos ambientais adversos, conforme observado na atualidade (Bayer; Uranga e Fochezatto, 2022). Portanto, a compreensão dessas interações é crucial para uma abordagem mais equilibrada e sustentável do crescimento econômico. A seguir, na Seção 5.2, abordaremos a falta de infraestrutura de saneamento básico e suas consequências socioambientais.

5.2 Da falta de infraestrutura de saneamento básico e consequências socioambientais

Esta seção aborda a falta de infraestrutura de saneamento básico e suas consequências socioambientais. Inicialmente, destaca-se a relevância teórica dessas consequências, concentrando-se nos impactos da poluição água dos rios em países em desenvolvimento e emergentes. A grave poluição da água é identificada como um problema crescente, com os principais rios sofrendo os efeitos dessa falta de infraestrutura (Schaffner; Bader e Scheidegger, 2009).

A poluição dos recursos hídricos, especialmente pelo esgoto doméstico, é apontada como uma das principais causas da eutrofização, destacando o esgoto sanitário como a principal fonte de contaminação na qualidade da água (Gadelha, *et al.*, 2022). De acordo Lin; Yang e Xu (2022), mais de 80% do esgoto gerado globalmente é despejado em rios e oceanos sem

tratamento prévio, resultando em poluição hídrica e contribuindo para mais de 50 doenças, sendo 80% delas relacionadas à má qualidade da água consumida.

Paudel *et al.* (2021), destacam que a poluição da água e a inadequação da infraestrutura de saneamento básico como preocupações primárias nos países em desenvolvimento. Boretti e Rosa (2019), ampliam a discussão para a abordagem da poluição da água em escala global, correlacionando a poluição da água, a densidade populacional e o crescimento econômico. Mencionando a falta de saneamento básico como uma das causas principais de poluição, com mais de 30% da população mundial vivendo sem qualquer estrutura de saneamento (Boretti e Rosa, 2019). No entanto, a infraestrutura de saneamento básico adequada é crucial para a sobrevivência e desenvolvimento em sociedade (Fortes; Barrocas e Kligerman, 2020).

Examina-se, em seguida, a situação internacional, destacando problemas de poluição nos rios do México e na cidade de Dhaka, capital de Bangladesh (Mora, *et al.*, 2021; Halder e Islam, 2015). Além disso, a ausência de infraestrutura de saneamento é identificada como uma das principais causas de poluição das águas, contribuindo para o aumento de doenças de veiculação hídrica (Alves, 2019). As consequências para a saúde humana são abordadas, com ênfase nas doenças transmitidas pela água, sendo a diarreia prevalente em países mais em desenvolvimento (Paudel, *et al.*, 2021). Ferreira, *et al.* (2021) ressaltam que maiores investimentos em saneamento básico no Brasil podem reduzir as internações por doenças de veiculação hídrica.

Por fim, destaca-se os diversos problemas de saúde pública causados pela poluição hídrica, incluindo doenças de pele, diarreia, doenças respiratórias, anemia e complicações no parto (Halder e Islam, 2015). As doenças transmitidas pela água são apontadas como responsáveis por muitas mortes em todo o mundo, especialmente entre a população desfavorecida, enfatizando a necessidade de investimento em infraestrutura de saneamento básico, principalmente em países em desenvolvimento (Ferreira *et al.*, 2021). A cobertura universal desses serviços é vista como uma medida preventiva para evitar a propagação de doenças transmitidas pela água e mitigar seus efeitos adversos na saúde humana e no meio ambiente.

Em resumo, a falta de infraestrutura de saneamento básico tem consequências socioambientais graves, especialmente nos países em desenvolvimento e emergentes. A poluição dos recursos hídricos, causada majoritariamente pelo despejo de esgoto doméstico sem tratamento, resulta em eutrofização e contaminação da água, comprometendo sua qualidade e afetando diretamente a saúde humana (OMS, 2021)

Na próxima seção, 5.3, discutiremos a regulamentação ambiental e sua influência no saneamento básico, abordando como políticas e leis ambientais podem impactar a gestão e a melhoria dos serviços de saneamento.

5.3 Regulamentação ambiental e sua influência no Saneamento básico

A qualidade da água dos rios é influenciada por fatores naturais e atividades humanas, sendo estas últimas fontes de sérias preocupações (Wang, *et al.*, 2024). As discussões globais que levaram à implementação da gestão integrada dos recursos hídricos têm aumentado nos últimos 50 anos, com desenvolvimento de diversos marcos regulatórios. No século XX, especificamente nas décadas de 1970 e 1990, houve uma recomendação para a gestão da água baseada nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde, que é impulsionada pelo desenvolvimento econômico ligadas ao saneamento básico e às políticas de desenvolvimento sustentável (Castro, *et al.*, 2023).

As regulações ambientais desempenham papel crucial na melhoria da qualidade ecológica dos rios, é essencial para o desenvolvimento econômico sustentável, mas sua eficácia depende da implementação dessas políticas (Acordado, *et al.*, 2016). As instituições políticas também influenciam na formulação e gestão dessas regulamentações (Ahmed, *et al.*, 2020). No contexto brasileiro, a Política Nacional de Recursos Hídricos, conhecida como Lei das Águas, distribui o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), para a gestão dos recursos hídricos federais (ANA, 2023). A abordagem descentralizadora e participativa, envolvendo comitês de bacias hidrográficas, promove a integração na gestão hídrica entre União, estados, usuários e sociedade civil. O Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), derivado da Lei nº 9.433/97, orienta a gestão das águas no Brasil, buscando um pacto nacional para melhorar a oferta e a qualidade da água (Brasil, 2023). Internacionalmente, nos Estados Unidos, a Lei da Água Limpa modernizou estações de tratamento de águas residuais, enquanto no Equador, o Estado atua como único regulador do patrimônio natural, incluindo a água (Stets, *et al.*, 2020; Oñatevaldivieso *et al.*, 2021).

Uma legislação adequada é vital para a preservação dos recursos hídricos (Zhang, *et al.*, 2014). A concentração de atividades poluidoras resulta em maior poluição dos rios, provocando a necessidade de regulamentações ambientais mais rigorosas para reverter a crescente poluição hídrica (Chen, *et al.*, 2018; Genôva e Wei, 2023).

Apesar do amplo debate sobre o efeito político dessas regulamentações, poucos estudos empiricamente testaram sua eficácia relativa (Pan *et al.*, 2023). Para Latif, *et al.* (2023), é crucial

manter o equilíbrio ecológico entre o crescimento econômico e o meio ambiente, exigindo políticas ambientais sólidas formalizadas por investigação e análise. A implementação dessas políticas pode ser uma abordagem viável para alcançar o crescimento econômico e a melhoria ambiental, exigindo quadros institucionais robustos (Latif, *et al.*, 2023). Mehmood *et al.* (2024) destacam que as políticas ambientais devem minimizar a intensidade das emissões, melhorando simultaneamente as atividades econômicas. Leis e diretrizes ambientais têm um papel fundamental na redução de emissões poluentes à qualidade da água dos rios (Briant, *et al.*, 2024).

Em síntese, a qualidade da água é essencial para alcançar as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, especificamente a meta 6.3, que enfatizam a melhoria da qualidade da água, redução da poluição e minimização da liberação de produtos químicos e materiais perigosos nos recursos hídricos (Silveira, *et al.*, 2023). O cumprimento eficiente dos padrões mínimos de qualidade da água previstos por lei é crucial para a sustentabilidade, abrangendo meio ambiente, economia e sociedade (Guidolini *et al.*, 2018; Tripathi e Singal, 2019).

5.4 Qualidade da água: uma análise dos impactos da industrialização, urbanização e agricultura intensiva

A poluição ambiental é um problema global enfrentado por todos os países, levando à escassez de recursos naturais e afetando negativamente a vida das pessoas e dos animais. Enquanto os países buscam aumentar o crescimento econômico para melhorar o padrão de vida de suas populações, a exploração excessiva de recursos está agravando os problemas ambientais (Awan *et al.*, 2013). A urbanização, o crescimento populacional, o desenvolvimento industrial e a atividade agrícola impactam significativamente a qualidade dos rios (Sandoval Herazo *et al.*, 2024). O estudo de Sandoval Herazo *et al.*, (2024), indica uma forte correlação entre a urbanização e a deterioração da qualidade da água. À medida que as cidades se expandem, os poluentes da água, incluindo produtos químicos, metais pesados e nutrientes, aumentam.

Em muitos países em desenvolvimento, políticas públicas insuficientes não conseguem proteger adequadamente os recursos naturais, como a água. Isso é particularmente evidente em rios que recebem águas residuais não tratadas, o que diminui suas capacidades de diluição e autopurificação. As repercussões econômicas da poluição dos rios afetam setores vulneráveis, incluindo pesca, pecuária e agricultura, e representam riscos de extinção para os organismos do ecossistema (Sandoval Herazo *et al.*, 2024).

De acordo com Zahoor e Mushtaq (2023), existe uma relação causal direta entre a poluição agrícola e a qualidade da água. A poluição agrícola resulta da contaminação da água por uma variedade de substâncias, como fertilizantes, pesticidas, sedimentos e outros produtos químicos utilizados na agricultura. Além disso, a agricultura intensiva pode acarretar o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, causando eutrofização da água, o que leva ao crescimento de algas nocivas, redução do oxigênio dissolvido e morte de peixes. A presença de produtos químicos agrícolas na água pode contaminar as fontes de água potável, representando riscos para a saúde humana e dos ecossistemas aquáticos (Zahoor; Mushtaq, 2023).

Ademais, um estudo realizado na Índia destacou que parâmetros como pH, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), OD (Oxigênio Dissolvido), TDS (Sólidos Totais Dissolvidos), EC (Condutividade Elétrica) e outros desempenham papéis significativos na qualidade da água. A análise mostrou que a água estava altamente poluída devido às extensas atividades antropogênicas na região (Mishra *et al.*, 2024). Em síntese, o crescimento populacional, a urbanização, a indústria e a agricultura degradam o meio ambiente, causando impactos significativos na qualidade da água (Vesković *et al.*, 2024).

Em suma, os impactos da industrialização, urbanização e agricultura intensiva na qualidade da água revela um quadro preocupante de degradação ambiental global. A expansão das áreas urbanas e industriais tem contribuído para o aumento dos poluentes nos corpos d'água, exacerbando os desafios de tratamento e conservação dos recursos hídricos (Jabeen; Huang; Amir, 2015).

5.5 Desenvolvimento sustentável e os impactos da poluição da água na saúde humana

Os seres humanos têm transformado radicalmente o ambiente, prejudicando nosso bem-estar e a capacidade do planeta de sustentar a vida. Compreender como as ações humanas interagem com o meio ambiente é essencial para identificar mudanças necessárias para alcançar um futuro sustentável. Esse objetivo depende da compreensão de uma ampla gama de fenômenos complexos e interativos, abrangendo diversas escalas espaciais e temporais e diferentes ramos da ciência (Johnson *et al.*, 2023).

Segundo Souza (2020), o conceito de desenvolvimento sustentável evoluiu desde a década de 1980, destacando avanços epistemológicos e a inclusão da sustentabilidade como componente essencial a partir da Conferência Rio 92. A responsabilidade pela crise ambiental mundial é discutida, criticando a ideia equivocada de igualdade de responsabilidade, pois a maior responsabilidade recai sobre os países com poder econômico.

A crescente preocupação com a sustentabilidade dos recursos na contemporaneidade, devido à escassez, tem levado indivíduos, empresas e governos a adotarem medidas para assegurar que os recursos utilizados hoje estejam disponíveis para as gerações futuras. O desenvolvimento de soluções sustentáveis torna-se indispensável, pois a sustentabilidade vai além da conservação, sendo vital para otimizar o uso eficiente dos recursos naturais (Wang; Yang, 2024).

Dessa forma, autores destacam a importância da gestão sustentável dos recursos, que inclui o uso eficiente desses recursos, incorporando tecnologias que minimizem os impactos ambientais do consumo, promovendo a reciclagem e reutilização. D'Inverno, Carosi e Romano (2020) destacam a atenção específica à sustentabilidade dos recursos hídricos, vinculando-a às necessidades sociais.

De acordo com Tzanakakis, Paranychianakis e Angelakis (2020), a poluição da água é uma questão crítica em áreas de produção intensiva, onde a produção excessiva não sustentável são comuns. A propagação da poluição derivada da produção industrial em bacias hidrográficas pode causar graves problemas na saúde humana. A poluição da água emerge como um desafio ambiental significativo, ameaçando a saúde humana e o desenvolvimento econômico. Assim, o desenvolvimento sustentável busca atender às necessidades da geração presente sem comprometer as capacidades das gerações futuras (Sahoo; Goswami, 2024).

Um ambiente vulnerável prejudica o bem-estar humano e econômico, pois reduz a qualidade dos recursos disponíveis, comprometendo ao mesmo tempo a saúde. O crescimento econômico e a poluição ambiental estão intimamente ligados. Ademais países introduzem impostos ambientais para diminuir a degradação ambiental causada pelo progresso econômico (Liu *et al.*, 2023). Os recursos hídricos são vitais para o desenvolvimento socioeconômico e a redução da pobreza. A gestão adequada do sistema convencional de água maximiza os fluxos de água existentes para satisfazer todas as demandas, incluindo água local (Xiang *et al.*, 2021).

De acordo com Delgado-Ceballos *et al.* (2023), em meados de 2022, era difícil acessar qualquer tipo de comunicação externa, como websites de empresas ou relatórios anuais, sem encontrar menções aos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), os mesmos são destacados na figura 3, dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Figura 3 - 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU (2024).

A Figura 3 apresenta os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são abrangentes e ambiciosos, exigindo investimentos anuais estimados entre 5 a 7 bilhões de dólares no período de 2015-2030 (Alcamo, 2019). O autor continua destacando que conexões explícitas entre a qualidade da água e os ODS.

A poluição da água em vários países da Ásia Central é um desafio que contraria o ODS 6 da ONU, que visa alcançar uma gestão sustentável dos ODS, com impactos que vão de escalas municipais a globais, especialmente em países em desenvolvimento sustentável da água limpa e acessível para todos. O objetivo é enfrentar desafios relacionados a poluição da água. O ODS 6.3 visa melhorar a qualidade da água reduzindo para metade a proporção de águas residuais não tratadas e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos (Yang *et al.*, 2024).

No entanto Khan *et al.* (2020) apontam uma relação forte e positiva entre sustentabilidade ambiental e práticas verdes a nível nacional, envolvendo energias renováveis, pressão regulamentar, políticas ecológicas e utilização sustentável de recursos naturais e econômicos. Regiões com grave escassez de água, como o leste da China e a Índia, enfrentam elevados impactos na poluição da água devido às retiradas setoriais excessivas, agravando ainda mais a qualidade e escassez (Van Vliet *et al.*, 2021).

Por outro lado, em Bangladesh, a indústria foi obrigada a inovar e diminuir seu efeito ambiental através de uma crescente consciência ambiental. Muitas nações da mesma região geográfica adotaram posturas semelhantes e implementaram iniciativas sustentáveis para trazer

melhorias ambientais favoráveis. A fabricação verde, um método de produção sustentável, tem potencial para resolver a maioria dos problemas ambientais da Índia (Huda, 2024).

Caglar, Daştan e Rej (2024) salientam que, na China, os principais objetivos dos decisores políticos devem ser regulamentos que orientem os princípios fundamentais para a melhoria da poluição ambiental através da sustentabilidade, preservando o crescimento econômico e a vantagem competitiva durante o processo industrial. A poluição da água está fortemente ligada aos ODS, focando-se na sustentabilidade do uso da água para as gerações futuras. O declínio da qualidade da água tem implicações prejudiciais a longo prazo para os sistemas socioecológicos como um todo, tornando-se uma questão de preocupação global.

O crescimento econômico, embora traga benefícios, também acarreta consequências relevantes, como alterações climáticas, acesso à água, crescimento populacional, esgotamento de recursos, poluição, perda de biodiversidade, pobreza, desigualdades econômicas e sociais, além de doenças, sendo consideradas insustentáveis as tendências atuais (Bressler, 2024). O autor destaca a importância da ampla adoção dos ODS pela comunidade internacional e pelos setores público e privado. A degradação do ambiente ecológico causada pela industrialização apresenta um grande desafio para os decisores políticos, que buscam desenvolver a sustentabilidade (Song; Chen; Luan, 2023).

Sahoo e Goswami (2024) destacam que o desenvolvimento sustentável desempenha um papel crucial na redução da poluição da água. Ao abordar práticas sustentáveis, como a diminuição da utilização de produtos químicos nocivos, a gestão adequada dos resíduos e a promoção do uso responsável da água, podemos reduzir a quantidade de poluentes nos cursos de água. Além disso, abordagens de desenvolvimento sustentável promovem a conservação e restauração de ecossistemas que desempenham um papel fundamental na manutenção da qualidade da água. Portanto, o desenvolvimento sustentável é essencial para reduzir a poluição da água e proteger a saúde e o bem-estar das comunidades e do ambiente. Adotar uma abordagem integrada aos desafios econômicos, sociais e ecológicos cria um futuro mais sustentável para as gerações futuras (Sahoo; Goswami, 2024). A seguir, na seção 6, será discutido o detalhamento da metodologia utilizada na pesquisa.

6 Metodologia

Essa seção fornece uma visão clara sobre a abordagem metodológica da pesquisa, destacando sua natureza quantitativa e os métodos utilizados para analisar as relações propostas.

Esta dissertação é formada por três capítulos. O primeiro capítulo denominado de Análise da Relação entre o PIB Per Capita e a Poluição dos Rios Brasileiros: Evidências da Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets analisa a relação entre a qualidade da água dos rios, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e o PIB per capita dos municípios brasileiros em 2020, sob a ótica da Curva Ambiental de Kuznets. O segundo capítulo denominado de Desafios e Perspectivas na Preservação da Qualidade da Água: Uma Análise dos Impactos da Industrialização, Urbanização e Agricultura Intensiva avalia a qualidade da água dos rios sob a ótica do teste de causalidade de Granger. O terceiro, denominado de Legislação Ambiental e Estrutura de Saneamento: Efeitos na Qualidade da Água dos Rios e Saúde Pública em Municípios Brasileiros utiliza a modelagem de equações estruturais para identificar a relação existente entre a legislação ambiental, a estrutura de saneamento básico, a poluição dos rios e a incidência de doenças de veiculação hídrica.

6.1 Análise da relação entre qualidade da água dos rios e PIB per capita dos municípios brasileiros

Este estudo busca analisar a relação entre a qualidade da água dos rios, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e o PIB per capita dos municípios brasileiros no ano de 2020. O DBO é uma medida da quantidade de oxigênio necessária para degradar a matéria orgânica por ação biológica. É utilizada para estimar a quantidade de matéria orgânica presente na água, especialmente quando esgotos ou outras fontes de matéria orgânica são descartados em corpos d'água.

A escolha das variáveis foi baseada em pesquisas anteriores que estabeleceram a relação entre crescimento econômico e poluição dos rios (Lee, Chiu e Sun, 2010; Yang, Wen, 2018; Desbureau *et al.*, 2019; Serraglio *et al.*, 2021; Mao *et al.*, 2022; Russ *et al.*, 2022; Priyanga, Thilagavathi e Selvaraj, 2023; Li *et al.*, 2023; Taguchi *et al.*, 2023). A escolha do período se deu em razão da disponibilidade mais recente dos dados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Neste estudo, optou-se por utilizar o logaritmo da variável DBO para reduzir a influência de outliers. A transformação logarítmica mitiga o efeito de valores extremos, tornando os dados mais robustos e o modelo mais estável. Além disso, a inclusão de termos quadráticos e cúbicos no modelo logarítmico permite capturar a natureza não linear da relação entre PIB per capita e DBO.

A amostra utilizada compreende 1.421 pontos de coleta em 590 rios brasileiros, resultando em 9.146 análises. Foram excluídos cursos d'água menores, como riachos e lagos. A análise incluiu 950 municípios, representando 17,07% dos municípios brasileiros. Os dados foram obtidos da ANA (2023) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

6.1.1 Modelo da curva ambiental de Kuznets

Para avaliar a relação entre poluição ambiental e crescimento econômico, foram utilizados modelos quadráticos e cúbicos, conforme demonstrado nas equações:

$$y_i = \phi_0 + \phi_1 PIB_i + \phi_2 PIB_i^2 + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$y_i = \phi_0 + \phi_1 PIB_i + \phi_2 PIB_i^2 + \phi_3 PIB_i^3 + \varepsilon_i \quad (2)$$

onde, y_i denota a quantidade de emissões de poluentes no município, em que nessa pesquisa trata-se do logaritmo dos valores médios de DBO em cada município i ; PIB_i denota o produto interno bruto per capita (PIB per capita) do município i , e ε_i denota um termo de perturbação aleatório.

A primeira e segunda equação foram calculadas para determinar os pontos de mínimo e máximo relativos, auxiliando na interpretação da Curva Ambiental de Kuznets. A derivada primeira indica o ponto em que a relação muda de direção (mínimo ou máximo), enquanto a derivada segunda identifica se o ponto é de mínimo ou máximo.

6.2 Análise de causa e efeito entre PIB industrial, tamanho populacional e qualidade da água dos rios

Este estudo analisou a relação de causa e efeito entre o PIB industrial, PIB agropecuário, tamanho populacional e a qualidade da água dos rios, medida pela DBO, em 73 municípios

brasileiros entre 2008 e 2020. Os dados foram obtidos do IBGE (2024a, 2024b) e da ANA (2024).

6.2.1 Teste de raiz unitária

Para verificar a estacionariedade das séries temporais, foram realizados testes de raiz unitária nas variáveis DBO, PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e população. Os testes utilizados foram:

$$\Delta y_{i,t} = \phi y_{i,t-1} + \sum_1^p \delta_{i,t} \Delta y_{i,t-i} + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$\Delta y_{i,t} = \alpha + \phi y_{i,t-1} + \sum_1^p \delta_{i,t} \Delta y_{i,t-i} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\Delta y_{i,t} = \alpha + \beta t + \phi y_{i,t-1} + \sum_1^p \delta_{i,t} \Delta y_{i,t-i} + \varepsilon_i \quad (5)$$

onde $y_{i,t}$ é a série temporal sendo testada do município i , Δ representa a primeira diferença (ou seja, $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$), ϕ é o coeficiente de raiz unitária. $\delta_{i,t}$ são os coeficientes das defasagens. ε_i é o termo de erro, p é o número de defasagens incluídas no modelo para capturar a autocorrelação serial, α é o intercepto, βt é o termo de tendência, capturando uma tendência linear ao longo do tempo. A hipótese nula (H_0) do teste de raiz unitária: a série possui uma raiz unitária, ou seja, a série não é estacionária.

6.2.2 Teste de Cointegração de Pedroni

Para determinar a existência de relações de longo prazo entre as variáveis, foi aplicado o teste de cointegração de Pedroni. Este teste verifica a hipótese nula de ausência de cointegração entre as séries. A fórmula geral do teste é:

$$\Delta y_{i,t} = \alpha_i + \beta_i t + \beta_1 \Delta x_{1,i,t} + \beta_2 \Delta x_{2,i,t} + \dots + \beta_n \Delta x_{n,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

onde $\Delta y_{i,t}$ é primeira diferença da variável dependente, α_i é o intercepto específico da unidade (município i), $\beta_i t$ é o termo de tendência específica da unidade, $\Delta x_{k,i,t}$ são primeiras diferenças das variáveis explicativas, $\varepsilon_{i,t}$ é o termo de erro.

6.2.3 Teste de causalidade de Granger

Para verificar a direção da relação de causa e efeito entre as variáveis, foi aplicado o teste de causalidade de Granger. Este teste analisa se as variações passadas de uma variável podem prever variações futuras de outra. A fórmula do teste é:

$$\Delta y_{i,t} = \sum_1^p \alpha_i \Delta y_{i,t-i} + \sum_1^p \beta_i \Delta x_{i,t-i} + \varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

Onde $y_{i,t}$ e $x_{i,t}$ são as séries temporais do município i , α_i e β_i são os coeficientes das defasagens, $\varepsilon_{i,t}$ é o termo de erro.

6.3 Impacto da legislação ambiental na prevenção de doenças de veiculação hídrica: o papel da infraestrutura de saneamento básico e da poluição da água

Este estudo examinou a relação de causa e efeito entre legislação ambiental municipal, ocorrência de doenças de veiculação hídrica, infraestrutura de saneamento básico e poluição da água dos rios brasileiros em 2020 em 1.048 municípios. Os dados foram obtidos da ANA (2020) e do IBGE (2023).

6.3.1 Modelo teórico proposto

Quatro construtos foram propostos: poluição da água, infraestrutura de saneamento básico, doenças de veiculação hídrica e legislação ambiental. O modelo teórico incluiu variáveis como quantidade de fósforo, níveis de *E. coli* e oxigênio dissolvido (OD) para o construto qualidade da água, variáveis dummy para infraestrutura de saneamento básico, variáveis de doenças como hepatite e meningite, e variáveis dummy para legislação ambiental.

6.3.2 Validação dos construtos e do modelo

A validação dos construtos e do modelo foi realizada por meio da modelagem de equações estruturais (MEE). A unidimensionalidade dos construtos foi avaliada utilizando o Alfa de Cronbach e o índice de confiabilidade Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). Valores superiores a 0,6 foram considerados satisfatórios (Hair et al., 2010; Hair et al., 2009). Adicionalmente, a

confiabilidade composta (CC) e a variância média extraída (VME) tiveram como valores mínimos aceitáveis 0,60 e 0,50, respectivamente.

A análise fatorial confirmatória foi empregada para validar individualmente os construtos e o modelo final. Os índices de ajuste utilizados para avaliar a qualidade do modelo foram:

- χ^2/gl (qui-quadrado sobre graus de liberdade): valor aceitável abaixo de 3.
- RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation): valor aceitável abaixo de 0,08.
- CFI (Comparative Fit Index): valor aceitável acima de 0,95.
- TLI (Tucker-Lewis Index): valor aceitável acima de 0,95.
- GFI (Goodness of Fit Index): valor aceitável acima de 0,95.

A significância dos coeficientes estimados foi avaliada individualmente por meio dos testes de Wald, e a estrutura das covariâncias dos erros foi ajustada para melhorar a qualidade do ajuste do modelo, conforme recomendado na literatura (Pilati; Laros, 2007). Com base nos resultados obtidos, foi possível discutir as implicações práticas e teóricas das relações identificadas, contribuindo para o entendimento da dinâmica entre crescimento econômico, qualidade da água e saúde pública nos municípios brasileiros.

Capítulo I

Análise da relação entre o PIB per capita e a poluição dos rios brasileiros: evidências da hipótese da curva ambiental de Kuznets

Resumo: Este artigo examina a complexa relação entre o crescimento econômico, a poluição dos rios e o saneamento básico no Brasil, utilizando a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) como medida de poluição e o Produto Interno Bruto (PIB) per capita como indicador de desenvolvimento econômico. A pesquisa foi realizada em 950 municípios brasileiros em 2020, evidenciando desigualdades regionais e estágios específicos de desenvolvimento que demandam ações de preservação ambiental. Os resultados revelaram que regiões mais desenvolvidas tendem a concentrar atividades industriais e urbanas, resultando em níveis mais elevados de poluição dos rios. Por outro lado, áreas menos desenvolvidas enfrentam desafios na melhoria da infraestrutura de saneamento básico, o que contribui para a degradação hídrica. Identificaram-se também pontos de inflexão na relação entre o PIB per capita e a poluição dos rios, sugerindo estágios específicos de crescimento econômico nos quais são necessárias medidas de preservação ambiental. Esses achados ressaltam a importância de investimentos em infraestrutura de saneamento básico, particularmente em regiões menos desenvolvidas, e da implementação de estratégias de gestão ambiental que promovam um equilíbrio entre o crescimento econômico e a conservação dos recursos hídricos. As conclusões deste estudo fornecem subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas direcionadas à gestão dos recursos hídricos e ao desenvolvimento sustentável no Brasil.

Palavras-chave: poluição dos rios, crescimento econômico, saneamento básico, desigualdades regionais.

Abstract: This article examines the complex relationship between economic development, river pollution and basic sanitation in Brazil, using Biochemical Oxygen Demand (BOD) as a measure of pollution and Gross Domestic Product (GDP) per capita as an indicator of economic development. The research was carried out in 950 Brazilian municipalities in 2020, highlighting regional inequalities and specific stages of development that require environmental preservation actions. The results revealed that more developed regions tend to concentrate industrial and urban activities, resulting in higher levels of river pollution. On the other hand, less developed areas face challenges in improving basic sanitation infrastructure, which contributes to water degradation. Inflection points were also identified in the relationship between GDP per capita and river pollution, suggesting specific stages of economic development in which environmental preservation measures are necessary. These findings highlight the importance of investments in basic sanitation infrastructure, particularly in less developed regions, and the implementation of environmental management strategies that promote a balance between economic growth and the conservation of water resources. The conclusions of this study provide valuable input for the formulation of public policies aimed at the management of water resources and sustainable development in Brazil.

Keywords: river pollution, economic development, basic sanitation, regional inequalities.

1 Introdução

O consumo de água doce no mundo aumentou seis vezes no último século e continua a avançar a uma taxa de 1% ao ano, fruto do crescimento populacional, do crescimento econômico e das alterações nos padrões de consumo. Por outro lado, a qualidade da água diminuiu imensamente, afetando mais de dois bilhões de pessoas (Onu, 2021). Igualmente, o Brasil é depositário de 13,22% do volume total de água doce disponível do mundo, caracterizando-se como uma região com abundância desse recurso (Martins; Gelain; Almeida, 2020). Apesar disso, nas últimas décadas, tem sido extensivamente observado que as atividades humanas tem causado degradação na qualidade das águas superficiais e subterrâneas no Brasil (Girardi, 2019).

Segundo Wang; Song; Zhang (2023), o Produto Interno Bruto (PIB), a renda per capita e a densidade populacional estão significativamente correlacionados com a qualidade da água. De maneira análoga à Wang; Song; Zhang (2023), Mahanayak; Panigrahi (2021), destacam que o aumento populacional contínuo e a industrialização são fatores que contribuem para a degradação da qualidade da água dos rios. Nesse sentido, a Curva Ambiental de Kuznets, tem sido amplamente utilizada para explicar a relação existente entre a poluição ambiental e o crescimento econômico. Ademais, segundo Lu *et al.* (2021), a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets fornece uma estrutura para descrever a teoria econômica que procura explicar a relação entre as variáveis. A busca de um ambiente sustentável é um grande desafio para todas as economias do mundo. As evidências da hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (EKC) elucidam a associação entre atividade econômica e deterioração da qualidade ambiental (Azam *et al.*, 2024).

Nesse sentido, diversos estudos utilizam a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets no contexto da qualidade da água dos rios Barua; Hubacek(2008); Granda; Pérez; Muñoz (2008); Lee; Chiu; Sun (2010); Everett *et al.*(2010); Chen *et al.*(2018);Boamah *et al.* (2018); Yu; Lu (2018); Yang; Wen (2018); Desbureaux *et al.* (2019); Brockwell *et al.*(2021); Ye *et al.* (2022); Russ *et al.*(2022); Mao *et al.*(2022); Voumik; Sultana; Dey (2023); Li *et al.* (2023); Taguchi *et al.* (2023). Este trabalho tem como objetivo principal analisar a relação entre o PIB per capita e a poluição da água dos rios brasileiros sob a ótica da Curva Ambiental de Kuznets

Apesar da robustez de evidências internacionais, são poucos os estudos que testam a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, em relação ao PIB per capita e qualidade da água dos rios no Brasil. Sendo assim, este artigo busca responder o seguinte problema de pesquisa: como o crescimento econômico afeta a qualidade ambiental da água dos rios brasileiros?

2 Referencial Teórico

2.1 Impactos ambientais do crescimento econômico na qualidade dos rios no Brasil

A poluição em rios, e outras águas superficiais é uma preocupação ambiental crescente em todo o mundo devido às suas consequências negativas potencialmente grandes para a saúde do ecossistema e o bem-estar humano (Wang *et al.*, 2024). Segundo, Mello *et al* (2020), o Brasil contém o maior volume de água doce do mundo, no entanto, este recurso natural está sendo ameaçado pelo rápido aumento no consumo e degradação da qualidade da água, devido as ações antrópicas. O declínio da qualidade da água tornou-se uma preocupação mundial, cada vez mais expressiva à medida que as atividades econômicas e as populações humanas se expandem (Mello *et al.*, 2020).

Neste sentido, o Brasil o histórico da evolução dos usos da água está diretamente relacionado ao crescimento econômico e ao processo de urbanização do país (ANA, 2018). De acordo com Russ *et al.* (2022), a atividade econômica gera poluição ambiental, em que, para os autores, o crescimento econômico e a poluição da água estão intrinsecamente ligados.

Problemas ambientais, incluindo poluição da água, afetam a sustentabilidade de longo prazo das nações, por isso é crucial considerar os efeitos da degradação ambiental deste recurso (Sun, *et al.*, 2024). No entanto, é importante reconhecer que, apesar do potencial para eficiência aprimorada, os efeitos negativos resultantes de uma escala maior de produção podem não ser completamente neutralizados (Khezri; Karimi, Naysary,2024).

A industrialização, e a urbanização acelerada e desorganizada, são variáveis que impactam negativamente na qualidade das águas dos rios (Zhang *et al.*, 2020; Nahiduzzaman; e Sadiq, 2023). Ademais, segundo Goi (2020), os seres humanos utilizam os rios, para as necessidades diárias como água potável, transporte, geração de energia por meio de hidrelétricas, atividades de lazer e irrigação. Consequentemente a má utilização deste recurso, tem sido um grave problema para o meio ambiente, devido aos impactos na qualidade da água dos rios. Nesse sentido, Everett *et al.* (2010), afirmam que a relação entre o crescimento econômico e o meio ambiente é complexa. Diversas variáveis influenciam neste sistema complexo, incluindo a atividade produtiva e o descarte inadequado de efluentes, por exemplo. Apesar disso, a participação dos serviços no Produto Interno Bruto (PIB) e o uso de novas tecnologias de produção têm o potencial de mitigar os impactos ambientais das decisões de

produção e de consumo, enquanto também contribuem impulsionando o crescimento econômico.

Segundo Lee; Chiu; Sun (2010), os impactos do crescimento da economia, resultam em problemas de poluição através do processo de industrialização de um país. O grau de poluição da água também se torna mais intenso com o tempo, com isso, a poluição desses recursos faz com que as pessoas contraíam vários tipos de doenças, como infecções de pele, corrosão dos dentes e diarreias, por exemplo. Todavia segundo Priyanga; Thilagavathi; Selvaraj (2023), a poluição de fontes pontuais e não pontuais influenciadas pelas atividades humanas, impactam negativamente na qualidade da água. Sendo assim, em relação ao crescimento econômico e a qualidade da água, as descargas de esgotos industriais nos espaços urbanos, o despejo de resíduos sólidos, o escoamento agrícola, bem como o destino inadequado de efluentes líquidos domésticos são algumas das principais causas de contaminação da água dos rios (Serraglio *et al.*, 2021; Priyanga; Thilagavathi; Selvaraj, 2023).

Entretanto, nos últimos anos a qualidade da água no Brasil está em evidência e em extensa discussão, devido aos diversos casos de contaminação dos recursos hídricos, por cianobactérias e agentes patogênicos. Exemplos de poluição da água, incluem aumento na demanda bioquímica (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), bem como a incidência de metais pesados (Mao *et al.* 2022).

Além disso, Voumik, Sultana; Dey (2023), citam em seu estudo que, os problemas ambientais são especialmente prevalentes em países emergentes, denotando íntima relação entre as fases do crescimento econômico e a qualidade da água dos rios, uma vez que as economias de países em desenvolvimento priorizam o crescimento econômico acima da proteção ambiental. Neste sentido, em seu estudo Russ *et al.* (2022), ao analisarem a relação existente entre o crescimento econômico e a qualidade da água para 17 países no período de 1990 a 2014, observaram que na ocorrência de poluição grave dos rios, as regiões a jusante, apresentam perdas entre 1,4% e 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB). De maneira análoga, Desbureaux *et al.* (2019), observaram que, quando os rios se tornam muito poluídos as regiões a jusante, sofrendo reduções no crescimento econômico entre 0,8% e 2,0%, essas perdas implicam em muitos lugares, os custos da degradação ambiental.

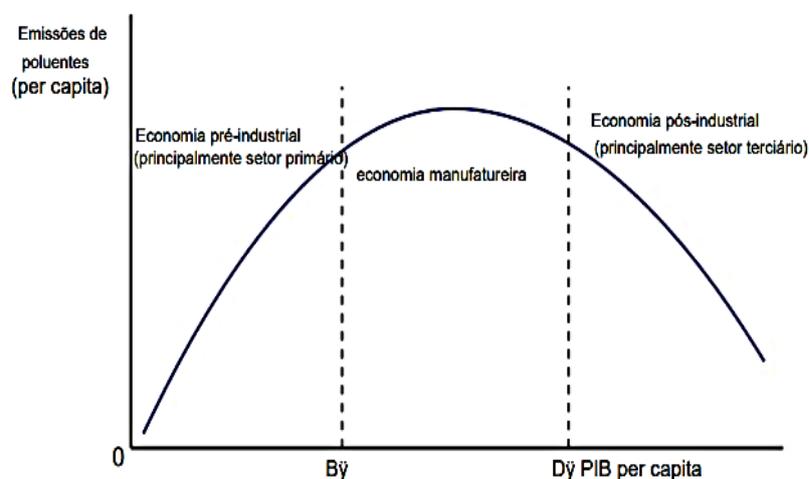
No entanto Li *et al.* (2023), citam que o crescimento econômico tem um impacto significativo tanto na quantidade como na qualidade da água. Contudo segundo Li *et al.* (2023), destacam que, são poucos os estudos que têm considerado a complexa relação entre quantidade e qualidade da água e crescimento econômico.

2.2 Hipótese da curva ambiental de Kuznets

Segundo Mao *et al.* (2022), a Curva de Kuznets (KC) é um dos conceitos econômicos mais populares para explicar a desigualdade de renda em uma sociedade. Neste sentido, Kuznets (1955), usou uma curva em forma de U invertido para explicar a relação existente entre o crescimento econômico e a desigualdade de renda. O autor propôs que à medida que a economia (PIB per capita) cresce, a desigualdade econômica (desigualdade de renda) primeiro aumenta, para, num segundo momento diminuir. Na década de 1990, foi adaptado o conceito em que se relacionou a renda e a poluição ambiental, os quais também apresentariam uma relação na forma de U invertido entre as variáveis. Esta ideia foi chamada de Curva de Kuznets Ambiental (MAO *et al.* 2022).

A Curva Ambiental de Kuznets tornou-se a principal área de debate nas últimas décadas. Desde então, foram apresentadas várias relações da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets para muitos indicadores de qualidade ambiental, especialmente aqueles para a qualidade do ar e da água, que afetam diretamente a saúde humana (Mao *et al.*, 2022). Grossman e Krueger (1991), foram os pioneiros em comprovar a autenticidade da existência da relação na forma de “U” invertido entre a poluição ambiental e o crescimento econômico. De acordo com Leal e Marques (2022), o modelo da Curva Ambiental de Kuznets (CAK), tem sido amplamente utilizado para explicar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental, e sua evolução em virtude do crescimento da economia. A seguir a figura 4 ilustra a Curva Ambiental de Kuznets, a qual faz a relação entre desenvolvimento econômico e degradação ambiental.

Figura 4 - Curva Ambiental de Kuznets (CAK)



Fonte: Lawson; Martino; Nguyen-van (2020).

Observa-se na figura 4, que a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets propõe que, nos primeiros estágios crescimento econômico, a poluição ambiental piora rapidamente, pois os indivíduos estariam mais interessados em suprir suas necessidades básicas de sobrevivência do que com a qualidade do ar e da água. Ademais, neste tipo de sociedade, a regulamentação ambiental tende a ser correspondentemente fraca (Taguchi *et al.* 2023). Russ *et al.* (2022), explicam que a relação da poluição da água com o Produto Interno Bruto (PIB), provavelmente ressaltará uma relação não linear (uma função quadrática, ou até mesmo cúbica) entre as variáveis, em que num primeiro momento, na medida em que se aumenta o desenvolvimento econômico, tenderá a ocorrer o aumento da poluição das águas dos rios, para que, após determinado ápice de poluição, a relação torna-se negativa na medida em que continua o aumento do crescimento econômico.

Segundo Everett *et al* (2010), outras elucidações possíveis para a forma da Curva Ambiental de Kuznets especificamente incluem: o avanço tecnológico, em que as empresas inicialmente se concentram em expandir a produção o mais rápido possível, mas conforme a tecnologia evolui, os processos de produção tornam-se mais sustentáveis e mais eficientes em termos de recursos. Segundo, Leal; Marques (2022), outra maneira que a curva em forma de U invertido é comumente interpretada é quando o crescimento econômico é dividido em três fases, a saber: primeiro a economia pré-industrial, caracterizada principalmente pelo setor primário e baixos níveis de renda; segundo a economia industrial, constituída pelo setor secundário e associada aos níveis de renda média; e terceira a economia pós-industrial, formada pelo setor terciário e serviços, e associada a maiores níveis de renda.

Leal; Marques (2022), completam que, na economia pré-industrial, a atividade econômica é limitada e resulta em abundância de recursos naturais e redução na formação de resíduos. Nesta fase, o uso de tecnologia poluente, a falta de consciência ambiental e a priorização do crescimento econômico resultam no aumento da degradação ambiental. Segundo Leal; Marques (2022), a economia industrial é caracterizada por recursos naturais que estão começando a se esgotar e o acúmulo crescente de resíduos por causa da industrialização. Nessa fase, verifica-se uma relação positiva entre crescimento econômico e deterioração ambiental, e ocorre antes que o ponto de inflexão seja alcançado.

Ademais, a terceira fase do crescimento econômico é caracterizada por uma mudança estrutural na economia, passando para uma economia baseada em informação e tecnologia, com uma economia voltada para o setor de serviços. Esta alteração está associada ao reforço da regulamentação ambiental, à utilização de tecnologias mais limpas e eficientes, e principalmente ao reforço da educação ambiental, resultando numa diminuição da poluição

ambiental. Nessa fase, observa-se uma relação negativa entre o crescimento econômico e a degradação ambiental, o que ocorre após o ponto de inflexão da Curva Ambiental de Kuznets (Leal; Marques, 2022). Em conformidade a relação em forma de U invertido entre poluição e crescimento econômico é que, uma vez que a economia atinge um certo nível, os indivíduos começam a exigir certas políticas do governo, incluindo regulamentação ambiental mais rigorosa (Durmaz; Thompson, 2024).

Em suma, como observado, na Curva Ambiental de Kuznets (EKC), em forma de U invertido, em um primeiro há o aumento da degradação ambiental, porém após o ponto de inflexão da curva as melhorias ambientais acabarão por ocorrer à medida que as economias crescem. No entanto, outros estudos observaram que à estas duas fases são acrescidas uma terceira, tornando uma relação entre as variáveis na forma de N, o que sugere que a degradação ambiental poderá aumentar novamente além de um certo nível de PIB per capita (Allard *et al.*, 2017; Poudel; Paudel; Bhattarai, 2009).

De acordo Gravina; Lanzafame, (2024), em economias emergentes há uma relação em forma de N invertido a degradação ambiental e PIB per capita. A complexa relação entre o crescimento econômico, estruturas de governança e poluição ambiental tem sido um assunto de intensa investigação e debate há muito tempo, no cerne desse discurso está a questão de como as nações podem alcançar prosperidade econômica sem comprometer sua integridade ambiental (Rom e Guillotreau, 2024).

Neste sentido, Tabosa; Araujo; Sales (2020), ao analisarem a relação entre a degradação ambiental e o desenvolvimento econômico concluíram que o crescimento econômico apresentou o formato de “N” invertido em relação à degradação ambiental para algumas regiões do Brasil. Em colaboração a isso, Chen *et al.* (2018); Brockwell *et al.* (2021), observaram uma relação na forma de N invertido entre a poluição da água dos rios e o crescimento econômico.

A seguir na tabela 1, é evidenciado a relação dos estudos, de vários autores de diferentes regiões, que apresentam evidências teóricas e empíricas, da relação do crescimento econômico com a degradação da qualidade ambiental.

Tabela 1: Evidências teóricas e empíricas da Curva Ambiental de Kuznets

Autor e ano	Período	Local	Método	Resultados
Barua; Hubacek (2008).	1981-2000	16 Estados da Índia	Regressão com dados em painéis	Observaram resultados mistos em relação aos indicadores de qualidade da água DBO e DQO e renda. Dos 16 estados indianos analisados, 4 regiões mostraram curvas em forma de U invertido e 8 estados apresentaram curvas em forma de N. Para a maioria dos estados, o primeiro ponto de inflexão apareceu em um nível de renda per capita de Rs. 5.000 (US\$ 100), e o segundo ponto de virada em Rs. 15.000 (US\$ 320). Os resultados obtidos não corroboram a evidência da EKC comum para o conjunto de países estudados.
Granda; Pérez; Muñoz (2008),	1980 a 2000	46 Países	Teste de cointegração	
Lee; Chiu; Sun (2010).	1980-2001	97 países	Método dos momentos generalizados (GMM)	Os resultados apontam para a uma relação na forma de U invertido entre o DBO e o PIB per capita na América e na Europa. Os pontos de inflexão estimados são de aproximadamente: US\$ 13.956 e US\$ 38.221 para América e Europa, respectivamente.
Yu, Lu (2018).	2010-2016	China	Regressão linear	Os resultados confirmam, a relação na forma de U invertido, em que o ponto de inflexão da curva é de ¥40.000 de PIB per capita.
Yang; Wen (2018).	1998 a 2016	China	Mode o ARDL	Observaram que há uma relação de equilíbrio de longo prazo entre a poluição da água e o PIB. Apesar disso, não observaram a relação na forma de U invertido entre os indicadores de poluição da água dos rios e o PIB.
Boamah <i>et al.</i> (2018).	1980 a 2014	China	Causalidade de Granger	Identificaram a presença da Curva Ambiental de Kuznets na forma de N entre o crescimento econômico e a poluição ambiental da China.
Chen <i>et al.</i> (2018).	2005 a 2015	China	Regressão espacial (spatial regression)	Os resultados apontam para uma relação na forma de N invertido entre o crescimento econômico e a concentração de poluentes na água.
Borhan <i>et al.</i> (2021).	1996-2018	Malásia	Equações simultâneas	O resultado do estudo apoia a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (EKC) para todas as medidas de poluentes da água analisadas.
Brockwell <i>et al.</i> (2021).	1998 a 2014	20 países da UE	Dados em painel	Segundo os autores, os resultados da análise mostraram, uma forte ligação entre o teor de oxigênio da água e a renda per capita na forma de N invertido.
Ye <i>et al.</i> (2022).	2008 a 2018	China	Dados em painel	Os resultados mostraram uma relação na forma de U invertido entre o crescimento econômico e a poluição ambiental.

Fonte: elaboração própria (2023).

Observa-se na tabela 1 uma relação de trabalhos em que são testadas a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets no período de 1970 a 2022. A maioria dos trabalhos investiga a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets utilizando o Produto Interno Bruto (PIB)*per capita*, ou a renda *per capita*, e indicadores que remetem à degradação da qualidade da água dos rios, como a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO).

Observa-se na tabela 1, que não há consenso na literatura internacional que suportem a Hipótese Curva Ambiental de Kuznets, quando se analisa a qualidade da água dos rios. Neste sentido, Granda; Pérez; Muñoz (2008); Yang; Wen (2018), não observaram evidências que suportassem a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets na forma de U invertido, N ou N invertido ao analisarem a relação existente entre renda *per capita*, e a qualidade da água dos rios.

No entanto, outras pesquisas (Brockwell *et al.* (2021); Chen *et al.* (2018); Boamah *et al.* (2018), apontam para uma forte relação entre o crescimento econômico, concentração de poluentes na água e, renda *per capita* na forma de N e N invertido, suportam a Hipótese Curva Ambiental de Kuznets. De forma análoga Lee, Chiu e Sun (2010); Yu e Lu (2018); Yang; Wen (2018); Ye *et al.* (2022), observaram a relação na forma de U invertido entre o crescimento econômico e a poluição ambiental dos rios.

3 Método

O presente estudo busca analisar a relação existente entre a qualidade da água dos rios, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e o PIB *per capita* dos municípios brasileiros no ano de 2020. O DBO é uma medida da quantidade de oxigênio necessária para degradar a matéria orgânica por ação biológica. Ela é utilizada para estimar a quantidade de matéria orgânica presente na água, especialmente quando esgotos ou outras fontes de matéria orgânica são descartados em corpos d'água.

Ademais, a escolha das variáveis se deu com base em pesquisas anteriores, os quais mediram a relação foi estabelecida entre crescimento econômico e a poluição dos rios (Lee; Chiu; Sun (2010); Yang; Wen (2018); Desbureaux *et al.* (2019); Serraglio *et al.* (2021); Mao *et al.* (2022); Russ *et al.* (2022); Priyanga; Thilagavathi; Selvaraj (2023); Li *et al.* (2023), Taguchi *et al.* (2023). A escolha do período deu-se em razão da disponibilidade mais recente dos dados pela agência reguladora brasileira (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA).

Nesta pesquisa optou-se por utilizar o logaritmo da variável DBO, uma vez que auxilia na redução de influência de *outliers*. Neste sentido, valores extremos ou *outliers* podem exercer

uma influência desproporcional em modelos com relações quadráticas ou cúbicas. A transformação logarítmica pode mitigar esse efeito, tornando os dados mais robustos a valores extremos. Dessa forma, o modelo se torna mais estável e menos suscetível a pontos atípicos. Ademais, a inclusão dos termos quadráticos e cúbicos no modelo logarítmico permite capturar a natureza não linear da relação entre x e y . Ao ajustar um modelo com termos logarítmicos e polinomiais, permite-se que o modelo se adapte melhor aos dados e capture possíveis curvaturas na relação.

Como objeto de pesquisa tem-se os rios brasileiros. Na amostra selecionada, foram utilizadas informações de 1.421 pontos de coleta, em que foram realizadas 9.146 análises de 590 rios brasileiros. Desta forma, calculou-se o DBO médio de cada rio e, por fim, o DBO médio dos rios de cada município. Apesar da magnitude da amostra, foram excluídos cursos e corpos d'água menores, tais como riachos, ribeirões, córregos, lagos e barragens. Analisou-se também 950 municípios, que representa 17,07% dos municípios brasileiros. Os dados são de fonte secundária, de origem da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023), e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

3.1 O modelo da curva ambiental de kuznets

Alguns estudos empíricos (Bagliani; Bravo; Dalmazzone (2008); Uddin; Alam; Gow (2016); Bakirtas; Cetin (2017); Thompson; Jeffords, (2017), Yu; Lu (2018)), destacam que os modelos que podem ser usados para avaliar a relação entre a poluição ambiental e o crescimento econômico, são principalmente de dois tipos: o modelo quadrático e cúbico, como demonstrado, respectivamente, nas equações 1 e 2:

$$y_i = \phi_0 + \phi_1 PIB_i + \phi_2 PIB_i^2 + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$y_i = \phi_0 + \phi_1 PIB_i + \phi_2 PIB_i^2 + \phi_3 PIB_i^3 + \varepsilon_i \quad (2)$$

onde, y_i denota a quantidade de emissões de poluentes no município, em que nessa pesquisa trata-se do logaritmo dos valores médios de DBO em cada município i ; PIB_i denota o produto interno bruto per capita (PIB per capita) do município i , e ε_i denota um termo de perturbação aleatório. Quando $\phi_1 \neq 0$, $\phi_2 = \phi_3 = 0$, a relação entre y e o PIB per capita é linear. Quando $\phi_1 > 0$, $\phi_2 < 0$, a relação entre y e o PIB per capita segue uma curva em forma de U invertido. Quando $\phi_1 < 0$, $\phi_2 > 0$, a relação entre y e o PIB per capita segue uma curva em forma de U.

Quando $\phi_1 > 0$, $\phi_2 < 0$ e $\phi_3 > 0$, a relação entre y e o PIB per capita é em forma de N. Quando $\phi_1 < 0$, $\phi_2 > 0$ e $\phi_3 < 0$, a relação entre y e o PIB per capita seguem um formato de N invertido. Quando $\phi_1 \neq \phi_2 = \phi_3 = 0$ o status das emissões de poluentes é tal que não está relacionado ao crescimento econômico. Para a determinação dos pontos de mínimo e máximo relativos, calculou-se a derivada primeira e a derivada segunda, respectivamente, conforme demonstrado nas equações (3 e 4).

$$d_1 = \frac{\theta_1}{(-2 \times \theta_2)} \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{\theta_2}{(-3 \times \theta_3)} \quad (4)$$

em d_1 é a derivada primeira, a qual pode ser utilizada nas equações 1 ou 2 e d_2 é a derivada segunda da equação 2. Neste sentido, d_1 indica o ponto de mínimo ou de máximo das equações 1 ou 2 e d_2 indica o segundo ponto de mínimo ou de máximo da equação 2. Tais pontos auxiliam na interpretação da Curva Ambiental de Kuznets, uma vez que indicam os momentos em que cada função muda de crescimento para decrescimento (ou vice-versa), indicando mudança de comportamento entre as variáveis.

4 Resultados

De acordo com o IBGE (2023), o Brasil é composto por 5.570 municípios e possui uma população estimada em aproximadamente 213,3 milhões de habitantes. Neste estudo, uma amostra foi selecionada, abrangendo 950 municípios, totalizando uma população de aproximadamente 89,695 milhões de pessoas. Essa amostra representa cerca de 40% da população total do Brasil.

Nessa pesquisa, foram utilizadas informações provenientes de 1.421 pontos de coleta, com um total de 9.146 análises de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) realizadas em 590 rios brasileiros. Ao observar a figura 5, percebe-se que todas as regiões do Brasil foram consideradas na amostra selecionada.

Por outro lado, a região Norte, que abriga rios de grande porte, como a bacia do rio Amazonas, teve um número menor de análises devido à disponibilidade limitada de dados. Entretanto, é importante ressaltar que o Norte do país apresenta a menor densidade populacional. A vasta cobertura da floresta amazônica e a existência de áreas pouco habitadas contribuem para essa baixa densidade.

Um exemplo notável dessa baixa densidade populacional pode ser observado no estado do Amazonas, que possui a maior extensão territorial do Brasil, mas registra a segunda menor densidade populacional, com apenas 2,23 habitantes por metro quadrado, de acordo com dados do IBGE (2023). Na figura 5, a seguir, no mapa do Brasil, são observados os locais das amostras de DBO.

Figura 5 - Local das amostras de DBO utilizadas na pesquisa



Fonte: Autoria própria (2023)

Na esquerda da Figura 5, é possível observar o mapa hidrográfico do Brasil, em que se destacam em vermelho os pontos de coleta dos dados analisados, abrangendo os rios de maior volume do país. Essa representação geográfica é essencial para compreender a distribuição dos locais de amostragem e ressaltar as características regionais consideradas neste estudo.

Na figura do meio, são apresentadas as 12 principais bacias hidrográficas brasileiras, todas elas abrangidas pela amostra utilizada para análise. Essas bacias incluem a Bacia Amazônica, Bacia do São Francisco, Bacia do Tocantins-Araguaia, Bacia do Paraná, Bacia do Parnaíba, Bacia do Uruguai, Bacia Atlântico Nordeste Ocidental, Bacia do Paraguai, Bacia do Atlântico Nordeste Oriental, Bacia do Atlântico Leste, Bacia do Atlântico Sudeste e Bacia Atlântico Sul. Essas bacias desempenham um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos do país, influenciando a distribuição e disponibilidade de água em diferentes regiões.

Por fim, na figura da esquerda da Figura 5, é possível observar que a amostra selecionada está concentrada nas regiões Sudeste, Sul, Nordeste e Centro-Oeste. Essas regiões são as mais densamente populadas do Brasil, o que reforça a importância de considerá-las na análise dos dados. A seleção da amostra nessas regiões proporciona uma visão abrangente das características e impactos dos recursos hídricos nas áreas mais populosas do país. A seguir na tabela 2. São apresentadas as Estatísticas descritivas da pesquisa.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	N
PIB (R\$ mil)	R\$4.518,02	R\$30.025,89	R\$26,45	R\$748.759,01	950
População	94.415,48	498.037,99	1.682,00	12.325.232,00	950
PIB per capita	R\$33.290,99	R\$33.601,23	R\$6.308,34	R\$357.104,23	950
DBO	4,99	16,39	0,80	425,67	950
Lig. sanitárias*	13.915,40	14.478,28	-	69.172,70	950

* indica o número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes

Observa-se na Tabela 2 que o PIB per capita apresenta um valor máximo de R\$ 357.104,23. A média do PIB per capita para a amostra analisada foi de R\$ 33.290,99, e o valor mínimo observado foi de R\$ 6.308,34, com um desvio padrão de R\$ 33.601,23. É importante ressaltar que o Brasil apresenta desigualdades regionais referentes ao crescimento econômico, o que pode influenciar na poluição ambiental dos rios. Regiões mais desenvolvidas tendem a ter uma maior concentração de atividades industriais e urbanas, o que pode resultar em maiores níveis de poluição hídrica (Sekharan, *et al.*, 2022). Por outro lado, áreas menos desenvolvidas podem ter menor capacidade de investimento em infraestrutura de saneamento básico, contribuindo para a poluição dos corpos d'água (Shrestha *et al.*, 2023).

Em relação à população, a quantidade máxima registrada foi de 12.325.232 habitantes. No entanto, a média da população por município foi de 94.415,48 habitantes, com um valor mínimo de 1.682 pessoas e um desvio padrão de 498.038,00. Destaca-se também, na Tabela 2, que a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) média dos rios brasileiros é de 4,99, com um valor mínimo de DBO de 0,80, um desvio padrão de 16,39 e um valor máximo de DBO chegando a 425,67. A DBO é uma medida amplamente utilizada para avaliar a poluição hídrica, refletindo a quantidade de oxigênio necessária para degradar a matéria orgânica presente na água. Ademais, valores de DBO superiores a 5 indicam um elevado nível de poluição ambiental (PAN, *et al.*, 2019)

De acordo com Brockwell *et al.* (2021), a qualidade da água é influenciada pela densidade populacional. Regiões com maior número de habitantes tendem a poluir mais o ambiente aquático devido a descargas de águas residuais, industriais e domésticas mais significativas. No entanto, uma alta densidade populacional também implica em maior preocupação com a qualidade da água, levando a uma maior disposição para adotar medidas que melhorem essa qualidade (Shahzad *et al.* 2022). Segundo o mesmo autor além disso, a alta densidade populacional está associada a uma melhor infraestrutura de saneamento, o que pode neutralizar o impacto negativo na qualidade da água dos rios.

O nível de DBO em corpos d'água é geralmente causado pelo lançamento de cargas orgânicas, principalmente esgotos domésticos. Conforme a industrialização de um país aumenta, diversos contaminantes, como coliformes totais, coliformes fecais e resíduos líquidos domésticos, são liberados na água, afetando sua qualidade (Priyanga; Thilagavathi; Selvaraj, 2023). No que diz respeito às ligações sanitárias, identifica-se uma média de 13.915,40 ligações a cada 100 mil habitantes, indicando relativo baixo acesso ao saneamento básico nos municípios analisados. Essa hipótese é confirmada pelo fato de que 204, dos 950 municípios analisados não apresentam rede coletora de esgoto sanitário. Nesse sentido, segundo IBGE (2017), 2.211 dos 5.570 municípios brasileiros não apresentam rede coletora de esgoto no ano de 2017.

O saneamento é uma medida fundamental para a qualidade de vida, a saúde pública e a conservação do meio ambiente (World Health Organization, 2019). Estudos mostram que a falta de infraestrutura de saneamento está associada a problemas de saúde e impactos ambientais negativos (Strande *et al.*, 2014; Khalil *et al.*, 2022). Portanto, é importante explorar como a infraestrutura de saneamento se relaciona com o crescimento econômico e a qualidade ambiental nos municípios. A Tabela 3 apresenta uma análise dos dados, incluindo a média da DBO, a quantidade de municípios, a média do PIB per capita, o PIB per capita total e a população, segmentado pelo PIB per capita do município.

Tabela 3 - Quantidade de municípios, DBO médio, quantidade de municípios com DBO médio superior a 5 mg/L, quantidade de municípios sem rede coletora de esgoto, média do número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes, média da população e PIB per capita médio, segmentado pelo PIB per capita do município

PIB per capita do município (em R\$ mil)	N	DBO médio	Municípios com DBO médio > 5*	Sem rede coletora	Ligações sanit. **	População (em milhões)	PIB per capita médio
Inferior a 50	799	5,08	142	177	13.048	55,230	32.817
Entre 50 e 150	137	4,17	27	25	18.110	33,623	67.801
Superior a 150	14	7,65	3	2	21.698	0,842	237.514
Toda a amostra	950	4,99	172	204	13.915	89,695	47.852

*Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA) do Brasil, o parâmetro utilizado para indicar que um rio está poluído em relação à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é de 5 mg/L. ** indica o número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes. Qt de = Quantidade

A tabela 3 apresenta dados segmentados pelo PIB per capita dos municípios, fornecendo informações relevantes para a compreensão desse fenômeno. Ao observarmos os resultados, percebe-se uma correlação entre a condição socioeconômica dos municípios e a qualidade dos rios. Nos municípios com PIB *per capita* inferior a 50 mil reais, encontra-se uma média de DBO de 5,08 mg/L, indicando um nível considerável de poluição. Além disso, 142 municípios apresentam DBO média superior a 5 mg/L, o que evidencia uma preocupante poluição dos rios

nesses locais. Outro dado alarmante é que 177 municípios não possuem rede coletora de esgoto, revelando uma deficiência na infraestrutura de saneamento básico. Essa situação reflete-se na média indicada do número de residências com ligações ao esgoto sanitário, que é de apenas 13.048 a cada 100 mil habitantes. Esses municípios possuem uma população total de 55,230 milhões de pessoas (cerca de 25% da população brasileira) e um PIB *per capita* médio de R\$ 32.817,25.

Na faixa de PIB *per capita* entre 50 mil e 150 mil reais, observa-se uma leve melhoria na qualidade dos rios, com uma média de DBO de 4,17 mg/L. No entanto, ainda existem 27 municípios nessa faixa com DBO média superior a 5 mg/L, indicando a persistência da poluição. Além disso, 25 municípios não possuem rede coletora de esgoto, o que ressalta a necessidade de investimentos em saneamento básico. A média indicada do número de residências com ligações ao esgoto sanitário é de 18.110 a cada 100 mil habitantes. Os municípios nessa faixa apresentam uma população total de 33,623 milhões de pessoas (cerca de 15% da população brasileira) e um PIB *per capita* médio de 67.801,61 reais.

Nos municípios com PIB *per capita* superior a 150 mil reais, encontra-se uma média de DBO de 7,65 mg/L, indicando uma qualidade inferior aos outros grupos. Embora apenas 3 municípios apresentem DBO média superior a 5 mg/L, é preocupante que 2 municípios não possuam rede coletora de esgoto, mesmo nesse contexto econômico mais favorável. A média indicada do número de residências com ligações ao esgoto sanitário é de 21.698 a cada 100 mil habitantes. Esses municípios possuem uma população total de 0,842 milhões de pessoas e um PIB *per capita* médio de 237.514,42 reais.

Considerando-se a amostra completa, com todos os municípios analisados, verificamos que a média de DBO é de 4,99 mg/L. Além disso, 172 municípios apresentam DBO média superior a 5 mg/L, revelando um problema generalizado de poluição dos rios. A falta de rede coletora de esgoto também é uma questão importante, afetando 204 municípios (cerca de 20% da amostra selecionada). A média indicada do número de residências com ligações ao esgoto sanitário é de 13.915 a cada 100 mil habitantes. A população total dos municípios analisados é de 89,695 milhões de pessoas, e o PIB *per capita* médio é de 47.852,52 reais.

Esses resultados corroboram estudos anteriores sobre a relação entre crescimento econômico, qualidade dos rios e saneamento básico (Van Minh e Hung, 2011; Juma, Wang e Li, 2015). Neste sentido, o PIB *per capita* pode ser entendido como um indicador relevante para auxiliar na compreensão da qualidade ambiental. Portanto, esses resultados evidenciam a necessidade de políticas públicas que visem a melhoria da qualidade dos rios brasileiros, especialmente em relação ao saneamento básico. Investimentos em infraestrutura, como redes

coletoras de esgoto, são fundamentais para reduzir a poluição e preservar os recursos hídricos (Khalil *et al.*, 2022). Além disso, a conscientização da população e o estímulo à adoção de práticas sustentáveis são aspectos relevantes para promover a preservação ambiental (Tiwari; Tirumala; Shukla, 2022). Por fim, a análise desses resultados deve ser considerada no planejamento de ações para alcançar um desenvolvimento econômico mais equilibrado e sustentável no país. Na tabela 4, são apresentados os coeficientes e significância dos modelos de regressão OLS da variável exógena log DBO e variáveis endógenas.

Tabela 4 - Coeficientes e significância dos coeficientes dos modelos de regressão OLS da variável exógena log DBO e variáveis endógenas: PIB per capita, PIB per capita ao quadrado e PIB per capita ao cubo, nas formas quadrática e cúbica no ano de 2020

Variáveis	Quadrática		Cúbica	
	Log DBO	Esgotamento Sanitário	Log DBO	Esgotamento Sanitário ****
Constante	5,320e-01 ***	7,947e03 ***	5,875e-01 ***	3,387e03 ***
PIB per capita	-1,175e-06 *	2,195e-01 ***	-4,651e-06 ***	5,049e-01 ***
PIB per capita ao quadrado	5,098e-12 **	-5,981e-07 ***	4,622e-11 ***	-3,975e-06 ***
PIB per capita ao cubo			-9,894e-17 ***	8,126e-12 ***
teste <i>f</i>	2,000	34.199	5,593	37.517
<i>p</i> -valor	0,135	0,000	0,000	0,000

Legenda: * significância de 10%; ** significância de 5%; *** significância de 1%; **** indica o número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes

Esta análise tem como objetivo investigar a relação entre a poluição ambiental da água dos rios brasileiros, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e o Produto Interno Bruto (PIB) per capita, à luz da Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets. A pesquisa foi realizada em 950 municípios brasileiros no ano de 2020, utilizando a média da DBO em cada município e o PIB *per capita* como variáveis de interesse. Além disso, foi incluída a variável endógena "esgotamento sanitário", que mede o número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes.

Observa-se na Tabela 4 que todos os parâmetros das quatro regressões apresentadas (duas funções quadráticas e duas funções cúbicas) foram estatisticamente significantes. Apesar disso, o valor do teste *f* para a regressão na forma quadrática do logaritmo do DBO (conforme demonstrado na equação 1) foi 2,000 e o *p*-valor associado foi 0,135. O teste *f* é usado para verificar se a regressão global é estatisticamente significativa. Nesse caso, o *p*-valor é maior que 0,05, o que sugere que a regressão não é estatisticamente significativa há um nível de

significância de 5%. Sendo assim, a melhor forma de analisar, para a amostra selecionada, a relação existente entre a poluição ambiental dos rios (medido pelo logaritmo dos valores médios de DBO para cada município) e o PIB *per capita* de cada localidade é na forma cúbica.

Considerando-se que todos os parâmetros da regressão foram estatisticamente significantes, tem-se que $\phi_1 < 0$, $\phi_2 > 0$ e $\phi_3 < 0$, logo a relação entre o logaritmo do DBO e o PIB *per capita* seguem um formato de N invertido. A equação de regressão cúbica indica a existência de pontos de inflexão na relação entre o PIB per capita e a DBO dos rios. Esses pontos representam valores críticos do PIB per capita em que ocorrem mudanças significativas na relação entre as variáveis. A análise das derivadas desses termos, conforme demonstrado nas equações 3 e 4, permite identificar esses pontos de inflexão e fornecer uma interpretação mais detalhada.

A análise das derivadas da equação de regressão permite identificar os pontos de inflexão, que são valores críticos do PIB per capita em que ocorrem mudanças na concavidade da curva. O primeiro ponto de inflexão encontra-se no valor de R\$50.313,72 de PIB *per capita* e o segundo ponto de inflexão encontra-se no valor de R\$155.717,27. Esses pontos podem indicar a transição entre estágios de crescimento econômico e suas implicações para a qualidade dos recursos hídricos brasileiros.

Os pontos de inflexão identificados nesta análise podem fornecer *insights* importantes sobre os estágios de crescimento econômico em que as políticas e medidas de preservação ambiental são mais eficazes. Identificar esses pontos críticos pode orientar a implementação de estratégias de gestão ambiental e políticas públicas direcionadas a reduzir a poluição e promover a qualidade dos recursos hídricos em diferentes estágios crescimento econômico.

No contexto da Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, os pontos de inflexão identificados na análise das derivadas podem indicar uma mudança na relação entre o PIB per capita e a DBO dos rios. Segundo essa hipótese, em estágios iniciais, espera-se que o crescimento econômico resulte em maior poluição e, portanto, em um aumento na DBO. No entanto, à medida que o crescimento econômico avança, espera-se que ocorra uma redução na poluição e, conseqüentemente, uma diminuição na DBO dos rios, sob esse prisma a curva ambiental de Kuznets seria apresentado na forma de U invertido ou de N. Nessa pesquisa, como descrito anteriormente, observou-se uma relação na forma de N invertido.

Está aparente contradição entre os resultados observados e a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets pode ser mais bem explicada pela capacidade que os municípios analisados teriam de combater a poluição ambiental dos rios por meio de investimentos em

infraestrutura. Para melhor compreender essa aparente contradição, podemos recorrer aos resultados da segunda regressão, em que a variável dependente é o número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes, representada por y , e a variável independente é o PIB per capita, representado por x . A expressão dessa regressão é $y = 3,387e003 + 5,049e-001x - 3,975e-06x^2 + 8,126e-012x^3$, que possui o formato de N, uma vez que $\phi_1 > 0$, $\phi_2 < 0$ e $\phi_3 > 0$.

Essa segunda regressão sugere que o aumento do PIB per capita está associado a um aumento inicial no número de residências com ligações ao esgoto sanitário, mas à medida que o crescimento econômico avança, o número de residências conectadas ao esgoto diminui. Esse padrão em forma de N indica que, inicialmente, o investimento em infraestrutura de esgotamento sanitário acompanha o crescimento econômico, resultando em mais residências conectadas ao sistema de esgoto. No entanto, em estágios mais avançados de crescimento da economia, outros fatores podem entrar em ação, como restrições ambientais, mudanças nas preferências da população ou a necessidade de adotar tecnologias mais avançadas de tratamento de esgoto.

Esse resultado é mais bem explicado pelos resultados observados na Tabela 4, o qual indica que para os municípios com PIB per capita inferior à R\$ 50.000,00 observam-se graves problemas em infraestrutura em esgotamento sanitário residencial, uma vez que muitos municípios sequer apresentam rede coletora de esgoto, implicando em menor número, para a amostra selecionada, de residências com ligações ao esgoto sanitário à cada 100 mil habitantes. Isso denota que existem poucos impedimentos de que materiais orgânicos presentes no efluente líquido doméstico cheguem até os rios, elevando, portanto, os níveis de DBO dos corpos d'água analisados.

Apesar dessa situação alarmante, os resultados sugerem que no primeiro estágio de crescimento econômico, em que os municípios com PIB per capita inferior à R\$ 63.509,43 (valor calculado por meio da equação 3, utilizando-se os resultados da regressão cúbica da variável endógena esgotamento sanitário), a ocorrência do aumento do PIB per capita permite aos municípios que façam maiores investimento em infraestrutura, permitindo, assim, um tratamento e destinação mais adequada aos efluentes líquidos domésticos, impedindo o descarte inadequado nos rios. Neste sentido, autores como Shafik; Bandyopadhyay (1992), Wang *et al.* (2016), Zeraibi; Balsalobre-Lorente; Shehzad (2021), destacaram a importância do investimento em infraestrutura de esgotamento sanitário para melhorar a qualidade ambiental e a saúde pública em diferentes países.

Por tratar-se de uma função cúbica entre o esgotamento sanitário e o PIB per capita, existe um segundo ponto de inflexão. Nessa pesquisa, este segundo ponto encontra-se no valor de R\$ 163.056,85. Logo, municípios que apresentam PIB per capita entre R\$ 63.509,43 e R\$ 163.056,85 encontram-se no segundo momento da curva, em que a relação entre as variáveis: esgotamento sanitário (que indica o número de residências com ligações ao esgoto sanitário a cada 100 mil habitantes) e o PIB per capita é negativa, denotando maiores dificuldades de se combater a poluição ambiental dos corpos d'água por meio de investimento em infraestrutura de esgotamento sanitário.

É importante destacar que estes pontos de inflexão são próximos aos valores dos pontos de inflexão da equação observada ($\log(y) = 5,875e-001 + -4,651e-006x + 4,622e-011x^2 + -9,894e-017x^3$) quando se regride o logaritmo do DBO (y) e o PIB per capita (x) em que observou-se no valor de R\$50.313,72 de PIB per capita e o segundo ponto de inflexão encontra-se no valor de R\$155.717,27. Nessa equação observa-se que $\phi_2 > 0$, logo se conclui que, neste segundo momento, o aumento do PIB per capita implica no aumento dos níveis de DBO. Esse resultado denota que a poluição ambiental gerada é superior à capacidade de combatê-la.

Por fim, existe ainda um terceiro momento, em que nos municípios com PIB per capita é superior à R\$155.717,27, a relação entre o PIB per capita e o logaritmo do DBO é negativo ($\phi_2 < 0$), denotando que o aumento do PIB per capita permite á esses municípios que façam maiores investimentos em infraestrutura, reduzindo os efeitos da poluição ambiental observada nos rios.

Em suma, os resultados das regressões indicam uma relação não linear entre o PIB per capita, o esgotamento sanitário e a poluição da água dos rios brasileiros. A análise está de acordo com a Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets. Em parte, a análise revela a presença de pontos de inflexão e uma relação complexa entre as variáveis estudadas. A compreensão desses padrões é importante para a formulação de políticas ambientais e de desenvolvimento sustentável, visando a redução da poluição e a melhoria da qualidade da água em diferentes níveis de renda conectadas ao crescimento econômico.

Por fim, a inclusão da variável "esgotamento sanitário" nas regressões permitiu analisar seu efeito na relação entre a DBO dos rios e o PIB per capita. Os resultados indicam que a variável "esgotamento sanitário" tem um efeito positivo e estatisticamente significativo. Isso sugere que o investimento em infraestrutura de esgotamento sanitário pode desempenhar um papel crucial na redução da poluição da água dos rios, independentemente do estágio de

crescimento econômico. A melhoria do saneamento básico não apenas contribui para a qualidade ambiental, mas também para a saúde pública e o bem-estar da população.

Em resumo, esta análise mostra que a relação entre a poluição ambiental da água dos rios brasileiros, medida pela DBO, e o PIB per capita segue um formato de "N" invertido, indicando a presença de pontos de inflexão. Além disso, o investimento em infraestrutura de esgotamento sanitário foi identificado como um fator importante na redução da poluição dos rios. Esses resultados destacam a necessidade de políticas e medidas que considerem os estágios de crescimento econômico, e priorizem o saneamento básico como uma estratégia eficaz para a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável.

5 Considerações Finais

Este artigo analisou a qualidade dos rios brasileiros, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) per capita dos municípios. Observou-se que há uma correlação entre a condição socioeconômica dos municípios e a qualidade dos rios, destacando a influência das desigualdades regionais no crescimento econômico na poluição ambiental dos rios.

Regiões mais desenvolvidas, com maior PIB per capita, tendem a apresentar uma maior concentração de atividades industriais e urbanas, o que resulta em maiores níveis de poluição hídrica. Por outro lado, áreas menos desenvolvidas podem ter menor capacidade de investimento em infraestrutura de saneamento básico, contribuindo para a poluição dos corpos d'água.

A análise dos dados revelou que a falta de infraestrutura de saneamento básico é um problema importante, com um número significativo de municípios sem rede coletora de esgoto. Essa deficiência na infraestrutura afeta a qualidade da água dos rios e tem impactos negativos na saúde pública e no meio ambiente.

Os resultados também confirmaram a hipótese da curva ambiental de Kuznets, mostrando que a relação entre o PIB per capita e a DBO dos rios segue um formato de N invertido. Identificaram-se pontos de inflexão que indicam mudanças significativas na relação entre as variáveis, fornecendo insights sobre os estágios de crescimento econômico em que as políticas de preservação ambiental são mais eficazes.

A Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets foi parcialmente confirmada, uma vez que foram identificados pontos de inflexão na relação entre o PIB per capita e a poluição dos rios. Esses pontos indicam estágios de crescimento econômico em que ocorrem mudanças na

concauidade da curva, sugerindo a necessidade de medidas específicas de preservação ambiental.

Para combater a poluição dos rios e promover a qualidade ambiental, é fundamental investir em infraestrutura de saneamento básico, principalmente em áreas menos desenvolvidas. Além disso, estratégias de gestão ambiental devem ser implementadas em conjunto com políticas públicas que incentivem o desenvolvimento sustentável, buscando equilibrar o crescimento econômico com a preservação dos recursos hídricos.

Diante desses resultados, é evidente a necessidade de políticas públicas que visem à melhoria da qualidade dos rios brasileiros, especialmente no que diz respeito ao saneamento básico. Investimentos em infraestrutura, como redes coletoras de esgoto, são fundamentais para reduzir a poluição e preservar os recursos hídricos.

Além disso, a conscientização da população e o estímulo à adoção de práticas sustentáveis são aspectos relevantes para promover a preservação ambiental. É essencial que a análise desses resultados seja considerada no planejamento de ações para alcançar um desenvolvimento econômico mais equilibrado e sustentável no país.

Portanto, é fundamental a implementação de medidas que visem a redução da poluição dos rios, o aumento do acesso ao saneamento básico e a promoção de práticas sustentáveis. A integração de políticas ambientais, econômicas e sociais é essencial para garantir um futuro mais sustentável para o Brasil e a preservação dos recursos hídricos para as gerações futuras.

Referências Bibliográficas

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Dados abertos da Agência Nacional de Águas e Saneamento e Básico 2020**. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/>.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **INDICADORES DE QUALIDADE - ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS (IQA) 2023**. Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn4. Acessado em: 31/05/2023

ANA. Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico. Agência Nacional de Águas (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual / Agência Nacional de Águas**. - Brasília: ANA, 2018, 72 p. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe_conjuntura_2018.pdf. Acessado em: 05/04/2023.

ALLARD, A. et al. The N-shaped environmental Kuznets curve: an empirical evaluation using a panel quantile regression approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, 5848-5861, 2018. Available in: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-0907-0>. Access at: 28/04/2023.

BAGLIANI, Marco; BRAVO, Giangiaco; DALMAZZONE, Silvana. A Consumption-based Approach to Environmental Kuznets Curves Using the Ecological Footprint Indicator. **Ecological Economics**, v. 65, n. 3, p. 650-661, 2008. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800908000372>. Access at: 23/05/2023.

BAKIRTAS, Ibrahim; CETIN, Mumin Atalay. Revisiting the environmental Kuznets curve and pollution haven hypotheses: MIKTA sample. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 18273-18283, 2017. Available in: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-9462-y>

BARUA, A.; HUBACEK, K. Water Pollution and Economic Growth: An Environmental Kuznets Curve Analysis at the Watershed and State Level. **International Journal of Ecological Economics and Statistics**, v. 10, p. 63-78, 2008. Available in: <http://ceser.in/ceserp/index.php/ijees/article/view/1844>. Access at: 06/05/2023.

BOAMAH, K. et al. A study on the causal effect of urban population growth and international trade on environmental pollution: evidence from China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 4, p. 1-13, fev. 2018. Available in: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-0882-5>. Access at: 03/03/2023

BORHAN, H. et al. Modelling the Environmental Kuznets Curve of Water Pollution Impact on Economic Growth in Developing Country. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 11(5), 545-552, ISSN: 2146-4553, 2021. Available in: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeeep/article/view/11571/6055>. Access at: 21/03/2023.

BROCKWELL, E. et al. Spatial analysis of water quality and income in Europe. **Water Resources and Economics**, v.35, July 2021, 100182. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212428421000074>. Access at: 13/04/2023.

CHEN, X. et al. Evaluating Economic Growth, Industrial Structure, and Water Quality of the Xiangjiang River Basin in China Based on a Spatial Econometric Approach. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 10, p. 2095, 2018. Available in: <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/10/2095>. Access at: 01/05/2023.

DESBUREAUX, S. et al. The Impact of Water Quality on GDP Growth. International Bank for Reconstruction and Development, **World Bank Group**, Washington, DC 204332019. Available in: <http://hdl.handle.net/10986/33071>. Access at: 21/12/2023.

EVERETT, T. et al. Economic growth and the environment. **MPRA-Munich Personal Repec Archive**, 2010. Available in: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/23585/>. Access at: 12/04/2023.

GIRARDI, Rubia. Parâmetros de qualidade de água de rios e efluentes presentes em monitoramentos não sistemáticos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, n. 2019, 2019. Disponível em <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/137>. Access at 15/05/2023.

GOI, C. L. The river water quality before and during the Movement Control Order (MCO) in Malaysia. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 2, p.

100027,2020. Available in:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016420300256>. Acessat: 10/05/2023.

GRANDA, C.; PÉREZ, L.; MUÑOZ, J. C. La courbea environnementale de Kuznets appliquée à laqualité de l'eau: Une analyse de sapertinen ceenutili santle test de racineunitaire et letest de cointégration. **Scielo. Lect. Econ.** [online], n.69, p.221-244, ISSN 0120-2596, 2008. Available in:http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-25962008000200009&script=sci_abstract&tlng=fr. Access at: 01/05/2023.

GROSSMAN, Gene M. and KRUEGER, Alan B. (1991). “Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement”, NBER Working Paper, No. 3914, **Cambridge, National Bureau of Economic Research**. DOI 10.3386/w3914.

IBGE. **Brasil/ Amazonas 2023**. Disponível em:

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/panorama>. Acessado em: 31/05/2023.

IBGE.**IBGE divulga estimativa da população dos municípios para 2021**. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=popula%C3%A7%C3%A3o%20brasileira>. Acessado em:05/06/2023.

IBGE. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil /Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. Rio de Janeiro 2021. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101854.pdf>. Acessado em 05/06/2023.

IBGE. **PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2017. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html>.

KHALIL, Luqman et al. Sanitation, water, energy use, and traffic volume affect environmental quality: Go-for-green developmental policies. **Plosone**, v. 17, n. 8, p. e0271017, 2022.

JUMA, Dauglas Wafula; WANG, Hongtao; LI, Fengting. Impacts of population growth and economic development on water quality of a lake: case study of Lake Victoria Kenya water. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, p. 5737-5746, 2014.

LAWSON, L. A.; MARTINO, R.; NGUYEN-VAN, P. Environmental convergence and environmental Kuznets curve: A unified empirical framework. **Ecological Modelling**, v. 437, p. 109289, 2020. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109289>. Access at: 07/05/2023.

LEAL, P. H; MARQUES, A. C. The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective. **Heliyon Cell Press**, Review Article, v. 8, ISSUE 11, E11521, 2022. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11521>. Access at: 04/05/2023.

LEE, Chien-Chiang; CHIU, Yi-Bin; SUN, Chia-Hung. The environmental Kuznets curve hypothesis for water pollution: Do regions matter?. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 12-23, 2010. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421509003188>. Access at: 21/04/2023.

LU, Chenxi et al. Kuznets Environmental Curve Econometrics: Testing Progress towards Carbon Intensity Driven Sustainability for Eight Economic Zones in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124561, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124561>. Access at: 05/11/2023

LI, Jiaqi et al. Copula-based analysis of socioeconomic impact on water quantity and quality: a case study of the Yitong River, China. **Total Environmental Science**. v. 859, p. 160176, 2023. available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972207276X>

MAO, F. et al. Inequality of household water security follows a Development Kuznets Curve. **Nature Communications**, v. 13, Article number 4525, 2022. Available in: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31867-3#Sec6>. Access at: 21/03/2023.

MELLO, K. et al. Impactos do uso multiescalar da terra na qualidade da água: avaliação, planejamento e perspectivas futuras no Brasil. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110879, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720308094>. Acessado em: 14/04/2023.

MARTINS, M. M. V.; GELAIN, J. G.; DE ALMEIDA, A. N. As exportações de frutas brasileiras: uma perspectiva da água virtual. **Revista de Economia e Agronegócio**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 1–22, 2021. DOI: 10.25070/rea.v18i2.8267. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rea/article/view/8267>. Acessado em: 11/05/2023.

MAHANAYAK, B.; PANIGRAHI, A. K. Sustainable management of the aquatic ecosystem and the fishermen cooperate societies in India: a brief review. **Uttar Pradesh Journal of Zoology**, Muzaffarnagar, India, 42 (16), p. 29, 2021.

NAHIDUZZAMAN, K. M.; SADIQ, R. Planning and management of water and water infrastructure under climate stress. **Environmental Reviews**, v. 31, n. 1, p. 1-3, 2023. Available in: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/er-2022-0127>. Access at: 28/03/2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Agências da ONU lançam Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/123077-ag%C3%A2ncias-da-onu-lan%C3%A7am-relat%C3%B3rio-mundial-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-h%C3%ADricos>. Acesso em: 11/05/2023.

PAN, Libo et al. A review of heavy metal pollution levels and health e risk assessment o furans oils in Chinese cities. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 1055-1069, 2018.

PAUDEL, B.N.; PAUDEL, K. P.; BHATTARAI, K. In search of an environmental Kuznets curve for the polluting carbon dioxide in Latin American countries. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 41, n. 1, pág. 13-27, 2009. Available in: <https://www.proquest.com/openview/78c4f1a68414a764e7f625a080649306/1?pq-origsite=gscholar&cbl=35330>. Access at: 28/04/2023.

PRIYANGA, V.; THILAGAVATHI, M.; SELVARAJ, K. N. Assessment of Water Quality to Economic Development: A Quantifying Environmental Kuznets Curve. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n. 2, p. 66-74, Articlno. I

JECC.96769ISSN:2581-8627, 2023. Available in:

<https://journalijecc.com/index.php/IJECC/article/view/1654/3291>. Access at: 21/03/2023.

RUSS, Jason et al. The impact of water quality on GDP growth: Evidence from around the world. **Water Security**, v. 17, p. 100130, Dec. 2022. Available in:

<https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100130>. Available in: 20/04/2023.

SEKHARAN, Sheeba et al. River pollution monitoring over an industrial catchment in urban ecosystem: Challenges and proposed geospatial framework. **Environmental Challenges**, v. 7, p. 100496, 2022. Available in: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100496>

SHRESTHA, Aman et al. Water, sanitation, and hygiene of Nepal: status, challenges, and opportunities. **ACS ES&T Water**, 2023. Available in:

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsestwater.2c00303>

SHAFIK, Nemat; BANDYOPADHYAY, Sushenjit. Economic growth and environmental quality: time series and cross-country evidence. **World Bank Publications**, 1992. Available in: <https://scholar.google.com.br/scholar>.

SHAHZAD, Tahir et al. People's attitude towards willingness-to-pay for environmental protection in Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 35, p. 52635-52654, 2022. Available in: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-18177-9>.

SERRAGLIO, R. D. et al. Parâmetros de Qualidade da Água no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 7, 2021. ISSN: 1984-2295. Available in: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/250173/40255>. Acessado em: 06/04/2023.

STRANDE, L.; BRDJANOVIC, D. (Ed.). **Faecal sludge management: Systems approach for implementation and operation**. IWA publishing, 2014.

TABOSA, F. J. S. ARAUJO, J. A.; SALES, A. P. Conditions of environmental degradation in Brazilian countryside areas. **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, n. 3, ISSN 2166-0379, 2020. Available in: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/51625/1/2020_art_fjstabosa.pdf. Access at: 21/03/2023.

TAGUCHI, H. et al. Water Pollution and Pollution–Control Capacity in Chinese Provinces: Panel Estimations of Provincial Environmental Kuznets Curves. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 3979, 2023. Available in: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/3979>. Access at: 21/03/2023

THOMPSON, A., JEFFORDS, C. Virtual Water and an EKC for Water Pollution. **Water Resour Manage**, 31, 1061–1066 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1541->.

TIWARI, Piyush; TIRUMALA, Raghu Dharmapuri; SHUKLA, Jyoti. House hold choices of sanitation infrastructure and impact on disease in India. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 49, n. 8, p. 2054-2071, 2022. Available in: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/23998083221088293>

UDDIN, Gazi A.; ALAM, Khorshed; GOW, Jeff. Does Ecological Footprint Impede Economic Growth? An Empirical Analysis Based on the Environmental Kuznets Curve

Hypothesis. **Australian economic papers**, v. 55, n. 3, p. 301-316, 2016. Available in: <https://doi.org/10.1111/1467-8454.12061>. Access at: 23/05/2023.

VAN MINH, Hoang; HUNG, Nguyen Viet. Economic aspects of sanitation in developing countries. **Environmental health insights**, v. 5, p. EHI. S8199, 2011.

VOUMIK, L. C.; SULTANA, R.; DEY, R. Going Green or Going Green in the BRICS: Investigating the EKC Hypothesis with Human Capital Index, Nuclear Energy, Urbanization and Environmental Services Sectors. **World Development Sustainability**, vol. 2, p. 100060, 2023. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772655X23000198>. Access at: 20/04/2023.

WANG, W. et al. Analysis of point source pollution and water environmental quality variation trends in the Nansi Lake basin from 2002 to 2012. **Environmental Science Pollution Research**, v. 23, p. 4886–4897, 2016. Available in: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5625-x>. Access at: 07/05/2023.

WANG, T.; SONG, Y.; ZHANG, Fengying. Clean manufacturing structure and its impact on water quality: a case study from Northeast China. **Journal of Cleaner Production**, [online]. 2023, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137323> Access at: 05/16/2023

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Water, sanitation, hygiene and health: a primer for health professionals**. Geneva: World Health Organization, 2019.

YE, Maosheng et al. “Green” economic development in China: quantile regression evidence from the Yangtze River Economic Belt. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 40, p. 60572-60583, 2022. Available in: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-20197-y>

YANG, J; WEN, Y. Study on the Relationship between Economic Growth and Water Pollution in Jiangxi Province—Based on ARDL Model. **Journal of Power and Energy Engineering**, [S.l.], v. 6, n. 7, p. 44-53, 2018. DOI: 10.4236/jpee.2018.67004. Available in: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=86307>. Access at: 04/05/2023

YU, Sen; LU, Hongwei. Relationship between urbanization and pollutant emissions in transboundary river basins under the strategy of the Belt and Road Initiative. *Chemosphere*, v. 203, p. 11-20, 2018. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/ab>.

ZHANG, Y. et al. Decoupling water environment pressures from economic growth in the Yangtze River Economic Belt, China. **Ecological Indicators**, v. 122, p. 107314, 2020. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20312565>. Access at: 21/04/2023.

ZERAIBI, Ayoub; BALSALOBRE-LORENTE, Daniel; SHEHZAD, Khurram. Testing the Environmental Kuznets Curve Hypotheses in Chinese Provinces: A Nexus between Regional Government Expenditures and Environmental Quality. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, no. 18, pg. 9667, 2021. Available in: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/18/9667>. Access at: 12/06/2022.

Capítulo II

Desafios e perspectivas na preservação da qualidade da água: uma análise dos impactos da industrialização, urbanização e agricultura intensiva

Resumo: Este artigo investiga a relação entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e variáveis econômicas e populacionais ao longo do período de 2008 a 2020 em 73 municípios, utilizando o Teste de Cointegração de Pedroni e o teste de causalidade de Granger. Os resultados do teste de cointegração indicam uma forte relação de longo prazo entre a DBO e o PIB agropecuário per capita, o PIB industrial per capita e a população. Além disso, os resultados do teste de causalidade de Granger revelam uma relação bidirecional entre a primeira diferença da DBO e as primeiras diferenças do PIB agropecuário per capita e da população, com impactos significativos em médio e longo prazo. Esses achados destacam a importância de considerar não apenas os efeitos da produção industrial e agrícola, mas também do crescimento populacional na qualidade da água dos rios. As conclusões sugerem a necessidade de políticas e práticas que promovam um desenvolvimento econômico sustentável e o gerenciamento adequado dos recursos hídricos para garantir a preservação dos ecossistemas aquáticos e a saúde pública.

Palavras-chave: DBO. Cointegração. Causalidade. PIB agropecuário. População. Sustentabilidade.

Abstract: This article investigates the relationship between Biochemical Oxygen Demand (BOD) and economic and population variables over the period from 2008 to 2020 in 73 municipalities, using the Pedroni Cointegration Test and the Granger causality test. The results of the cointegration test indicate a strong long-term relationship between BOD and agricultural GDP per capita, industrial GDP per capita and population. Furthermore, the results of the Granger causality test reveal a bidirectional relationship between the first difference in BOD and the first differences in agricultural GDP per capita and population, with significant impacts in the medium and long term. These findings highlight the importance of considering not only the effects of industrial and agricultural production, but also population growth on river water quality. The conclusions suggest the need for policies and practices that promote sustainable economic development and adequate management of water resources to ensure the preservation of aquatic ecosystems and public health.

Keywords: BOD. Cointegration. Causality. Agricultural GDP. Population. Sustainability.

1 Introdução

A poluição hídrica é um desafio global que surge de diversas fontes industriais, incluindo descargas de resíduos líquidos, emissões de produtos químicos e metais pesados, entre outras. Este fenômeno tem sido objeto de crescente preocupação, especialmente nos países do BRICS, que enfrentam o desafio de equilibrar o crescimento econômico com a preservação ambiental (Ozturk, 2015; Kiliç, 2021). No Brasil, essa preocupação se manifesta de maneira evidente, como demonstrado por estudos realizados na Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, que identificaram uma relação causal entre a industrialização e a poluição dos rios (Fistarol *et al.*, 2015). Esse cenário se repete em outros países do BRICS, onde a industrialização está diretamente associada ao aumento da poluição ambiental e da interferência na qualidade da água (Ozturk, 2015; Rajput; Pandey; Bhadauria, 2017).

Além dos impactos da industrialização, a densidade populacional também desempenha um papel crucial na qualidade da água dos rios. A rápida urbanização e o crescimento populacional têm sido associados à deterioração da qualidade dos recursos hídricos em muitas partes do mundo, incluindo o Brasil (Polidoro; De Lollo; Barros, 2011; Krishnamoorthy *et al.* 2023). A urbanização descontrolada resulta na descarga de esgotos domésticos e resíduos sólidos nos rios, desafiando os esforços para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relacionados à água potável e cidades sustentáveis (Strokal, *et al.*, 2021; Cui, *et al.*, 2024). Essa relação entre densidade populacional e qualidade da água é evidente em estudos realizados em cidades brasileiras como Cuiabá e Várzea Grande, onde a degradação dos rios urbanos é observada em paralelo ao aumento da população (Zeilhofer; Lima; Lima, 2010).

No contexto agrícola, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de commodities agrícolas. No entanto, o desenvolvimento agrícola intensivo também contribui para a poluição da água, especialmente devido ao uso excessivo de agroquímicos e à erosão do solo (Ferraz *et al.*, 2022; Akhtar, *et al.*, 2021). A poluição da água proveniente da agricultura tem impactos diretos na saúde humana e nos ecossistemas aquáticos, representando uma ameaça à segurança alimentar e à biodiversidade (Baccour *et al.*, 2021; Abdeljawad; Nagy, 2023). Estudos realizados em diferentes regiões do Brasil, como a bacia hidrográfica de Campestre, no Paraná, revelam os efeitos nocivos da agricultura intensiva na qualidade da água dos rios (Ribeiro *et al.*, 2014; Derossi; Ribeiro; Santos, 2024).

Diante dessas questões, é evidente a necessidade de políticas públicas integradas que abordem tanto os desafios da industrialização quanto os da urbanização e da agricultura intensiva. O desenvolvimento sustentável requer uma abordagem holística que promova

práticas industriais, urbanas e agrícolas mais sustentáveis, visando garantir a preservação dos recursos hídricos e a qualidade de vida das populações afetadas. Desta forma, este artigo busca responder o seguinte problema de pesquisa. Qual é a relação causal entre os processos de industrialização, as atividades agrícolas e a densidade populacional, e como esses fatores influenciam a qualidade da água dos rios em municípios específicos do Brasil?

2 Referencial Teórico

2.1 Relação causal do crescimento econômico na qualidade da água do rio local ao longo dos anos

Dentre os diversos recursos naturais existentes, os recursos hídricos constituem um dos mais importantes, por ser indispensável para a sobrevivência. Entretanto, a sua qualidade está comprometida pelo lançamento contínuo de efluentes industriais, uso indiscriminado de agrotóxicos, rejeitos da pecuária, assim como de poluentes de outras atividades humanas, que, direta ou indiretamente, promovem alterações na estrutura e funcionamento dos recursos hídricos, com consequências negativas para a saúde humana e ambiental (Silva; Faria; Moura, 2017).

Sob o mesmo ponto de vista, a contaminação das águas superficiais especificamente em rios deve-se principalmente à urbanização, a agricultura e as descargas industriais (Akhtar *et al.*, 2021). Além disso, esgotos não tratados e resíduos sólidos/líquidos contêm substâncias perigosas que são despejadas nas águas dos rios pelas atividades urbanas e industriais, causando, portanto, a poluição da água (Akhtar *et al.*, 2021). Conforme, Krishnamoorthy *et al.* (2023.), a qualidade da água é essencial para garantir a utilização segura e a longo prazo deste recurso para qualquer atividade humana, especialmente para consumo humano. Além disso, as enormes quantidades de resíduos gerados nas cidades podem chegar às águas superficiais como rios quando transportados pelo escoamento das águas pluviais e descargas de efluentes (Ntengwe, 2006).

Deste modo, a água dos rios pode transportar grandes quantidades de matéria, incluindo matéria inorgânica, orgânica e dissolvida, o que pode tornar a água inadequada para o consumo, impactando diretamente na Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), (Ntengwe,2006). Ocasionalmente, os impactos negativos na qualidade da água têm seu potencial relacionado aos parâmetros da demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total e presença de *Escherichia coli*.

O lançamento descontrolado desses elementos pode ocasionar a deterioração da qualidade da água do rio, comprometendo seus diversos usos (Ribeiro *et al.*, 2022).

Recentemente, um estudo foi conduzido no rio Sangker, o maior curso d'água do noroeste do Camboja, situado na bacia do Lago Tonle Sap, revelou que a degradação ambiental no rio é resultado de diversos impactos decorrentes das atividades humanas ao longo do tempo, como a produção de resíduos domésticos, a prática da pecuária e da agricultura (Chrea; Tudesque; Chea, 2023). As atividades têm contribuído para a eutrofização e a redução do oxigênio na água, afetando a qualidade do rio em seu curso (Chrea; Tudesque; Chea, 2023). Similarmente, outro estudo foi realizado na Etiópia revelou que a maior parte das indústrias, aproximadamente 90%, está concentrada na porção superior da bacia hidrográfica do rio Awash, localizada entre a capital, Adis Abeba, e a cidade de Modjo. Essa aglomeração industrial tem contribuído significativamente para a poluição dos rios da região (Zinabu *et al.*, 2024).

Em contraste, na Ásia os resultados de um estudo, no qual foi utilizada o parâmetro DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), mostraram que entre 2015 e 2019, a maioria dos rios monitorados apresentavam um risco relativamente baixo de degradação da qualidade da água. Este estudo fornece uma nova perspectiva sobre a gestão da qualidade da água do rio, controle de poluentes e avaliação de riscos em uma área, que possui uma ecologia sensível mente frágil (Wang *et al.*, 2022). Por outro lado, no Delta do Rio das Pérolas na China, utilizou-se a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), observou-se que o crescimento populacional e o crescimento econômico aumentaram constantemente a descarga antropogênica de nutrientes nas águas costeiras a longo prazo entre (1985-2021), (Zhang; Zhang, 2023).

Entretanto, no Brasil, uma análise feita no rio Cocó-Fortaleza/CE no Nordeste, observou-se uma relação causal entre crescimento econômico e a qualidade da água, em que foi possível analisar uma estreita interrelação entre o pequeno crescimento da economia e a baixa qualidade ambiental. O mesmo estudo conclui que o ano de 2017 teve uma melhora no índice de qualidade da água (IQA), e no parâmetro DBO da qualidade da água do rio quanto comparado com os anos anteriores, essa melhoria se deve a projetos de revitalização (Bernardini *et al.*, 2021).

Em síntese, a poluição dos rios pode resultar de fontes pontuais, como descargas de estações industriais e de tratamento de esgoto, bem como de fontes difusas, incluindo escoamento de águas superficiais do uso de terras agrícolas, áreas habitacionais, empreendimentos comerciais e indústrias (Khullar; Singh, 2021). Além disso, as indústrias devem adotar práticas sustentáveis, tais como a implementação de sistemas eficientes de

tratamento de águas residuais, a redução da utilização de produtos químicos nocivos e a promoção de uma gestão responsável desses resíduos, com intuito de prevenir a poluição dos rios e garantir um ambiente saudável para a atual e futura geração (Azha, *et al.*, 2023).

2.2 A produção industrial e sua influência na qualidade da água dos rios

A água doce é o recurso natural mais importante do planeta é essencial para todas as formas de vida (Ewaid; *et al.*, 2020). A qualidade da água pode ser caracterizada por diversos parâmetros, dentre eles estão os físicos, os químicos e os biológicos (Pratte-Santos; Terra; Azevedo Júnior, 2023). Além disso água é essencial para o desenvolvimento humano e industrial. Entretanto a deterioração da qualidade das águas dos rios é causada pelas atividades antrópicas devido à rápida industrialização que lançam todos os seus efluentes no rio poluindo suas águas (Sujaul, *et al.*, 2013).

Asdes cargas contínuas dos efluentes no rio podem resultar numa acumulação grave de contaminantes o que tornaria a água do rio poluída e inadequada para o consumo humano (Phiriet *al.*, 2005). Ademais a expansão industrial é globalmente destacada como o epicentro das emissões de poluentes, embora a industrialização contribua positivamente para o desenvolvimento econômico de uma economia como o crescimento do PIB, o efeito da expansão econômica, é também fonte de impactos significativos de poluição ambiental (Gyamfi; Agozie; Bekun, 2022; Cunha *et al.*, 2022).

De acordo com Ozturk, 2015; Suraifi; Suha; Salem, 2023), a poluição hídrica resulta de diversas fontes industriais, incluindo descargas de resíduos líquidos, emissões de produtos químicos e metais pesados, entre outras. O autor também destaca que o aumento na produção industrial está diretamente ligado à maior geração de poluentes, os quais são frequentemente despejados nos rios e corpos d'água adjacentes. Essa relação entre industrialização e poluição da água emerge como uma preocupação significativa para os países do BRICS, os quais enfrentam desafios ao buscar conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental.

No Brasil, um estudo realizado na Baía de Guanabara no Rio de Janeiro, identificou uma relação causal entre a industrialização, e a poluição dos rios, destacando que as atividades industriais contribuem significativamente para a degradação ambiental da região (Fistarol *et al.*, 2015). Em um Estudo feito nos países BRICS (Brasil, Rússia, China e África do Sul), revela uma relação causal entre a poluição da água do rio e o processo de industrialização nesses países. A industrialização é frequentemente associada a um aumento na poluição ambiental

devido à intensificação das atividades industriais que liberam resíduos e poluentes no meio ambiente, incluindo a interferência na qualidade da água (Ozturk, 2015).

De acordo com Lintern, *et al.* (2018), muitos rios pelo mundo estão enfrentando declínio na qualidade da água, por exemplo, mais de 45% dos rios na China e mais de um terço dos rios nos Estados Unidos foram classificados como poluídos. Além disso, a maioria dos recursos hídricos da Austrália registra maiores cargas de sedimentos e nutrientes em comparação com a colonização europeia há aproximadamente 250 anos. Os elevados níveis de poluição não só ameaçam a utilização dos rios como fonte de água potável para os seres humanos, como também podem contribuir para degradação da qualidade desses recursos (Lintern, *et al.*, 2018). Com efeito, as atividades humanas em todas as escalas espaciais afetam a qualidade da água, alteram a paisagem, a vegetação associada e o equilíbrio hídrico (Peters; Meybeck, 2000). Além disso, as diferenças locais, regionais e globais no clima e no fluxo de água são significativas, fazendo com que os efeitos adversos das atividades humanas na qualidade da água dependam da localização, das características fisiográficas e do clima de uma bacia hidrográfica (Peters; Meybeck, 2000).

De certo a água desempenha um papel indispensável no crescimento econômico. No entanto o desenvolvimento de indústrias levou a uma série de problemas ecológicos e ambientais, tais como a poluição da água (Cao; *et al.*, 2023; Sun, *et al.*, 2023). Um estudo realizado no rio Kwekwe no Zimbabué comprovaram que há relação da poluição da água do rio devido ao efluente industrial descarregado (Chinhanga, 2010). Em um estudo desenvolvido por Suthar *et al.* (2010), na Índia, os autores apontaram que a atividade industrial é uma das principais fontes de poluição, a qual impactou negativamente a qualidade da água do rio Hindon.

Além disso, o estudo estabelece uma relação causal entre a qualidade da água do rio Hindon e a produção industrial no país. Os resultados indicam que as atividades industriais têm um impacto significativo na qualidade da água do rio. Os parâmetros de qualidade da água, como turbidez, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sulfato, nitrato e cloreto, mostraram variações significativas em diferentes locais de coleta ao longo do rio, com níveis que extrapolam os limites permitidos na legislação vigente (Suthar *et al.*, 2010).

Por outro lado, um estudo realizado na China faz uma avaliação dos impactos das descargas de águas residuais da indústria de bebidas alcoólicas na qualidade da água, e nos riscos para a saúde na bacia do rio Chishui. No entanto, observou-se piora na qualidade da água em Condado de Guling e cidade de Renhuai na China indicando que as águas residuais das

indústrias de produção de bebidas alcoólicas afetam significativamente a qualidade da água desta bacia hidrográfica (Zhan; Wu, 2023).

Segundo Afrad *et al.* (2020), o aumento de indústrias em Bangladesh alterou negativamente a qualidade da água, os resultados revelaram que há uma relação causal entre qualidade da água e efluentes industriais. Os principais problemas enfrentados foram a poluição, a baixa fertilidade, o aumento de ataque de insetos, e a ocorrência de doenças dérmicas (Afrad; *et al.*, 2020). Contudo, no Brasil um estudo para avaliar a qualidade das águas do Rio Murucupi, localizado em área de aglomerado urbano e intensa atividade industrial no município de Barcarena, Estado do Pará revelou um aumento na poluição das águas do entorno dessas áreas, restringindo seu uso para diversos fins (Santos *et al.*, 2018)

Da mesma forma, na África, o impacto das indústrias na qualidade da água superficial dos rios Ona e Alaro no Parque Industrial de Oluyole, Ibadan, Nigéria observou uma relação causal entre a atividade industrial e a poluição da água. Os resultados do estudo indicam que os efluentes industriais têm um impacto negativo na qualidade da água superficial dos rios estudados, com níveis mais altos de poluentes nas zonas industriais em comparação com as áreas a montante dos rios (Osibanjo; Daso; Gbadebo, 2011). O mesmo estudo revelou que as descargas industriais contribuem significativamente para a poluição da água nas áreas que apresentaram maior concentração industrial.

Ademais outro estudo realizado no continente africano, destacou o efeito da poluição industrial no Rio Ibese, Lagos, Nigéria, o mesmo estabelece uma relação causal entre a poluição industrial e a qualidade da água do Rio Ibese. O estudo destaca como o descarte de resíduos industriais ao longo do curso do rio afeta negativamente a qualidade da água, resultando em um aumento da poluição orgânica e inorgânica conforme o rio flui para jusante. Isso indica claramente que a atividade industrial tem um impacto direto na degradação da qualidade da água do rio Ibese, tornando-o inadequado para diversos fins, gerando desafios ambientais e ecológicos significativos nesta região analisada (Eruola *et al.* 2011).

Da mesma forma, os autores Igwe *et al.*, (2017), destacam que existe uma relação causal entre poluição industrial e qualidade da água. Destacam que as atividades industriais são uma das principais fontes de poluição da água superficial, contribuindo significativamente para a qualidade da mesma. Os autores continuam observando que a presença de poluentes industriais, como metais pesados e produtos químicos tóxicos, é mencionada como um dos principais fatores que afetam negativamente a qualidade da água. Além disso, o estudo deixa evidente que a poluição industrial pode resultar em elevadas concentrações de substâncias químicas e físicas na água, ultrapassando os limites estabelecidos pelos órgãos reguladores. Esses

poluentes têm efeitos adversos na saúde humana, no ambiente aquático e físico Igwe, *et al.* (2017). Consequentemente, quando os resíduos industriais são lançados nos rios, sem tratamento adequado, eles podem causar uma série de impactos ambientais, prejudiciais aos seres vivos. Isso inclui a contaminação da água, a morte de organismos aquáticos, a degradação dos ecossistemas aquáticos, a redução da biodiversidade, a proliferação de algas nocivas e a contaminação das fontes de água potável (Igwe *et al.*, 2017).

Consequentemente a água poluída agrava os problemas de saúde tanto em humanos como em peixes, causando diferentes doenças fatais e crônicas Bhuyan *et al.* (2017). Nesse sentido os autores destacam que a intensificação da industrialização tem sido associada ao aumento da poluição ambiental. No entanto a industrialização é necessária para o desenvolvimento do país. Mas deve está alinhada ao meio ambiente para o desenvolvimento sustentável e para a proteção do ambiente (aquático) afirma Bhuyan *et al.* (2017). Portanto, é fundamental para esses países desenvolver políticas que incentivem práticas industriais mais sustentáveis e mitiguem os impactos negativos da industrialização na qualidade da água e no meio ambiente em geral (Ozturk, 2015).

2.3 Produção agrícola e poluição da água do rio no Brasil

O desenvolvimento da agricultura tem uma longa história em muitos lugares do mundo. A prática agrícola começou há cerca de 10.000 anos na Mesopotâmia, correspondendo aproximadamente à maior parte do atual Iraque, Turquia, Síria e Jordânia. Os indivíduos que viviam nessas áreas coletavam sementes comestíveis por meio do cultivo e jardinagem florestal (Tudi *et al.*, 2021). Contudo o mundo modernizou-se trazendo os benefícios e malefícios da modernização. Dessa forma, a expansão da agricultura tem sido associada a problemas globais de saúde humana e contaminação ambiental. Colocando o Brasil como o maior consumidor mundial de agroquímicos, (Ferraz *et al.*, 2022). Apesar disso, há poucas informações sobre os impactos ambientais e riscos de contaminação nas bacias hidrográficas de algumas regiões do país (Ferraz *et al.*, 2022).

Todavia a evolução da agricultura garantiu a segurança alimentar da população brasileira, a criação de indústrias, a geração de emprego e renda. A agricultura é responsável por 21% dos empregos formais no Brasil (EMBRAPA, 2023), em 2022, a agricultura participou com 24,8% do PIB e 47,6% das exportações brasileira. Atualmente o Brasil é o primeiro produtor mundial de soja, o quarto maior produtor de algodão. O país brasileiro é maior exportador de carne bovina, de suco de laranja e o segundo maior exportador mundial de

algodão. Até o início dos anos de 1970, a economia brasileira era fundamentada no cultivo de café e cana-de-açúcar, principalmente (EMBRAPA, 2023).

De acordo com Mello *et al* (2018), o processo intensivo da agricultura leva a degradação da qualidade da água. Além do mais, o atual modelo de desenvolvimento do setor agrícola no Brasil tem considerável potencial para causar impactos ambientais negativos, incluindo a poluição dos ecossistemas aquáticos, porquanto pode contribuir para a intensificação de processos erosivos em solos desmatados, assoreamento de corpos d'água com partículas de solo contendo poluentes ambientais, o que pode levar a poluição dos rios, (De Azeredo Morgado *et al.*, 2023).

Como resultado da intensificação da agricultura, a poluição proveniente da mesma espalha-se pelo ambiente e poluem o solo e a água, conduzindo a um conseqüente risco potencial para os seres humanos. A sua presença nos ecossistemas aquáticos está ligada à poluição difusa proveniente do escoamento de campos agrícolas (Ccanccapa, *et al.*, 2016). Porquanto, a poluição da água proveniente da agricultura tem impactos negativos diretos na saúde humana; por exemplo, a conhecida síndrome do bebê azul, na qual níveis elevados de nitratos na água podem causar meta-hemoglobinemia uma doença potencialmente fatal em crianças (FAO, 2017). Os rios em todo o mundo estão ameaçados por fatores socioeconômicos que degradam as condições ambientais, alterando o uso da terra, afetando assim a hidrologia e a qualidade da água (Ccanccapa, *et al.*, 2016). Infelizmente, a intensificação agrícola no Brasil é acompanhada por diversas fontes potenciais de degradação dos ecossistemas aquáticos (Dos Santos; Rocha; Portella, 2022).

Entretanto, a agricultura se atualizou, mas ainda existem desafios. Há grande concentração de riqueza em pequena parcela de propriedades rurais. Existem milhões de hectares de solos e pastagens degradados. Ademais, há grande ineficiência no uso de água na irrigação, e o uso inadequado de agroquímicos oferece riscos e ao ambiente aquático (EMBRAPA, 2023). No que se refere à qualidade da água, a poluição de origem agrícola causada pela elevada utilização de fertilizantes, pesticidas e perda de solos por processos erosivos pode ser fortemente impactante em regiões com extensas áreas de uso agrícola. Como conseqüência, ocorrem prejuízos à biodiversidade aquática, a saúde das pessoas e à economia do país (EMBRAPA, 2023).

Os recursos hídricos são dinâmicos, a contaminação em uma determinada área tem o potencial de se disseminar por toda a região, muitas vezes tornando difícil a identificação do tipo específico de contaminante, como observado nos grandes rios poluídos no Brasil, decorrentes tanto das atividades agrícolas quanto dos efluentes urbanos (De Resende, 2002). Um

estudo realizado na bacia hidrográfica de Campestre, situada em Colombo, estado do Paraná, Brasil, revelou que a qualidade da água foi negativamente impactada pela atividade agrícola nas áreas ribeirinhas. Este efeito foi atribuído tanto ao aumento do índice pluviométrico quanto ao uso intensivo do solo (Ribeiro, *et al.*, 2014). Segundo os mesmos autores foi observada também uma maior concentração de nitrogênio total e nitrogênio particulado, juntamente com elevadas medidas de condutividade elétrica, pH e turbidez (Ribeiro, *et al.*, 2014).

Para os autores Baccour *et al.* (2021), existe uma relação causal entre a qualidade da água e a agricultura, em que as atividades agrícolas podem impactar significativamente a qualidade da água de diversas maneiras, principalmente através da poluição por sedimentos provenientes das práticas agrícolas. Além disso, outro elemento de poluição inclui o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados os quais podem resultar em altas concentrações de nitratos na água, tendo potencial nocivo à saúde humana e para os ecossistemas aquáticos. Além disso, a irrigação agrícola pode levar a um aumento na salinidade da água, afetando sua qualidade para consumo humano e uso em atividades industriais (Baccour *et al.* 2021),

Por outro lado, a qualidade da água também pode afetar a agricultura, uma vez que a disponibilidade de água de qualidade é essencial para o desenvolvimento das culturas. Sendo assim a escassez de água devido à poluição ou degradação da qualidade da água pode limitar a produção agrícola e impactar a segurança alimentar (Baccour *et al.* 2021). Além do mais, Zahoor e Mushtaq (2023), destacam a situação da poluição da água por causa da atividade agrícola é mais grave nos países em desenvolvimento.

A agricultura é parte integrante destas economias e é frequentemente a principal fonte de rendimento para milhões de pessoas. No entanto, muitos agricultores nestes países não conseguem implementar práticas sustentáveis que não acarretam danos ao meio ambiente devido à falta de recursos e tecnologia. Isso causa a poluição generalizada das fontes de água, degradação dos ecossistemas locais e problemas de saúde para as comunidades que deles dependem. Apesar da importância do problema, existe uma escassez de informação relativas à poluição da água por atividades agrícola nos países emergentes (Zahoor; Mushtaq, 2023).

Em síntese, a poluição por atividade agrícola da água tem consequências de longo alcance no ambiente, e saúde dos indivíduos, impactando os ecossistemas aquáticos e a qualidade da água (Zahoor; Mushtaq, 2023). Portanto, é crucial entender a relação entre a qualidade da água e o processo intensivo da agricultura para garantir um Desenvolvimento Sustentável tanto da produção agrícola quanto no gerenciamento dos recursos hídricos. Isso envolve a implementação de práticas agrícolas adequadas, gerenciamento integrado, e a adoção

de políticas e tecnologias que promovam um equilíbrio sustentável entre meio ambiente e desenvolvimento da agricultura.

2.4 Densidade populacional e impactos na qualidade da água dos rios

O processo de expansão urbana nas cidades brasileiras está estreitamente vinculado à industrialização, cuja intensificação ocorreu a partir da década de 1970 (Polidoro; De Lollo; Barros, 2011). Esse período testemunhou um crescimento populacional no Brasil de aproximadamente 355% na segunda metade do século XX, representando um acréscimo de quase 80 milhões de habitantes. Notavelmente, as doze regiões metropolitanas do país agora abrigam 33,6% da população brasileira. Esse fenômeno é majoritariamente impulsionado pelo desenvolvimento econômico e pela significativa migração do campo para a cidade (Polidoro; De Lollo; Barros, 2011).

Todavia, o declínio na qualidade dos recursos hídricos na Amazônia é muito rápido nas cidades que sofrem com o crescimento urbano não planejado. A região possui duas estações definidas, inverno (úmido) e verão (seco), que afetam diretamente o comportamento dos contaminantes nos ecossistemas aquáticos (Batista, *et al.* 2024). Além do mais, o lançamento in natura de esgoto doméstico urbano em rios da Amazônia é uma prática bastante difundida. Além disso, há um evidente desconhecimento sobre as características autodepurativas dos corpos hídricos receptores desses rios (De Abreu *et al.*, 2024). Assim, a poluição dos rios representa uma ameaça significativa à disponibilidade de água potável em várias partes do mundo, desafiando a consecução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 6 e 11 (água potável para todos e cidades sustentáveis) (Strokal *et al.*, 2021).

O problema não é exclusivo do Brasil. A urbanização tem sido associada à poluição dos rios em várias partes do mundo, especialmente em áreas densamente povoadas de países em desenvolvimento, o que contradiz os esforços alinhados com os objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pela ONU (Yin; Islam; Ju, 2021). No contexto brasileiro, a densidade populacional exerce impacto direto na qualidade da água dos rios urbanos, com uma notável descarga de resíduos sólidos e esgotos domésticos devido ao rápido crescimento urbano (Fernandes *et al.*, 2018).

A rápida urbanização também contribui para a deterioração da qualidade da água devido à descarga de águas residuais municipais e à drenagem urbana nas bacias hidrográficas, desafiando o estabelecimento do desenvolvimento sustentável sem prejudicar o ambiente

natural (Liyanage; Yamada, 2017). Isso é evidenciado pela elevada variação anual da demanda bioquímica de oxigênio e dos níveis de poluentes nos rios de países do Sul da Ásia (Liyanage; Yamada, 2017).

Estudos destacam a correlação direta entre urbanização e poluição dos rios urbanos, sendo estes mais contaminados que os rurais devido às atividades humanas associadas à urbanização (Ouyang *et al.*, 2006). No Brasil, cidades como Cuiabá e Várzea Grande evidenciam a relação entre qualidade da água e densidade populacional, com estações de monitoramento mostrando tendências de degradação química e biológica nos rios urbanos (Zeilhofer; Lima; Lima, 2010). Dessa forma, a urbanização descontrolada não apenas afeta a qualidade da água, mas também tem impactos ambientais significativos (Fu; Butler; Khu, 2009). Embora a urbanização tenha sido correlacionada com a diminuição da qualidade da água, outros fatores como gestão dos recursos hídricos e infraestrutura de tratamento de águas residuais também influenciam (Carle; Halpin; Stow, 2007).

Desta forma, o desenvolvimento das cidades e a industrialização têm desempenhado um papel significativo na poluição da água por metais pesados. A urbanização e a industrialização resultam em atividades humanas que contaminam os corpos d'água, afetando negativamente a qualidade da água e prejudicando a vida aquática (Fatima, *et al.*, 2021; Dítia, 2024). A presença de metais pesados como zinco, chumbo e níquel é identificada como uma das principais fontes de poluição nas águas, com potenciais efeitos adversos na saúde dos peixes. Segundo os autores, essa contaminação dos peixes por metais pesados pode ter impactos indiretos na saúde humana, uma vez que os peixes são parte da dieta humana (Fatima, *et al.*, 2021).

Estudos mostram que a urbanização aumenta o escoamento superficial e a carga de sedimentos e poluentes nos rios, como demonstrado em Ahmedabad, na Índia, onde a qualidade da água se deteriora progressivamente com o aumento da urbanização (Patel; Bablani; Patel, 2020; Freeman *et al.* 2019). Com o aumento da população urbana, a poluição dos recursos hídricos tende a aumentar, exigindo políticas eficazes de controle da poluição da água (Chen *et al.*, 2022). Em resumo, a expansão urbana e industrialização estão diretamente ligadas à poluição da água, exigindo abordagens de desenvolvimento econômico sustentável e monitoramento rigoroso da qualidade da água para garantir a preservação dos recursos hídricos diante da rápida urbanização. Além disso, controlar a densidade populacional é essencial para evitar a rápida deterioração dos ecossistemas aquáticos (Liyanage; Yamada, 2017).

3 Metodologia

O objetivo deste trabalho foi analisar a relação de causa e efeito entre o PIB industrial, PIB agropecuário, tamanho populacional e a qualidade da água dos rios, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em 73 municípios brasileiros, no período de 2008 a 2020. A escolha do número de municípios e de anos deu-se em razão da disponibilidade de dados, em que o Produto Interno Bruto dos Municípios foi obtido através de IBGE (2024a), a estimativa da população foi obtida através de IBGE (2024b) e o DBO foi obtido através de ANA (2024).

3.1 Teste de raiz unitária

Para verificar a estacionariedade das séries temporais, foram realizados testes de raiz unitária nas variáveis DBO, PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e população. Os testes foram conduzidos em diferentes especificações de modelos determinísticos. As fórmulas dos testes de raiz unitária utilizados nesta pesquisa, são demonstrados nas equações 1, 2 e 3, as quais representam o modelo sem intercepto e sem tendência (None), modelo com intercepto (Const) e modelo com intercepto e com tendência (Trend), respectivamente.

$$\Delta y_{i,t} = \phi y_{i,t-1} + \sum_1^p \delta_{i,t} \Delta y_{i,t-i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\Delta y_{i,t} = \alpha + \phi y_{i,t-1} + \sum_1^p \delta_{i,t} \Delta y_{i,t-i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\Delta y_{i,t} = \alpha + \beta t + \phi y_{i,t-1} + \sum_1^p \delta_{i,t} \Delta y_{i,t-i} + \varepsilon_i \quad (3)$$

onde $y_{i,t}$ é a série temporal sendo testada do município i , Δ representa a primeira diferença (ou seja, $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$), ϕ é o coeficiente de raiz unitária. $\delta_{i,t}$ são os coeficientes das defasagens. ε_i é o termo de erro, p é o número de defasagens incluídas no modelo para capturar a autocorrelação serial, α é o intercepto, βt é o termo de tendência, capturando uma tendência linear ao longo do tempo. A hipótese nula (H_0) do teste de raiz unitária: a série possui uma raiz unitária, ou seja, a série não é estacionária.

3.2 Teste de Cointegração de Pedroni

Para determinar a existência de relações de longo prazo entre as variáveis, foi aplicado o teste de cointegração de Pedroni. Este teste permite verificar a hipótese nula de ausência de cointegração entre as séries. Os resultados estão apresentados na Tabela 2 para as primeiras diferenças das variáveis, com diversas configurações de modelos determinísticos (None, Const, Trend) e números de vetores de cointegração ($r \leq 0$, $r \leq 1$, ..., $r \leq 5$). A fórmula geral do teste de cointegração de Pedroni é:

$$\Delta y_{i,t} = \alpha_i + \beta_i t + \beta_1 \Delta x_{1,i,t} + \beta_2 \Delta x_{2,i,t} + \dots + \beta_n \Delta x_{n,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

onde $\Delta y_{i,t}$ é primeira diferença da variável dependente, α_i é o intercepto específico da unidade (município i), $\beta_i t$ é o termo de tendência específica da unidade, $\Delta x_{k,i,t}$ são primeiras diferenças das variáveis explicativas, $\varepsilon_{i,t}$ é o termo de erro.

3.3 Teste de causalidade de Granger

Para verificar a direção da relação de causa e efeito entre as variáveis, foi aplicado o teste de causalidade de Granger. Este teste analisa se as variações passadas de uma variável podem prever variações futuras de outra. A fórmula do teste de causalidade de Granger é:

$$\Delta y_{i,t} = \sum_1^p \alpha_i \Delta y_{i,t-i} + \sum_1^p \beta_i \Delta x_{i,t-i} + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

Onde $y_{i,t}$ e $x_{i,t}$ são as séries temporais do município i , α_i e β_i são os coeficientes das defasagens, $\varepsilon_{i,t}$ é o termo de erro.

4 Resultados e Discussões

Este trabalho tem como objetivo principal, analisar a relação de causa e efeito entre o PIB industrial, PIB agropecuário, tamanho populacional e a qualidade da água dos rios, medido pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Nesta pesquisa utilizou-se uma amostra de 73 municípios brasileiros entre os anos de 2008 à 2020. Na Tabela 5, a seguir, é apresentada a estatística descritiva das variáveis utilizadas na pesquisa.

Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis utilizadas na pesquisa

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Assimetria	Curtose*
DBO	1,20	9,30	7,04	-1,32	1,55
PIB (em R\$ mil)	8,85	21.419,00	1.033,00	4,72	26,25
População	1.492,00	281.046,00	34.619,00	3,17	9,69
PIB Per capita (em R\$ Mil)	3,22	340,14	23,92	5,61	39,26
PIB agropecuário per capita (em R\$ mil)	0,01	86,44	3,84	5,24	37,69
PIB industrial Per Capita (em R\$ mil)	0,04	254,66	6,90	7,64	64,47

*indica o excesso de curtose. Fonte: Elaboração Própria (2024).

Observa-se na tabela 5 que a variável DBO, que mede a qualidade da água dos rios, apresenta um valor mínimo de 1,20 e um máximo de 9,30, com uma média de 7,04. A assimetria negativa (-1,32) indica que a distribuição dos valores de DBO é levemente inclinada para a esquerda, sugerindo que a maioria dos municípios tem valores de DBO acima da média. O excesso de curtose de 1,55 sugere que a distribuição é levemente platicúrtica, ou seja, menos concentrada em torno da média do que uma distribuição normal.

O PIB dos municípios varia de R\$ 8,85 mil a R\$ 21.419 mil, com uma média de R\$ 1.033 mil. A alta assimetria positiva (4,72) indica que a distribuição do PIB é fortemente inclinada para a direita, sugerindo que poucos municípios têm PIBs extremamente altos em comparação com a maioria. O excesso de curtose de 26,25 reflete a presença de outliers significativos, resultando em uma distribuição leptocúrtica, altamente concentrada em torno de alguns valores extremos.

A população dos municípios varia de 1.492 a 281.046 habitantes, com uma média de 34.619 habitantes. A assimetria positiva (3,17) indica uma inclinação para a direita, sugerindo que a maioria dos municípios tem uma população menor que a média, com alguns municípios muito populosos. O excesso de curtose de 9,69 indica uma distribuição leptocúrtica, com uma alta concentração em torno de valores extremos.

O PIB per capita varia de R\$ 3,22 mil a R\$ 340,14 mil, com uma média de R\$ 23,92 mil. A alta assimetria positiva (5,61) e o excesso de curtose extremamente elevado (39,26) indicam uma distribuição fortemente inclinada para a direita, com uma grande concentração em torno de valores extremos, sugerindo a presença de alguns municípios com PIB per capita muito alto em comparação com a maioria.

O PIB agropecuário per capita varia de R\$ 0,01 a R\$ 86,44 mil, com uma média de R\$ 3,84 mil. A assimetria positiva (5,24) e o excesso de curtose elevado (37,69) refletem uma distribuição inclinada para a direita, com poucos municípios apresentando valores muito altos de PIB agropecuário per capita, em que se destaca o município de Chapadão do Céu (GO).

O PIB industrial per capita varia de R\$ 0,04 a R\$ 254,66 mil, com uma média de R\$ 6,90 mil. A assimetria positiva (7,64) e o excesso de curtose extremamente elevado (64,47) sugerem uma distribuição fortemente inclinada para a direita, indicando que a maioria dos municípios tem um PIB industrial per capita muito baixo, enquanto poucos têm valores extremamente altos. Dentre os municípios de elevado PIB industrial per capita, destacam-se: Conceição do Mato Dentro (MG), Mariana (MG) e São Gonçalo do Rio Abaixo (MG).

A análise descritiva das variáveis utilizadas na pesquisa revela características importantes, como a forte assimetria e o elevado excesso de curtose nas distribuições de PIB per capita e PIB industrial per capita, sugerindo a necessidade de transformação das variáveis. Para determinar o tipo de variável a ser usado nos testes de cointegração e causalidade de Granger, é crucial realizar o teste de raiz unitária e verificar se as séries são estacionárias ou necessitam ser diferenciadas.

Tabela 6 - Teste de raiz unitária para as variáveis: DBO, PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e População, em bases anuais e no período de 2008 a 2020.

Variável	Lag	Trend	Const	None
DBO	0	245,340***	304,924**	477,391***
	1	1.704,170***	1.239,770***	1.345,170 ***
PIB agropecuário per capita	0	183,083**	942,313***	261,200***
	1	553,058***	682,160***	808,685***
PIB industrial per capita	0	181,121**	126,686***	379,321***
	1	605,652***	663,790***	757,709***
População	0	272,852**	260,771***	814,258***
	1	398,519***	370,570***	448,515***

Legenda: * significância de 10%; ** significância de 5%; *** significância de 1%; None: modelo determinístico sem tendência e sem intercepto; Const: modelo determinístico com intercepto; Trend: modelo determinístico com intercepto e com tendência Fonte: Elaboração Própria (2024).

A Tabela 6 apresenta os resultados dos testes de raiz unitária para quatro variáveis: DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e População, com dados anuais de 2008 a 2020. Os testes foram conduzidos utilizando diferentes especificações de modelos determinísticos: com intercepto e tendência (Trend), apenas com intercepto (Const) e sem intercepto e sem tendência (None). Além disso, os testes foram realizados com defasagens (lags) de 0 (variável em nível) e lag1 (primeira diferença da variável).

Para a variável DBO, PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e população, os testes de raiz unitária mostram que a hipótese nula de presença de raiz unitária é rejeitada a um nível de significância de 1% para todas as especificações de modelos testados. Isso indica que as séries são estacionárias após a sua transformação, levando a conclusão de que suas

propriedades estatísticas não mudam ao longo do tempo (Petricé; Stancu; Ghițulescu, 2017). Na sequência foi realizado o teste de cointegração de Pedroni que permite aos pesquisadores determinar a ordem de integração e o relacionamento de longo prazo entre as variáveis. Na tabela 7, mostra os resultados do teste de cointegração de Pedroni aplicado para as variáveis transformadas na forma da primeira diferença.

Tabela 7- Teste de Cointegração de Pedroni aplicado para as variáveis: Primeira Diferença do DBO, Primeira Diferença do PIB agropecuário per capita, Primeira Diferença do PIB industrial per capita e Primeira Diferença da população, em bases anuais, para o período de 2008 a 2020.

H0	Δ do DBO cointegrada à Δ do PIB agropecuário per capita			Δ do DBO cointegrada à Δ do PIB industrial per capita			Δ do DBO cointegrada à Δ do população		
	Trend	Const	None	Trend	Const	None	Trend	Const	None
$r \leq 4$	1,231	-2,960	-4,137	2,794	-0,919	-5,228	-3,373	2,396	-3,371
		***	***			***	***		***
$r \leq 3$	-1,529	-5,197	-8,335	-1,670	-4,617	-8,546	-0,935	-4,293	-7,514
	***	***	***	**	***	***		***	***
$r \leq 2$	-6,430	-10,080	-11,407	-6,821	-9,160	-11,469	-5,514	-8,357	-10,852
	***	***	***	***	***	***	***	***	***
$r \leq 1$	-18,127	-20,004	-19,514	-16,318	-17,850	-16,318	-16,349	-18,602	-19,338
	***	***	***	***	***	***	***	***	***
$r \leq 0$	-29,564	-29,337	-27,533	-31,064	-30,131	-28,188	-33,025	-32,190	-29,735
	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Legenda: * significância de 10%; ** significância de 5%; *** significância de 1%; Δ indica a primeira diferença; None: modelo determinístico sem tendência e sem intercepto; Const: modelo determinístico com intercepto; Trend: modelo determinístico com intercepto e com tendência. Fonte: Elaboração Própria (2024).

A tabela 7 apresenta os resultados do Teste de Cointegração de Pedroni, aplicado para examinar a relação de longo prazo entre a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e variáveis econômicas e populacionais, ao longo do período de 2009 a 2020, em que utilizou diferentes configurações de modelos determinísticos (None, Const, Trend) e diversos números de vetores de cointegração ($r \leq 0$, $r \leq 1$, ..., $r \leq 4$). Observa-se que se rejeitou a hipótese nula de ausência de cointegração entre as variáveis, indicando uma forte cointegração entre a DBO e o PIB agropecuário per capita, o PIB industrial per capita e a população.

Os resultados indicam a presença de cointegração entre a primeira diferença da DBO e as primeiras diferenças do PIB agropecuário per capita, PIB industrial per capita e da população. A presença de cointegração sugere uma relação de longo prazo entre essas variáveis. Os valores dos testes estatísticos mostram que as variáveis estão significativamente relacionadas a um nível de significância de 1%, indicando uma forte associação entre elas.

Esses resultados corroboram outros estudos realizados sobre o tema. Neste sentido, a conexão entre a produção industrial e agrícola e a qualidade da água dos rios é bem estabelecida na literatura. A produção industrial, como destacado por autores como Ozturk, 2015; Munir,

2024), contribui para a poluição da água devido às suas atividades intensivas e emissões de poluentes. Da mesma forma, a agricultura intensiva, conforme discutido por Mello *et al.* (2018), pode levar à degradação da qualidade da água devido ao uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, resultando em contaminação dos corpos d'água.

Além disso, a tabela também sugere uma relação entre a densidade populacional e a qualidade da água dos rios. O crescimento populacional, especialmente em áreas urbanas, pode levar a um aumento na descarga de esgoto doméstico não tratado nos rios, como mencionado por Polidoro, De Lollo e Barros (2011). Isso se alinha com os resultados do teste de cointegração, que mostram uma relação entre a população e a DBO. Portanto, a análise da tabela confirma os resultados observados na literatura internacional, demonstrando a importância de considerar não apenas os impactos da produção industrial e agrícola, mas também o crescimento populacional na qualidade da água dos rios. Essa análise reforça a necessidade de políticas e práticas que promovam um desenvolvimento econômico sustentável e o gerenciamento adequado dos recursos hídricos para garantir a preservação dos ecossistemas aquáticos e a saúde pública (Sostmeyer Jung, *et al.*, 2023).

Apesar disso, cabe destacar que esses resultados indicam a presença de cointegração, não estabelecem, necessariamente, uma relação causal entre as variáveis. Para aprofundar a compreensão dessas relações, realizou-se o teste de causalidade de Granger, conforme demonstrado na tabela 8.

Tabela 8 - Teste de Causalidade de Granger aplicado às variáveis: Primeira Diferença do DBO, Primeira Diferença do PIB agropecuário per capita, Primeira Diferença do PIB industrial per capita e Primeira Diferença da população em bases anuais, para o período de 2008 a 2020

Lag	Δ do BDO	Δ do PIB agropecuário per capita	Δ do BDO	Δ do PIB Industrial per capita	Δ do BDO	Δ da população
	NÃO CAUSA Δ do PIB agropecuário per capita	NÃO CAUSA Δ do BDO	NÃO CAUSA Δ do PIB Industrial per capita	NÃO CAUSA Δ do BDO	NÃO CAUSA Δ da população	NÃO CAUSA Δ do BDO
1	0,138	1,740	0,013	0,040	4,064**	0,368
2	0,795	0,228	0,544	0,576	5,049***	1,367
3	0,845	3,239**	0,215	0,259	7,876***	3,184**
4	0,230	3,050**	0,148	0,052	8,202***	5,965***
5	3,535***	3,010***	0,038	0,098	4,355***	3,261***
6	4,036***	1,230	0,132	0,440	3,383***	2,001**
7	5,490***	0,858	0,230	0,818	2,547**	0,941
8	3,586***	0,658	0,235	0,863	4,570***	1,545
9	2,429**	0,515	0,595	0,867	4,528***	0,918
10	1,158	0,832	0,657	0,405	1,644	1,078

Legenda: * significância de 10%; ** significância de 5%; *** significância de 1%; Δ : primeira diferença.

Fonte Elaboração Própria (2024).

A Tabela 8 apresenta os resultados do teste de causalidade de Granger aplicado às variáveis: Primeira Diferença da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Primeira Diferença do PIB agropecuário per capita, Primeira Diferença do PIB industrial per capita e Primeira Diferença da população, nos 73 municípios analisados para o período de 2009 a 2020. Observa-se na referida tabela que se rejeitou a hipótese nula de não existência de causalidade entre a primeira diferença da qualidade da água dos rios (medido pelo DBO) e a primeira diferença do PIB agropecuário per capita nos lags 5, 6, 7, 8 e 9.

A causalidade de Granger sugere que, se uma série temporal X causa Granger uma série temporal Y, então os valores passados de X contêm informações úteis para prever os valores futuros de Y. Desta forma, a primeira diferença do BDO causa Granger primeira diferença do PIB agropecuário per capita, então as variações passadas na qualidade da água (medida pela BDO) são úteis para prever variações futuras no desempenho econômico do setor agropecuário per capita.

Os resultados que indicam que a primeira diferença do BDO causa Granger primeira diferença do PIB agropecuário per capita nos lags 5, 6, 7, 8 e 9 sugerem uma relação significativa entre a qualidade da água e o desempenho econômico do setor agropecuário em médio e longo prazo. Neste sentido, mudanças na qualidade da água podem afetar gradualmente a saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres ao longo do tempo. Essas evidências demonstram que a contaminação da água por poluentes pode levar anos para causar danos significativos aos solos agrícolas e às culturas. Ademais, no setor agropecuário, os ciclos de investimento e produção são frequentemente longos. Os agricultores podem levar vários anos para ajustar suas práticas de cultivo em resposta a mudanças na qualidade da água, resultando em um atraso no impacto econômico dessas mudanças. Por fim, os efeitos da poluição da água podem se acumular ao longo do tempo, à medida que os poluentes se acumulam nos ecossistemas e afetam gradualmente a produção agrícola. Esse processo pode levar anos para se manifestar completamente no desempenho econômico do setor agropecuário.

Como observado, a qualidade da água dos rios é crucial para o crescimento econômico, especialmente em setores dependentes de recursos hídricos, como a agricultura (Ozturk, 2015). A Demanda Bioquímica de Oxigênio (BDO) é um indicador chave de poluição da água, refletindo a presença de matéria orgânica e outros poluentes que afetam a saúde dos ecossistemas aquáticos. A poluição da água pode impactar negativamente a produção agrícola ao afetar a saúde das culturas, dos animais e dos trabalhadores agrícolas (Lintern et al., 2018). De igual forma, o uso de água contaminada para irrigação pode reduzir a produtividade agrícola

e aumentar os custos de produção devido à necessidade de tratamento de água ou uso de fontes alternativas (Ferraz et al., 2022).

No Brasil, a expansão agrícola e industrial tem levado a desafios ambientais significativos, incluindo a poluição dos corpos d'água (EMBRAPA, 2023). Desta forma, políticas públicas e práticas de manejo sustentável são essenciais para mitigar os impactos ambientais e garantir a sustentabilidade do setor agropecuário.

É importante destacar que os fluxos causais observados, entre o DBO e o PIB agropecuário mostrou-se bidirecional, em que também se observou fluxos causais do PIB agropecuário per capita sobre a qualidade da água dos rios (medido pelo DBO). Neste sentido, se observou efeitos retardados e persistentes identificados na análise de causalidade com lags de 3, 4 e 5. Esses resultados sugerem que as ações agrícolas atuais têm impactos ambientais que se desdobram ao longo de muitos anos.

Neste sentido, o aumento na produção agropecuária está frequentemente associado ao uso intensivo de fertilizantes e pesticidas. Esses produtos químicos podem se infiltrar lentamente no solo e nos corpos d'água ao longo do tempo, resultando em um acúmulo gradual de poluentes. Esse processo pode levar vários anos para que os efeitos negativos se manifestem plenamente na qualidade da água. Ademais, as práticas agrícolas intensivas podem causar a degradação do solo e a erosão. O transporte de sedimentos carregados de nutrientes e poluentes para os rios é um processo contínuo que se intensifica com o tempo, impactando a qualidade da água de maneira cumulativa.

Outrossim, a movimentação de poluentes agrícolas para os corpos d'água pode estar associada a ciclos hidrológicos naturais, como inundações e secas. Esses ciclos podem retardar a manifestação completa dos impactos na qualidade da água. Ademais, as mudanças climáticas e a variabilidade natural podem influenciar a rapidez e a intensidade com que os poluentes chegam aos corpos d'água, resultando em efeitos que se tornam evidentes somente após vários anos.

Os achados estão em consonância com outros estudos que mostram como a agricultura pode impactar negativamente a qualidade da água. Por exemplo, o estudo de Dos Santos, Rocha e Portella (2022) destaca como a utilização intensiva de maquinaria pesada e agroquímicos resulta na contaminação da água por nutrientes como nitrogênio e fósforo, que aumentam a DBO.

A relação causal estabelecida entre a produção agrícola e a qualidade da água também é suportada por Baccour *et al.* (2021), que identifica a poluição por sedimentos e o uso excessivo de fertilizantes como principais fatores de degradação da qualidade da água. Em

particular, a poluição por nitratos provenientes da agricultura tem sido associada a problemas de saúde humana, como a síndrome do bebê azul (FAO, 2017).

Apesar de se ter observado fluxos causais bidirecionais, entre o DBO e o PIB agropecuário, não se observou fluxos causais entre o DBO e o PIB industrial. A ausência de fluxos causais pode ser explicada pelo viés da amostra, uma vez que analisou-se municípios em que a principal atividade produtiva se relacionava à agropecuária, em detrimento da produção industrial.

Assim como o DBO e o PIB agropecuário, também se observou fluxos causais bidirecionais entre a qualidade da água dos rios e o tamanho da população dos municípios analisados, sugerindo uma retroalimentação entre as variáveis. Neste sentido, se rejeitou a hipótese nula de não causalidade da primeira diferença do DBO sobre a primeira diferença da população nos lags 1 à 9 anos, sugerindo a existência de impactos de curto, médio e longo prazo da qualidade da água dos rios sobre o tamanho da população dos municípios analisados.

No curto prazo, mudanças na Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) podem ter efeitos imediatos no tamanho da população. Por exemplo, aumentos na poluição da água devido ao aumento da DBO podem levar a crises de saúde pública, resultando em migração de curto prazo de áreas afetadas para áreas menos poluídas.

No médio prazo, os efeitos da DBO na qualidade da água podem se tornar mais evidentes, afetando as condições de vida e saúde das populações locais. Isso pode levar a mudanças na taxa de natalidade e mortalidade, influenciando indiretamente o tamanho da população ao longo do tempo. Além disso, medidas de mitigação da poluição, como políticas ambientais mais rígidas ou investimentos em infraestrutura de tratamento de água, podem começar a surtir efeito, afetando a relação entre DBO e tamanho da população.

No longo prazo, os impactos acumulativos da DBO na qualidade da água podem se refletir em mudanças mais significativas na saúde e bem-estar das populações locais. Isso pode levar a alterações no padrão de migração e no crescimento populacional, à medida que as comunidades buscam áreas com melhor qualidade de vida. Além disso, a conscientização pública sobre os efeitos da poluição da água pode levar a mudanças comportamentais e pressionar por políticas mais abrangentes de proteção ambiental, o que pode influenciar ainda mais a relação entre DBO e tamanho da população.

Neste sentido, Ozturk (2015) destaca a relação entre industrialização e poluição da água, mostrando como o crescimento econômico está diretamente ligado à maior geração de poluentes. Isso sugere que mudanças no BDO podem ter impacto na qualidade ambiental, o que pode influenciar o comportamento demográfico, incluindo a densidade populacional.

De igual forma, Ferraz et al. (2022) aborda os impactos ambientais da expansão agrícola, destacando como o desenvolvimento agrícola (associado ao BDO) pode levar à degradação da qualidade da água. Isso implica que variações no BDO podem afetar indiretamente a qualidade da água, influenciando assim a dinâmica da população.

Polidoro *et al.* (2011) discute a expansão urbana no Brasil, mostrando como a urbanização está ligada à industrialização e ao crescimento populacional. Isso sugere que mudanças no BDO podem estar relacionadas à dinâmica demográfica, incluindo a densidade populacional.

Em resumo, a relação entre Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e tamanho da população ao longo dos lags de 1 a 9 anos pode ser entendida através dos fluxos causais que ocorrem em diferentes períodos de tempo, com efeitos que se manifestam de maneiras distintas em curto, médio e longo prazo. Essa análise pode fornecer insights importantes para o planejamento e a implementação de políticas ambientais e de desenvolvimento urbano sustentável (Qamruzzaman; Karim; Kor, 2024).

Por fim, observou-se fluxos causais do tipo Granger da primeira diferença da população sobre a primeira diferença do DBO nos lags 3 a 6 anos. Os fluxos causais observados entre a variação da população e a DBO nos lags de 3 a 6 anos destaca a natureza gradual e cumulativa dos efeitos do crescimento populacional na qualidade da água. Por outro lado, o gap temporal indica que os efeitos do aumento da população na DBO da água não são imediatos, mas podem se manifestar ao longo do tempo, à medida que os ecossistemas aquáticos respondem à pressão crescente dos poluentes. Neste sentido, a DBO elevada pode resultar em condições desfavoráveis para a vida aquática, levando à diminuição da biodiversidade, proliferação de algas nocivas e deterioração geral da saúde dos ecossistemas aquáticos.

A análise causal indica que o aumento da população pode ser um fator contribuinte para o aumento subsequente da DBO nos lags de 3 a 6 anos. O crescimento populacional pode resultar em maior urbanização, expansão industrial e intensificação agrícola, todos os quais estão associados a uma maior poluição da água. Essa relação causal sugere que medidas para controlar o crescimento populacional e gerenciar o desenvolvimento urbano e industrial de forma sustentável podem ter impactos positivos na qualidade da água a longo prazo, reduzindo a carga de poluentes e melhorando as condições dos ecossistemas aquáticos.

Ao analisar a relação entre a variação da população e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) nos lags de 3 a 6 anos, é possível perceber a complexidade dos fatores que afetam a qualidade da água ao longo do tempo. Quando se considera a densidade populacional, observa-se que o crescimento urbano descontrolado está intimamente ligado à poluição dos rios

(Polidoro; De Lollo; Barros, 2011, Prasad, *et al.*, 2024). O lançamento de esgoto doméstico e resíduos sólidos em rios urbanos é uma prática comum, representando uma ameaça à disponibilidade de água potável e desafiando os objetivos de desenvolvimento sustentável (Batista *et al.*, 2024). A urbanização aumenta a carga de sedimentos e poluentes nos rios, deteriorando progressivamente a qualidade da água (Patel; Bablani; Patel, 2020).

Em síntese, a análise dos resultados do teste de causalidade de Granger revela uma relação significativa entre a qualidade da água dos rios, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e o desempenho econômico do setor agropecuário per capita. Os resultados indicam que variações passadas na qualidade da água são úteis na previsão de variações futuras no PIB agropecuário per capita, sugerindo uma relação causal de médio e longo prazo (Leng, *et al.*, 2021). Essa relação é corroborada por estudos anteriores que destacam os impactos negativos da poluição agrícola na qualidade da água.

Além disso, a análise revela fluxos causais bidirecionais entre a qualidade da água e o tamanho da população dos municípios analisados, indicando uma retroalimentação entre essas variáveis ao longo do tempo (Kumari, *et al.*, 2024). Observa-se também que o crescimento populacional pode contribuir para o aumento subsequente da DBO nos rios, destacando a importância de políticas que controlem o crescimento urbano e industrial de forma sustentável para melhorar a qualidade da água a longo prazo. Esses insights são cruciais para o planejamento de políticas ambientais e de desenvolvimento urbano sustentável, visando mitigar os impactos da poluição da água e garantir a saúde dos ecossistemas aquáticos e a qualidade de vida das populações locais. (Santy; Mujumdar; Bala, 2020; Karkiet *et al.*, 2024; Mothé, *et al.*, 2024; Batista *et al.*, 2024; Barroquela, *et al.*, 2024).

5 Considerações Finais

O presente estudo buscou analisar a relação de causa e efeito entre o Produto Interno Bruto (PIB) industrial, o PIB agropecuário, o tamanho populacional e a qualidade da água dos rios, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), em 73 municípios brasileiros no período de 2008 a 2020. Os resultados obtidos revelaram importantes insights sobre a interação entre essas variáveis ao longo do tempo.

Inicialmente, os testes de raiz unitária indicaram que todas as variáveis se mostraram estacionárias após a transformação em primeira diferença, sugerindo que suas propriedades estatísticas não mudam ao longo do tempo. Em seguida, o teste de cointegração de Pedroni confirmou a existência de uma forte cointegração entre a DBO e o PIB agropecuário per capita,

o PIB industrial per capita e a população, evidenciando uma relação de longo prazo entre essas variáveis.

Os resultados do teste de causalidade de Granger revelaram uma relação significativa entre a qualidade da água dos rios e o desempenho econômico do setor agropecuário, sugerindo uma relação causal de médio e longo prazo. Essa relação é consistente com estudos anteriores que destacam os impactos negativos da poluição agrícola na qualidade da água.

Além disso, foi observada uma relação bidirecional entre a qualidade da água e o tamanho da população dos municípios analisados, indicando uma retroalimentação entre essas variáveis ao longo do tempo. O crescimento populacional foi identificado como um fator contribuinte para o aumento subsequente da DBO nos rios, destacando a importância de políticas que controlem o crescimento urbano e industrial de forma sustentável para melhorar a qualidade da água a longo prazo.

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, há importantes implicações para a formulação de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos hídricos no Brasil. A análise da relação entre a qualidade da água dos rios, medidas pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e variáveis econômicas e populacionais destaca a necessidade de políticas integradas que abordem tanto os desafios ambientais quanto os econômicos e demográficos.

Em primeiro lugar, os resultados mostram uma forte relação entre a produção agropecuária e a qualidade da água dos rios, sugerindo que a intensificação das atividades agrícolas pode levar a um aumento na poluição hídrica. Isso ressalta a importância de políticas que promovam práticas agrícolas sustentáveis, como o uso responsável de fertilizantes e pesticidas, a adoção de técnicas de conservação do solo e a proteção de áreas de mananciais. Incentivos financeiros e capacitação técnica podem ser fornecidos aos agricultores para facilitar a transição para sistemas de produção mais sustentáveis.

Além disso, a identificação de uma relação bidirecional entre a qualidade da água e o tamanho da população destaca a necessidade de políticas que abordem o crescimento populacional de forma sustentável e o gerenciamento adequado dos serviços de saneamento básico. Investimentos em infraestrutura de tratamento de água e esgoto, educação ambiental e conscientização pública são fundamentais para reduzir a carga de poluentes nos rios e garantir o acesso à água potável para toda a população.

A análise dos fluxos causais entre a qualidade da água e o desempenho econômico do setor agropecuário também destaca a importância de políticas que promovam a diversificação da economia local e incentivem o desenvolvimento de atividades produtivas menos intensivas

em recursos hídricos. Programas de incentivo à agricultura familiar, agroecologia e agrofloresta podem contribuir para a redução da pressão sobre os recursos hídricos e a melhoria da qualidade da água dos rios.

Por fim, a pesquisa aponta para a necessidade de políticas de monitoramento e controle da qualidade da água, visando avaliar continuamente o impacto das atividades humanas sobre os ecossistemas aquáticos e identificar áreas prioritárias para intervenção. A implementação de instrumentos de gestão integrada de recursos hídricos, como comitês de bacias hidrográficas e planos de saneamento ambiental, pode facilitar a coordenação entre os diferentes atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos e promover a adoção de medidas preventivas e corretivas.

Em suma, os resultados desta pesquisa fornecem subsídios para a formulação de políticas públicas que visem garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos e promover o desenvolvimento econômico e social de forma equitativa e ambientalmente responsável. A integração de abordagens multidisciplinares e a participação ativa da sociedade civil são fundamentais para o sucesso dessas políticas e para a construção de um futuro mais sustentável para as gerações presentes e futuras.

Referências Bibliográficas

ABDELJAWAD, Nour; NAGY, Imre. The impacts of urban expansion on environmental pollution, agriculture and energy consumption: evidence from the city of Amman. **Journal of Social and Environmental Management**, São Paulo (SP), v. 2, p. e03347, 2023. DOI: 10.24857/rgsa.v17n2-010. Available at: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/3347>. Accessed on: May 26th. 2024.

AFRAD, MD Safiul Islam *et al.* Impact of industrial effluents on water, soil and rice production in: a case from the Turag river bank. **Journal of Science and Engineering in Environmental Health**, v. 825-834, 2020. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40201-020-00506-8>. Accessed on: 4 Mar 2024

AKHTAR, Naseem *et al.* Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. **Water**, v. 13, no. 19, p. 2660, 2021. available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/19/2660>. Accessed on: 21 mar 2024

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Indicadores de Qualidade da Água - DBO. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/d82c795398754609b0a8b4a550ef6c57_14/about. Acesso em: 03 jun. 2024.

AZAM, Muhammad et al. Empirical test of the environmental Kuznets curve: evidence from 182 countries around the world. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-36, 2024. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-024-04890-1>

AZHA, Syahida Farhan et al. Enhancing river health monitoring: Developing a reliable predictive model and mitigation plan. **Ecological Indicators**, v. 156, p. 111190, 2023. available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X23013328>. Accessed on: 22 Feb 2024

BACCOUR, Safa *et al.* Hydro economic modeling to assess water scar city and agricultural pollution reduction policies in the Ebro River basin, Spain. **Cleaner Production Magazine** Volume 327, 129459 December 10, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129459>. Accessed on: 12 mar 2024

BARROQUELA, Wesley Brito *et al.* Consumo de água no processo produtivo da indústria sucroenergética: estudo de caso no noroeste paulista (Brasil). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, v. 58, n. 2, pág. 251-260, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781559>. Acessado em: 28 maio 2024

BATISTA, Louisiane Farias *et al.* Change in water quality in an Amazonian micro basin: ecological and human health implications. **Water and Health Magazine**, p. jwh2024286, 2024. Available at: <https://doi.org/10.2166/wh.2024.286>. Accessed on: 22 mar 2024

BERNARDINI, Camila Santiago Martins *et al.* **Qualidade da água como retrato da vulnerabilidade socioambiental: o caso do rio Cocó-Fortaleza/CE.** 2021. Avaliado em 25 Feb 2024.

BHUYAN, MD Simulet *et al.* Status and impacts of industrial pollution on the Harmfulness River in Bangladesh: A review. **International Journal of Marine Sciences**, v. 7, 2017. Available at: <http://dx.doi.org/10.5376/ijms.2017.07.0016>. Accessed on: 7 Marc 2024.

BUSTAMANTE, Mercedes MC *et al.* Efeitos das Mudanças no Uso da Terra na Conservação da Biodiversidade do Solo. **Desafios de Sustentabilidade da Agricultura Brasileira: Governança, Inclusão e Inovação**, v. 64, p. 125, 2023. Disponível em: <https://books.google.com.br/books>. Acessado em 28 maio 2024

CAO, Xin; *et al.* Inversion of water quality parameters by remote sensing in the Yellow River Delta. **Ecological Indicators**. V. 155, 110914, november 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110914>. Accessed on: 4 Mar 2024.

CARLE, Melissa Vernon; HALPIN, Patrick N.; STOW, Craig A. Waters hed urbanization patterns and impacts on water quality 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 3, p. 693-708, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03764.x>. Accessed on: 19/04/2024

CCANCCAPA, Alexander *et al.* Spatio temporal patterns of pesticide residues in the Turia and Júcar rivers (Spain). **Science of the Total Environment**, v. 540, p. 200-210, 2016. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971530259X>. Accessed on: 7 Feb 2024

CHEN, Sophia Shuanget *et al.* Assessment of urban river water pollution with urbanization in East Africa. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 29, no. 27, p. 40812-

40825, 2022. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-18082-1>. Accessed on: 21 mar 2024

CHINHANGA, Jonathan R. Impact of industrial effluent from a steel company on the physicochemical quality of water in the Kwekwe River in Zimbabwe. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, v. 7, 2010. Available at: <https://doi.org/10.4314/ijest.v2i7.63754>. Accessed on: 4 Mar 2024

CHREA, Socheat; TUDESQUE, Loïc; CHEA, Ratha. Comparative assessment of water quality classification techniques in the largest north-western river of Cambodia (Sangker River-Tonle Sap Basin). *Ecological Indicators*, v. 154, p. 110759, 2023. Available at: Accessed on: 22 Feb.2024

CUI, Wenjing *et al.* The resource utilization potential of municipal solid waste affects the progress of sustainable development goals in China. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 205, p. 107562, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107562>. Accessed on: 26/05/2024

CUNHA, Erlane José *et al.* Urban development and industrialization impacts on semiaquatic bugs diversity: A case study in Eastern Amazonian streams. *Water Biology and Security*, v. 1, n. 4, p. 100061, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772735122000816>. accessed on: 26/05/2024

DE ABREU, Carlos Henrique Medeiros *et al.* Domestic sewage dispersions scenarios as a subsidy for the design of urban sewage systems in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil. *PeerJ*, vol. 12, p. e16933, 2024. Available at: <https://doi.org/10.7717/peerj.16933>

DE AZEREDO MORGADO, M.G. *et al.* Large-Scale Agriculture and Environmental Pollution of Ground water and Surface Water and Sediments by Pesticides in the Brazilian Amazon: the Case of the Santarém Region. *Water Air Polluted Soil* 234, 150 2023. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06152-8>. Accessed on: 05 Feb 2024

DE MATTOS, Rogério Silva. Tendências e raízes unitárias. *Texto didático. Juiz de Fora: UFJF*, p. 61, 2018.

DE RESENDE, A. V. Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato. 2002. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/>. Acessado em 12 mar 2024

DEROSSI, Fabíola Nunes; RIBEIRO, Paulo Flores; SANTOS, José Lima. The choice of agricultural system is fundamental to preserving the equality of surface water in agricultural river basins. *Agronomy*, v. 14, no. 1, pg. 214, 2024. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/1/214>. Accessed on: 26/05/2024

DÍTHIA, Syifa. The effect of industrial waste on air and water pollution causes climate change. *Waste and Sustainable Consumption Magazine*, v. 1, pg. 18-26, 2024. Available at: <https://journal-iasssf.com/index.php/JWSC/article/view/668>. Accessed on: 26/05/2024

DOS SANTOS, J. M.; MARQUETTI, A. A.; DE OLIVEIRA, G. Relações de causalidade entre variáveis ambientais e econômicas: Uma abordagem em dados de painel. *Revista de Economia e Agronegócio, [S. l.]*, v. 18, n. 3, p. 1–26, 2021. DOI: 10.25070/rea.v18i3.11073. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rea/article/view/11073>. Acesso em: 18 maio. 2024.

DOS SANTOS, Marcela Granato Barbosa; ROCHA, Guilherme Araujo; PORTELLA, Aline Ramos. Impacto da agricultura na qualidade da água: uma breve revisão. **Fórum Ambiental de Alta Paulista** ISSN 1980-0827 – Volume 18, número 1, 2022. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental. acessado em 31 maio 2024.

DURMAZ, Nazif; THOMPSON, Alexi. An environmental Kuznets curve for water pollution: does water abundance affect the tipping point. **Science of The Total Environment**, vol. 913, p. 169657, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169657>
EMBRAPA. A evolução da agricultura do Brasil. Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação 2023. Disponível em ><https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81665485/artigo---a-evolucao-da-agricultura-do-brasil>. acessado em 11 Mar 2024

EMPRAPA. TRAJETÓRIA DA AGRICULTURA BRASILEIRA. Visão 2023: O Futuro da Agricultura Brasileira2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acessado em: 11 Mar 2024

ERÚOLA, AO *et al.* An assessment of the effect of industrial pollution on the Ibese River, Lagos, Nigeria. **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 8, p. 608-615, 2011.available at: https://academicjournals.org/article/article1380369736_Eruola%20et%20al.pdf. Accessed on: 7 Marc 2024

EWAID, Salam Hussein *et al.* Development and evaluation of a water quality index for Iraqi rivers. **Hydrology**, v. 7, no. 3, p. 67, 2020.

FAO. Water pollution from agriculture: a global review. **Executive summary**. 2017.

FATIMA, Sana *et al.* Water pollution by heavy metals and their effects on fish. International J. Peixe. Aquat. **Stud**, vol. 3, p. 6-14, 2020.

FERNANDES, Felipe *et al.* Urban Water Pollution in Brazil. Urban Pollution: **Science and Management**, p. 357-370, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119260493.ch27>. Accessed on: 21 Mar 2024

FERRAZ, F. T.*et al.* Risk of agro Chemical contamination in a hydrographic basin in the matopiba region in Brazil. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, [S. l.], v. 30, n. Contínua, p. 246–261, 2022. DOI: 10.13083/reveng.v30i1.13813. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/13813>. Acesso em: 6 feb. 2024.

FISTAROL, Giovana O. *et al.* Environmental and sanitary conditions of Guanabara Bay, Rio de Janeiro. **Frontiers in microbiology**, v. 6, p. 1232, 2015. Availableat: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.01232/full>. Accessed on 19/03/2024

FREEMAN, Lauren A. *et al.* Impactsofurbanizationanddevelopmentonestuarineecosystemsandwaterquality. **Estuaries and Coasts**, v. 42, p. 1821-1838, 2019. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12237-019-00597-z>. Accessed on: 19/03/2024

FU, Guantáo; BUTLER, David; KHU, Soon-Thiam. The impact of new developments on river water quality from and integrated systems modeling perspective. **Science of the total**

environment, v. 407, no. 4, p. 1257-1267, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.033>. Accessed on: 21 mar 2024

GRANGER, C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. **Econometrica**, v. 37, n. 3, p. 424-438, 1969

GRAVINA, Antonio Francesco; LANZAFAME, Matteo. 'What's your shape?' A data-driven approach to estimating the Environmental Kuznets Curve. A Data-Driven Approach to Estimating the Environmental Kuznets Curve **Asian Development Bank** 2024. / Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4779930.

GYAMFI, Bright Akwasi; AGOZIE, Divino Q.; BEKUN, Festus Victor. Can technological innovation, foreign direct investment and natural resources alleviate some of the burden on BRICS economies in the current industrial era? **Technology in Society**, v. 70, p. 102037, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160791X22001786>. Accessed on: 19/03/2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas de População. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acesso em: 03 jun. 2024b.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produto Interno Bruto dos Municípios. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/5938>. Acesso em: 03 jun. 2024a.

IGWE, PU *et al.* A review of the environmental effects of surface water pollution. **International Journal of Research and Science in Advanced Engineering**, v. 12, p. 237340, 2017. Available at: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.12.21>.

KARKI, Bhesh Kumar *et al.* Urban waste water management in Nepal: generation, treatment, engineering and policy perspectives. **H2 Open Magazine**, v. 2, p. 222-242, 2024. Available at: <https://doi.org/10.2166/h2oj.2024.105>. Accessed on: 26/05/2024

KHEZRI, Mohsen; KARIMI, Mohammad Sharif; NAYSARY, Babak. Exploring the impact of entrepreneurial indicators on CO2 emissions within the framework of the environmental Kuznets curve: a cross-sectional study. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-35, 2024. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-024-05050-1>

KHULLAR, Sakshi; SINGH, Nanhey. Machine learning techniques in river water quality modelling: a research travelogue. **Water Supply**, v. 21, n. 1, p. 1-13, 2021. Available at: <https://iwaponline.com/ws/article/21/1/1/77782/Machine-learning-techniques-in-river-water-quality>. Accessed on: 22 Feb 2024

KILIÇ, Zeyneb. Water pollution: causes, negative effects and prevention methods. **İstanbul Sabahattin Zaim Universities Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, v. 2, p. 129-132, 2021. Available at: <https://doi.org/10.47769/izufbed.862679>. Accessed on: 26/05/2024

KRISHNAMOORTHY, N; *et al.* 2023. Assessment of ground water quality and water quality index in Noyal river basin in Tirupur district, South India. **Urban Climate**. Available at: [10.1016/j.uclim.2023.101436](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101436). accessed on: 28/05/2024

KUMARI, Diksha *et al.* Types and Sources of Agricultural Pollution: Identification of the different pollutants generated by agricultural practices and their origins. **A Comprehensive Exploration of Soil, Water, and Air Pollution in Agriculture**, p. 71, 2024.

LENG, Peifang *et al.* Agricultural impacts drive longitudinal variations of riverine water quality of the Aral Sea basin (Amu Darya and Syr Darya Rivers), Central Asia. **Environmental Pollution**, v. 284, p. 117405, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121009878>. Accessed on:

LINTERN, A. *et al.* Key factors influencing differences in stream water quality across space. Wiley's Interdisciplinary Reviews: **Water**, vol. 1, pg. e1260, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1260>. Accessed on: 4 Mar 2024

LIYANAGE, Chamara P.; YAMADA, Koichi. Impact of population growth on water quality in natural water bodies. **Sustainability**, vol. 9, no. 8, p. 1405, 2017. available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/8/1405>. Accessed on: 21mar 2024

MELLO, Kaline *et al.* Effects of land use and cover on water quality in low-order streams in South Eastern Brazil: river basin versus riparian zone. **Catena**, vol. 167, p. 130-138, 2018. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816218301437>. Accessed on: 05 Feb 2024.

MORAIS, Igor; STONA, Filipe; SCHUCK, Gustavo. Econometria aplicada no EViews®. **Porto Alegre: FEE**, 2016.

MOTHÉ, Rafael Barros *et al.* Monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Guandu. 2024.85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - **Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, 2024. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/21733>. Acessado em 28 maio 2024

MUNIR, Hira *et al.* Introduction to Water Pollution. **Water Pollution Handbook**, p. 1-27, 2024.

NEAL, Timothy. Panel cointegration analysis with padroni. **Stata Magazine**, v. 3, p. 684-692, 2014.

NTENGWE, F. W. Pollutant loads and water quality in streams of heavily populated and industrial used towns. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 31, n. 15-16, p. 832-839, 2006. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474706506001549>. Accessed on: 22 Feb. 2024.

OSIBANJO, Oladele; DASO, Adegbenro P.; GBADEBO, Adewole M. The impact of industries on surface water quality of Ona River and Alaro River in Oluyole Industrial Estate, Ibadan, Nigeria. **African Journal of Biotechnology**, v. 4, p. 696-702, 2011. Available at: <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/92377>. Accessed on: 7 Marc 2024.

OUYANG, Tingping; ZHU, Zhaoyu; KUANG, Yaoqiu. River water quality and sources of pollution in the Pearl River Delta, China. **Environmental Monitoring Magazine**, v. 7, no. 7, p. 664-669, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1039/B504475H>. Accessed on: 04 Marc 2024

OZTURK, Ilhan. Sustainability in the food-energy-water nexus: Evidence from BRICS countries (Brazil, Russian Federation, India, China and South Africa). **Energy**, vol. 93, p. 999-1010, 2015. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215013146>. Accessed on: 19/03/2024

PATEL, Prutha; BABLANI, Sapna; PATEL, Anant. Impact assessment of urbanization and industrialization using Water Quality Index on Sabarmati River, Ahmedabad. In: **Proceedings of the 4th International Conference: Innovative Advancement in Engineering & Technology (IAET)**. 2020. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3553800. Accessed on: 19/03/2024

PETERS, Norman E.; MEYBECK, Michel. Effects of water quality degradation on fresh water availability: impacts of human activities. **International Water**, v. 25, no. 2, p. 185-193, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1080/02508060008686817>. Accessed on: 4 Mar 2024

PETRICÉ, Andreea-Cristina; STANCU, Stelian; GHITULESCU, Virgílio. Stationarity – The Central Concept in Time Series Analysis. **International Journal of Emerging Management Research**, v. 1, pg. 6-16, 2017. Available at: DOI: 10.23956/ijermt/V6N1/107. Accessed on: 17/05/2024

PHIRI, O. *et al.* Assessment of the impact of industrial effluents on the water quality of receiving rivers in urban areas of Malawi. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 237-244, 2005.

POLIDORO, Maurício; DE LOLLO, José Augusto; BARROS, Mirian Vizintim Fernandes. Environmental impacts of urban sprawl in Londrina, Paraná, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 5, n. 2, p. 73-83, 2011.

PRASAD, Dipak *et al.* Assessment of Seasonal Variation in Water Quality of Gomti River, Jaunpur City, India. In: **Rivers of India: Past, Present and Future**. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 153-164. available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49163-48>. Accessed on: 26/05/2024

PRATTE-SANTOS, Rodrigo; TERRA, Vilma Reis; AZEVEDO JÚNIOR, Romildo Rocha. Avaliação do efeito sazonal na qualidade das águas superficiais do rio Jucu, Espírito Santo, Sudeste do Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 127-143, 2023.

QAMRUZZAMAN, Md; KARIM, Salma; KOR, Sylvia. Nexus between Innovation–Openness–Natural Resources–Environmental Quality in N-11 Countries: What Is the Role of Environmental Tax. **Sustainability**, v. 16, n. 10, p. 3889, 2024.

RAJPUT, Ritu Singh; PANDEY, Sonali; BHADAURIA, Seema. Status of water pollution in relation to industrialization in Rajasthan. **Reviews on environmental health**, vol. 32, no. 3, p. 245-252, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0069>. Accessed on: 26/05/2024

RIBEIRO, Karina Hacke *et al.* Qualidade das águas superficiais relacionada ao uso do solo: um estudo de caso em uma bacia hidrográfica com pequenas propriedades e produção intensiva de hortaliças no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 656-668, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200030>. Acessado em 19/03/2024.

RIBEIRO, Natasha Ulhiana Ferreira *et al.* Qualidade da água do rio Paraná em região de balneabilidade: discussão sobre os impactos potenciais do lançamento de efluentes provenientes de tratamento secundário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 445-455, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210126>. Acessado em: 22/02/2024

ROM, Punloeuivorth; GUILLOTREAU, Patrice. Mismanaged plastic waste and the environmental Kuznets curve: A quantile regression analysis. **Marine Pollution Bulletin**, vol. 202, p. 116320, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X24002972>

SABATIN, Vitor Henrique Okubo. **Dívida pública e os efeitos sobre o PIB e o Gap do Produto (1994-2018)**: Modelos ARDL de dados em Painel. 2021. 37 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.89>

SAIDI, Kais; ZAIDI, Saida. The Impact of Population Growth on Environmental Quality and Gross Domestic Product (GDP): GMM System Analysis. **International Journal of Management, Accounting and Economics**, v. 1, 2019. Available at:

SANTOS, André Thiago Lemos Miranda dos. **Análise temporal dos impactos socioambientais das barragens de rejeito na bacia hidrográfica do rio Murucupi, Barcarena – PA**. Orientadora: Karyme do Socorro de Souza Vilhena. 2018. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) - Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/12413>. Acesso em: 21/04/2024.

SANTY, Sneha; MUJUMDAR, Pradeep; BALA, Govindasamy. Potential impacts of climate and land use change on the water quality of Ganga River Around the industrialized Kanpur region. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 9107, 2020. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-66171-x>. Accessed on: 26/05/2024

SILVA, Maytê Maria Abreu Pires de Melo; FARIA, Sérgio Donizete; MOURA, Priscilla Macedo. Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 133-143, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017134420>. Acessado em: 22/02/2024

SILVEIRA, A. G. *et al.* Análise do Valor-p Determinado pela Estatística τ na Aplicação do Teste de Dickey-Fuller Aumentado. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 23, p. 283-298, 2022.

SOSTMEYER JUNG, Márcia *et al.* ÁGUA: UM RECURSO FUNDAMENTAL PARA GARANTIR A SUSTENTABILIDADE. **Revista de Gestão Social e Ambiental/Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 7, 2023. Disponível em: 10.24857/rgsa.v17n7-013. Acessado em 28 maio 2024

STROKAL, Maryna *et al.* Urbanization: a growing source of multiple pollutants for rivers in the 21st century. **Npj Urban sustainability**, v. 1, pg. 1-13, 2021. available at: <https://www.nature.com/articles/s42949-021-00026-w>. accessed on: 22 mar 2024.

SUJAU, Islam Mir et al. Effect of industrial pollution on spatial variation in surface water quality. **American Journal of Environmental Science**, vol. 2, p. 120-129, 2013.

SUN, Aihui et al. Testing carrying capacity and the environmental Kuznets curve hypothesis for China: Evidence from the new dynamic autoregressive distributed lag model. **Gondwana Research**, vol. 129, p. 476-489, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X23002290>

SUN, Dongying; SHI, Mengxia; WEI, Jiameng; CHEN, Zhisong. Economic contribution and rebound effect of industrial water: The case of the Yangtze River Delta. **Water Resources and Economics**. Volume 42, 100222, April 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wre.2023.100222>. Accessed on: 4 Mar 2024.

SURAI, Laith Abdulrasool Jawad; SUHA, Ali Shaker Sahib Al Hamami; SALEM, Abdullah. Water pollution and humane alth: a review. **Journal of Conservation of Genetic and Environmental Resources**, v. 2, p. 75-78, 2023. available at:

SUTHAR, Surindra *et al.* Water quality assessment of river Hindon at Ghaziabad, India: impact of industrial and urban waste water. **Environmental monitoring and assessment**, v. 165, p. 103-112, 2010.

SYAFRUDIN, Muhammad *et al.* Pesticides in drinking water – a review. **International journal of environmental research and public health**, vol. 18, no. 2, p. 468, 2021.

TUDI *et al.*, Agricultural Development, Application of Pesticides and The ir **Impact on the Environment**. **International J. Environment. Public Health Res** 2021, 18 (3), 1112; available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>. Accessed on: 21/04/2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. Vice-Reitoria. Coordenação de Bibliotecas. Manual de normas UFPel para trabalhos acadêmicos. Pelotas, 2023. Revisão técnica de Aline Herbstrith Batista, Dafne Silva de Freitas, Suelen Aires Böettge. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/sisbi/normas-da-ufpel-para-trabalhos-academicos/>. Acesso em: 28/05/2024

WANG, Hao *et al.* The environmental effectiveness of water quality trading: Evidence from emissions trading programs in China. **Ecological Economics**, vol. 224, p. 108277, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800924001745>

WANG, Xueping et al. A holistic assessment of spatio temporal variation, driving factors, and risks influencing river water quality in the nor the a Stern Qinghai-Tibet Plateau. **Science of The Total Environment**, v. 851, p. 157942, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722050410>. Accessed on: 22 Feb. 2024

YIN, Hai Long; ISLAM, Md Sahidul; JU, Mengdie. Urban river pollution in the densely populated city of Dhaka, Bangladesh: overview and rehabilitation experience from Other developing countries. **Cleaner Production Magazine**, v. 321, p. 129040, 2021. available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129040>. Accessed on: 22 mar 2024

ZAHOR, Iqra; MUSHTAQ, Ayesha. Water pollution from agricultural activities: A critical global review. **Int. J. Chem. Biochem. Sci**, v. 23, p. 164-176, 2023. Available at:

<https://www.iscientific.org/wp-content/uploads/2023/05/19-IJCBS-23-23-24.pdf>. Accessed on: 7 Feb 2024

ZEILHOFER, Peter; LIMA, Eliana Beatriz Nunes Rondon; LIMA, Gilson Alberto Rosa. Effects of land use on water quality in the urbana glomeration of Cuiabá and Várzea Grande, stateof Mato Grosso, central Brazil. *UrbanWater Magazine*, v. 3, p. 173-186, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2010.484496>. Accessed on: 21 Mar 2024

ZHAN Jinxing, WU Zhongxing. Effects of liquor production waste water discar geon water quality and health risks in the Chishui River Basin, South west China, **Journal of Cleaner Production**, Volume 418,2023.available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138136>. Accessed on: 28 maio 2024

ZHANG, Chen *et al.* An integrated specification for the nexus between water pollution and economic growth in China: panel cointegration, long-run causality and environmental Kuznets curve. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 319-328, 2017.

ZHANG, Siyu; ZHANG, Heng. Anthropogenic impact on long-term riverine CODMn, BOD, and nutrient flux variation in the Pearl River Delta. **Science of the Total Environment**, v. 859, p. 160197, 2023. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722072977>. Accessed on: 22 Feb. 2023.

ZINABU, Eskinder *et al* Information's yn the sisto identify water quality issues and select applicable in-stream water quality model for the Awash River basin in Ethiopia: A perspective from developing countries. **Scientific African**, v. 23, p. e02063, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227624000073>. Accessed on: 22 Feb. 2024.

Capítulo III

Legislação ambiental e estrutura de saneamento: efeitos na qualidade da água dos rios e saúde pública em municípios brasileiros

Resumo: Este estudo investiga a relação entre legislação ambiental municipal, infraestrutura de saneamento básico, poluição dos rios e doenças de veiculação hídrica em 1.048 municípios brasileiros durante 2020. Utilizando Modelagem de Equações Estruturais (SEM), examinamos como a legislação ambiental influencia a qualidade da água dos rios, que por sua vez afeta diretamente a incidência de doenças relacionadas à água. Nossos resultados destacam que melhorias na infraestrutura de saneamento básico reduzem as doenças de veiculação hídrica e estão negativamente associadas à poluição da água dos rios. Além disso, a qualidade da água dos rios é influenciada pela legislação ambiental mais rigorosa, e a poluição da água dos rios medeia a relação entre a infraestrutura de saneamento e as doenças relacionadas à água. Estes achados sublinham a importância de políticas integradas que promovam melhorias na infraestrutura sanitária e reforcem a legislação ambiental para mitigar os riscos à saúde pública associados à poluição hídrica.

Palavras- Chaves: Saneamento básico, Águas residuais, Saúde humana, Legislação ambiental

Abstract: This study investigates the relationship between municipal environmental legislation, basic sanitation infrastructure, river pollution, and waterborne diseases in 1,048 Brazilian municipalities during 2020. Using Structural Equation Modeling (SEM), we examine how environmental legislation influences river water quality, which directly affects the incidence of waterborne diseases. Our results highlight that improvements in basic sanitation infrastructure reduce waterborne diseases and are negatively associated with river water pollution. Moreover, river water quality is influenced by stricter environmental legislation, and river water pollution mediates the relationship between sanitation infrastructure and waterborne diseases. These findings underscore the importance of integrated policies that promote sanitation infrastructure improvements and reinforce environmental legislation to mitigate public health risks associated with water pollution.

Keywords: Basic sanitation, Wastewater, Human health, Environmental legislation

1 Introdução

A qualidade da água dos rios e a incidência de doenças de veiculação hídrica são problemas críticos que afetam milhões de pessoas ao redor do mundo (ONU,2022). A degradação dos recursos hídricos e a falta de infraestrutura adequada de saneamento básico representam desafios substanciais para a saúde pública e o meio ambiente (ONU,2022). Estudos como os de Jiménez et al. (2019) e Boets *et al.* (2021) demonstram que a qualidade da água é diretamente influenciada pela infraestrutura de saneamento básico. A ausência de tratamento adequado de esgoto e água resulta em poluição hídrica, comprometendo a qualidade dos corpos d'água. Kim e Chung (2022) corroboram esses achados, evidenciando que investimentos em estações de tratamento de água são essenciais para reduzir a poluição dos rios.

Além disso, quando a qualidade de um recurso hídrico não está adequada aos seus usos, a água pode tornar-se uma provedora de doenças, a baixa qualidade da água na área de estudo apresentou relação com a incidência, ocorrência e mortalidade por doenças de veiculação hídrica (Toyama; Santino, Fushita, 2016).

Estudos diversos apontam a importância dos investimentos em saneamento básico. Rodríguez Miranda et al. (2016) destacam que sistemas eficientes de abastecimento de água e esgotamento sanitário são essenciais para melhorar as condições de saúde da população e reduzir a incidência de doenças transmitidas pela água. Bitew *et al.* (2017) identificaram que a falta de infraestrutura de saneamento básico adequada resultou em altas taxas de doenças diarreicas infantis, ressaltando a necessidade de investimentos nessa área.

Por outro lado, a implementação de melhorias na qualidade da água e no saneamento básico pode resultar em reduções significativas nas taxas de infecções parasitárias intestinais (Cissé, 2019) e na mortalidade por doenças transmitidas pela água (Helgertz e Önnersfors, 2019; Chapman, 2019). Estudos também mostram que a infraestrutura de saneamento básico é crucial para a preservação da qualidade da água dos rios, como evidenciado por Jiménez *et al.* (2019) e Boets *et al.* (2021), que demonstraram melhorias substanciais na qualidade da água após a instalação de estações de tratamento de águas residuais.

Além da infraestrutura, a legislação ambiental desempenha um papel vital na proteção dos recursos hídricos. Sakamoto et al. (2019) e Keiser e Shapiro (2019) demonstraram que a conformidade com regulamentações ambientais pode reduzir significativamente a poluição dos rios. A implementação de leis rigorosas e políticas de proteção ambiental é fundamental para a redução de poluentes e a promoção da sustentabilidade hídrica (Hasan *et al.*, 2019; Yurova e Shirokova, 2020). O saneamento adequado da água tem o objetivo de garantir que essa seja

segura e possa ser consumida pela população. Problemas de infraestrutura, todavia podem fazer com que a qualidade da água seja prejudicada, causando com isso impactos na saúde da população (Castro *et al.*, 2018).

Entretanto, a ineficácia dos serviços de saneamento básico e a falta de políticas ambientais rigorosas podem agravar a contaminação ambiental, impactando negativamente a saúde pública (Wolf *et al.*, 2022; Beach, 2022). A integração entre legislação ambiental e infraestrutura de saneamento é, portanto, essencial para garantir a qualidade da água e a saúde da população (Tumwebaze *et al.*, 2023; Romman e Kuisi, 2023). Diante desse cenário, surge a problemática central desta pesquisa: qual é a relação existente entre legislação ambiental, estrutura de saneamento, qualidade da água dos rios e doenças de veiculação hídrica no Brasil?

2 Referencial Teórico

2.1 Causas e consequências da falta de infraestrutura de saneamento básico e o impacto na qualidade

Desde tempos antigos, a demanda por água de qualidade tem sido um motor propulsor no desenvolvimento de uma variedade de sistemas de abastecimento hídrico. Ao longo da história, as civilizações engendraram dispositivos e métodos de purificação para atender a essa necessidade vital (Angelakis *et al.*, 2021). Por outro lado, a escassez de água potável exerceu uma influência significativa tanto em comunidades locais quanto na sociedade como um todo. Nos últimos dois séculos, esforços incansáveis têm sido empreendidos em todo o mundo para assegurar níveis aceitáveis de qualidade das águas. Concomitantemente, houve um notável aumento na expectativa de vida da população global (Angelakis *et al.*, 2021). Ademais, a água desempenha um papel fundamental em todos os processos ambientais e sociais (Gomez; Perdiguero; Sanz, 2019).

Em contrapartida, os efeitos na saúde pública tiveram como consequência o aumento da incidência de doenças, incluindo diarreia, malária, febre tifoide e doenças tropicais negligenciadas (Mensah *et al.*, 2023). Contudo, é importante notar que a poluição hídrica representa uma ameaça direta não apenas à saúde, mas também ao bem-estar humano, à produção de alimentos e ao equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e terrestres (Jadeja *et al.*, 2022). Essa interligação entre saúde e ecossistema ressalta ainda mais a necessidade de uma abordagem holística para o manejo da água.

Nesse contexto de desafios complexos, a adequação do saneamento básico surge como um componente crucial para assegurar a qualidade de vida da população e preservar o meio ambiente. De acordo com Hasan; Shahriar; Jim (2019), em diferentes regiões do mundo, incluindo na Índia, essa esfera enfrenta desafios significativos que comprometem tanto a saúde pública quanto a disponibilidade de recursos hídricos em níveis aceitáveis. Os mesmos autores Hasan; Shahriar; Jim (2019), destacam que na Índia, as doenças de transmissão hídrica, especialmente entre as crianças, figuram como uma causa frequente de mortalidade. As fontes antropogênicas, como despejos industriais não tratados, má gestão de resíduos domésticos e escoamento agrícola inadequado, são identificadas como os principais fatores contribuintes para a contaminação das fontes de água. Essa interdependência entre o acesso seguro à água e a saúde pública realça a importância de estratégias eficazes de gestão e saneamento para enfrentar os desafios atuais e futuros.

Issa (2019), ressalta que a qualidade dos recursos hídricos é amplamente afetada por atividades humanas, com o lançamento de efluentes sanitários, com ou sem tratamento prévio, sendo um dos principais causadores da deterioração da qualidade da água dos rios. No contexto brasileiro, Rodrigues (2020), enfatiza que para melhorar estruturalmente o saneamento básico no país, é essencial conectar políticas públicas eficientes ao setor sanitário, compreendendo as variáveis que o compõem, como o fortalecimento da participação municipal, busca por novas parcerias e fontes de financiamento compatíveis com a demanda. Além dos impactos ambientais, a falta de saneamento e o acesso insuficiente às redes de coleta de esgoto são fatores determinantes para a propagação de doenças, especialmente as parasitárias, que podem comprometer gravemente a saúde da população, como salientado por Arruda *et al.* (2019).

A partir de uma pesquisa conduzida no Alasca, é sugerido que o aumento do acesso à água encanada, aliado ao desenvolvimento da infraestrutura de saneamento domiciliar na região, pode resultar em consideráveis reduções nos gastos médicos tanto por parte dos órgãos públicos quanto das famílias. No entanto, quando as condições de saneamento e o fornecimento de água são inadequados em uma comunidade, essa situação, combinada com práticas deficientes de higiene, contribui para a propagação de doenças relacionadas à água. Em países como a Nigéria, certas comunidades ainda praticam um nível precário de saneamento e higiene, o que resulta na manutenção de uma alta prevalência de doenças hídricas (Raimi, *et al.*, 2019).

Acentuada desigualdade social, associada a um aumento do desemprego, às heranças do apartheid e a um sistema segregado de prestação de serviços, resulta em disparidades significativas no acesso aos serviços de saneamento básico na África do Sul. Fatores históricos, sociais e econômicos, somados a desafios de governança, contribuem para a vulnerabilidade

das áreas rurais e pequenas cidades em relação ao saneamento básico (Abrams *et al.*, 2021). De acordo com as análises de Bishoge (2021), a carência de recursos financeiros, o rápido crescimento populacional, desigualdades socioeconômicas entre os habitantes, bem como as políticas públicas e o nível educacional, emergem como os principais obstáculos na busca pela adequação do saneamento básico.

Além disso, a renda nacional bruta, a agricultura, o crescimento da população rural, indicadores de governança, como estabilidade política, controle da corrupção ou aspectos regulatórios são variáveis relacionadas ao acesso ao saneamento básico, influenciando na água de qualidade dos rios (Gomez; Perdiguero; Sanz, 2019). No entanto, os países de baixa renda têm enfrentado dificuldades para se adaptar às necessidades no setor de saneamento básico, como, por exemplo, a estrutura, a qual tem sido limitada nesses países (Dickin, *et al.* 2021).

Contudo, mesmos em países ricos como os Estados Unidos, ainda existem comunidades que são impactadas com a deficiência em saneamento básico. De acordo com Eichelberger *et al.* (2021), comunidades remotas do Alasca são particularmente vulneráveis à transmissão de doenças infecciosas por causa dos serviços inadequados de água e saneamento. Ainda por cima, há uma série de fatores socioeconômicos, físicos e de infraestrutura na zona rural do Alasca (por exemplo, isolamento, superlotação doméstica, instalações médicas limitadas e alta prevalência de doenças crônicas (Eichelberger, *et al.* 2021).

Em um estudo conduzido no Canadá, foi analisada a relação entre infraestrutura de água e saneamento e os níveis de saúde e bem-estar de indivíduos pertencentes aos povos indígenas que residem em reservas no país, nos anos de 2002, 2008 e 2015. Os resultados revelaram que o acesso a um suprimento de água domiciliar está ligado a uma notável redução de 80% nas chances de relatar sintomas de depressão. Além disso, a presença de saneamento adequado no lar apresentou associações significativas com a diminuição de casos de depressão, doenças gastrointestinais e complicações renais. Estes achados sugerem que a ampliação dos investimentos em infraestrutura nas comunidades das Primeiras Nações em todo o território canadense pode acarretar benefícios substanciais para a saúde dessas populações (O'gorman, 2021).

Indubitavelmente, o processo acelerado de urbanização e a gradual deterioração da infraestrutura têm agravado consideravelmente a crise no setor de saneamento. Observa-se que a grande parte das abordagens no contexto do saneamento urbano mantém o enfoque na expansão das redes centralizadas de esgoto, negligenciando, em grande medida, a necessidade de atender às comunidades mais desfavorecidas (Schrecongost, *et al.*, 2020). Conforme os

autores ressaltam, além da mera prestação de serviços a longo prazo, é imperativo considerar a viabilidade financeira e as funções do sistema público para alcançar resultados efetivos.

No contexto do Nepal, é crucial considerar as oportunidades educacionais e de emprego como fatores influentes no acesso aos serviços de saneamento básico nas zonas urbanas (Behera *et al.*, 2020). Os autores continuam explicando que além disso, o engajamento das partes interessadas e uma intervenção governamental eficaz desempenham papéis significativos nesse cenário.

No entanto, a prevalência de doenças transmitidas por veículos hídricos, por meio de mecanismos fecais-orais, não se limita estritamente ao abastecimento centralizado de água. Em primeiro lugar, a eficácia do sistema de fornecimento de água pode ser insuficiente devido à contaminação da fonte de água ou durante o transporte. Ademais, a ausência de sistemas de gerenciamento de resíduos eficazes também desempenha um papel significativo (Gallardo-albarran, 2020).

Segundo, observa Gallardo-Albarran (2020), a incidência de doenças entéricas pode permanecer alta devido ao armazenamento inadequado de dejetos humanos. Isso pode atrair vetores transmissores de doenças e contaminar os alimentos ou o abastecimento de água quando ocorrem enchentes. Um grande desafio enfrentado na maioria dos países do mundo, incluindo os da África, é a falta de acesso à água potável, e ao saneamento básico eficaz. Fatores financeiros, incluindo a expansão financeira pode ser usada como uma estratégia eficaz para melhorar o acesso aos serviços básicos de água potável e infraestrutura de saneamento adequado (Immurana *et al.*, 2022).

Além disso a disseminação de doenças ocorre após desastres em países em desenvolvimento devido ao manejo inadequado de saneamento devido a poluição da água, resíduos e água potável. O impacto dos desastres varia, desde a destruição extrema das infraestruturas e serviços de água, saneamento e higiene até um declínio na qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Assim, são necessárias intervenções de emergência na infraestrutura de saneamento básico para evitar a transmissão de doenças infecciosas, como diarreia ou cólera, e limitar a suscetibilidade a vetores portadores de doenças de veiculação hídrica (Hosseinpourtehrani, *et al.*, 2022). A seguir na tabela 9, apresenta-se as evidências teóricas e empíricas da influência da infraestrutura do saneamento básico na qualidade da água e na saúde humana.

Tabela 9 - Evidências teóricas e empíricas da influência da infraestrutura do saneamento básico na qualidade da água e na saúde humana

Construto	-->	Construto	Autor e ano	Principais resultados
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Rodríguez Miranda, <i>et al.</i> (2016)	O investimento em sistemas de abastecimento de água de qualidade e esgotamento sanitário, é relevante para melhorar as condições da saúde da população e reduzir a incidência de diversas doenças de veiculação hídricas.
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Bitew, <i>et al.</i> (2017).	Segundo os resultados, a doença diarreica infantil era um problema comum de saúde pública na Etiópia, o motivo seria a deficiência de investimento na estrutura de saneamento básico que impactava na qualidade da água.
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Cissé (2019)	Observou-se que melhorias relacionadas à qualidade da água e saneamento podem resultar em uma redução significativa de infecções parasitárias intestinais.
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Helgertz e Önnersfors, (2019)	Os resultados mostraram uma redução de 9% na mortalidade, por doenças transmitidas pela água associada à implementação de um sistema de tratamento de água e/ou sistema de esgoto nas cidades Suecas.
Estrutura saneamento básico	de -->	Poluição da água dos rios	Jiménez, <i>et al.</i> (2019)	A estrutura de saneamento influencia positivamente na qualidade da água dos rios
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Chapman (2019)	O estudo revela que o investimento em infraestrutura, explica aproximadamente 30% do declínio na mortalidade entre 1861 e 1900 no país de Gales.
Estrutura de saneamento básico	-->	Poluição da água dos rios	Boets, <i>et al.</i> (2021)	Observou-se que houve de fato uma melhoria significativa na qualidade da água devido à instalação de estações de tratamento de águas residuais e planos de gestão das bacias hidrográficas.
Estrutura de saneamento básico	-->	Poluição da água dos rios	Kim;Chung (2022)	Segundo os resultados, os investimentos em estação de tratamento de água (ETE), podem causar impactos na diminuição da poluição da água dos rios.
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Wolf, <i>et al.</i> (2022)	De acordo com os resultados os serviços ineficazes de saneamento básico podem potencializar a contaminação do meio ambiente, e consequentemente causar impactos na saúde humana.
Estrutura saneamento básico	de -->	Doenças de veiculação Hídrica	Beach (2022)	Observou-se, nos resultados que há uma forte ligação entre investimentos em infraestrutura e declínios em doenças transmitidas pela água contaminada.
Estrutura saneamento básico	-->	Doenças de veiculação Hídrica	Awad <i>et al.</i> (2023)	De acordo, com os resultados, o investimento em gestão de infraestruturas em saneamento, podem melhorar o estado de saúde de uma população.

Fonte: elaboração própria (2023).

As referências apresentadas na tabela 9 destacam a importância da infraestrutura de saneamento básico, tanto na promoção da saúde humana quanto na preservação da qualidade da água dos rios. Esses estudos sustentam que os investimentos direcionados aos sistemas de abastecimento de água e esgoto exercem um impacto positivo na melhoria na saúde coletiva, reduzindo a ocorrência de doenças veiculadas pela água (Rodríguez miranda, *et al.*, 2016). Salienta-se, portanto, a relevância da implementação de sistemas de tratamento de água e esgoto, cujo impacto na diminuição da mortalidade por doenças transmitidas pela água é significativo, como demonstrado por Helgertz; Önnersfors (2019); Chapman (2019).

Por outro lado, a falta de investimentos nessa esfera pode desencadear desafios substanciais para a saúde pública, com destaque para as doenças diarreicas infantis (Bitew, *et al.*, 2017). Nessa linha, as melhorias na qualidade da água, saneamento e higiene estão intrinsecamente associadas a consideráveis reduções nas taxas de infecções parasitárias intestinais em crianças (Cissé, 2019).

De forma análoga, a ineficácia dos serviços de saneamento básico não pode ser subestimada, uma vez que tem o potencial de agravar a contaminação ambiental, impactando de forma marcante a saúde da população (Wolf, *et al.*, 2022). Diante desse cenário, ressalta-se a vital importância da interconexão entre investimentos na infraestrutura de saneamento e a redução das doenças advindas da água contaminada (Beach, 2022).

Nesse contexto, a gestão apropriada das infraestruturas de saneamento emerge como um ponto central, efetivamente moldando uma estratégia robusta para aprimorar a saúde e o bem-estar das populações (Awad *et al.*, 2023). Considerando as evidências apresentadas, propõe-se a seguinte hipótese a ser testada (**H1**): A existência de infraestrutura de saneamento básico reduz a ocorrência de doenças de veiculação hídrica.

Ademais, considerando estudos realizados por Jiménez *et al.* (2019); Boets *et al.* (2021); Wolf *et al.*, (2022); Kim; Chung (2022), os quais demonstram que investimentos em infraestrutura resulta em melhorias significativas na qualidade da água, pode-se formular a segunda hipótese a ser testada (**H2**): A existência de infraestrutura de saneamento básico está associada a redução da poluição da água dos rios.

2.2 Legislação ambiental alinhada a Infraestrutura de saneamento básico causa impacto na poluição da água e nas incidências de doenças

A preservação da qualidade das águas superficiais tem se tornado cada vez mais difícil devido à intensificação das atividades antropogênicas nas bacias hidrográficas (Barroso, 2024).

Temas como saúde e meio ambiente sempre estiveram interligados ao longo da história das políticas públicas mundiais. O processo de urbanização e a formação de cidades são movimentos fundamentais para a proliferação de doenças infectocontagiosas, epidemias e pandemias em diferentes regiões do mundo (Almeida, Sampaio, Cota, 2020). A degradação dos recursos hídricos causa diversos danos à saúde da população, além dos problemas provocados pela ingestão de água inadequada (Vitor *et al.*, 2021). Em decorrência da má qualidade da água, doenças diarreicas, incluindo cólera, continuam sendo uma das principais causas de mortalidade e morbidade, especialmente em áreas com acesso limitado saneamento básico (Gallandat *et al.*, 2024).

De acordo (Odha e Mbataru, 2024), existe uma relação entre a legislação ambiental e a poluição da água. Os autores destacam a importância das políticas ambientais na prevenção da poluição da qualidade da água do Rio Ngong, em Nairobi capital do Quênia, observando que a aplicação de políticas pode afetar positivamente a qualidade da água e a conservação do ecossistema aquático. Nesse sentido, a adequação de leis ambientais e o gerenciamento eficiente das fontes de poluição podem evitar a poluição das águas superficiais rapidamente, principalmente com uma política de gestão da água melhorada e implementada de forma hábil (Tokatli, Varol, 2021). A poluição da água é um dos desafios globais que a sociedade deve abordar no século 21 para melhorar a qualidade hídrica e minimizar os efeitos adversos sobre a saúde humana e os ecossistemas (Zamora-Ledezma *et al.*, 2021).

O saneamento inadequado, como deficiências na coleta e tratamento de esgoto e gerenciamento de resíduos sólidos, contribui para a proliferação de vetores de doenças, como mosquitos, e para a disseminação de doenças infecciosas e parasitárias, como toxoplasmose, leishmaniose e doenças arbovirais (Ziliotto, Chies, Ellwanger, 2024). A exploração excessiva dos recursos hídricos causou degradação ecológica substancial em muitas bacias hidrográficas (Genova, Wai, 2023; Zhao *et al.*, 2023).

Medidas regulatórias ambientais podem acentuar o efeito moderador do crescimento econômico e mitigar o consumo inadequado dos recursos ambientais decorrente da expansão econômica (Genova, Wai, 2023; Zhao *et al.*, 2023). As agências de gestão de recursos hídricos e proteção ambiental são cruciais para a gestão de bacias hidrográficas, revisando ou emitindo novos regulamentos ambientais e influenciando a alocação de recursos por meio de restrições e normas que regulam as extrações de água (Genova, Wai, 2023).

Na China, o sistema de regulamentação da qualidade da água dos rios, chamado River Chief System, tem características únicas que o tornam eficiente no combate à poluição da água do rio, com empresas adotando políticas inovadoras de redução e melhorando a eficiência do

uso da água (Wang, Xiong, 2022). Segundo Wang e Xiong (2022), o fortalecimento das regulamentações ambientais reduz a produção das empresas poluentes, levando-as a se readequarem ou reconsiderarem sua entrada em mercados regulados.

A água é um veículo importante para a transmissão de doenças, tornando a poluição da água uma questão de saúde pública. Doenças como amebíase, giardíase, gastroenterite, febre tifoide, hepatite A e E, cólera, leptospirose, rotavírus, enterovírus, norovírus, esquistossomose e ascaridíase são exemplos de doenças transmitidas pela água contaminada (Jung et al., 2024).

Em termos gerais, as doenças de veiculação hídrica são transmitidas pela ingestão de água contaminada com fezes infectadas, apresentando sintomas como febre, dores abdominais, diarreia, flatulência, anemia e até morte (Vitor et al., 2021). O acesso a serviços básicos de água de qualidade e saneamento é essencial para reduzir muitas doenças infecciosas. No entanto, milhões de crianças em idade escolar na Etiópia não têm acesso a esses serviços (Girmay *et al.*, 2023). A conscientização pública sobre saneamento básico e tratamento da água é essencial para fortalecer a saúde pública (Sojobi, Zayed, 2022).

Sakamoto *et al.* (2019) destacam a lacuna na conformidade ambiental das empresas prestadoras de serviços e autoridades governamentais, ressaltando a necessidade de arranjos institucionais alinhados ao saneamento básico para melhorar a qualidade da água. Em conclusão, a interconexão entre saúde e meio ambiente evidencia a necessidade urgente de políticas públicas eficazes que promovam a urbanização sustentável e a proteção dos recursos hídricos. A degradação ambiental e o saneamento inadequado são fatores críticos na disseminação de doenças, destacando a importância de leis ambientais rigorosas e gestão eficiente das fontes de poluição. Medidas regulatórias e conscientização pública são essenciais para melhorar a qualidade da água e, conseqüentemente, a saúde pública, especialmente em áreas vulneráveis.

A experiência chinesa com o River Chief System exemplifica como regulamentações inovadoras podem ser eficazes na mitigação da poluição hídrica, reforçando a necessidade de arranjos institucionais robustos para enfrentar esses desafios globais. A seguir na Tabela 10, apresenta-se as evidências teóricas e empíricas da influência da legislação ambiental na gestão da infraestrutura de saneamento básico e qualidade da água dos rios e na incidência de doenças de veiculação hídrica.

Tabela 10 - Evidências teóricas e empíricas da influência da legislação ambiental focadas na gestão da infraestrutura de saneamento básico melhora a qualidade da água dos rios

Construto	--> Construto	Autor e Ano	Resultados
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Hasan <i>et al.</i> (2019)	A falta de leis rigorosas e infraestrutura de saneamento são principais causas da poluição da água em Bangladesh.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Yurova e Shirokova (2020)	Políticas e leis que protegem rios pequenos e médios são essenciais para prevenir e mitigar consequências socioambientais e econômicas.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Soares <i>et al.</i> (2020)	A legislação ambiental é crucial na gestão e avaliação da qualidade da água dos rios, fornecendo parâmetros para conformidade e intervenção.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Chowdhary <i>et al.</i> (2020)	Manter legislações ambientais focadas em saneamento é importante para conservar e controlar a poluição da água.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Carbonell <i>et al.</i> (2020)	Políticas ambientais locais evitam impactos negativos na qualidade da água.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Liu <i>et al.</i> (2021)	Políticas rigorosas de proteção ambiental reduzem a poluição das águas residuais e danos ecoambientais associados.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Cicilinski e Virgens Filho (2022)	Estabelecer limites para cada parâmetro da qualidade da água permite identificar corpos d'água problemáticos.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Tumwebaze <i>et al.</i> (2023)	Políticas ambientais que melhoram a gestão do saneamento básico são fundamentais para a qualidade da água e vida da população.
Legislação Ambiental	--> Poluição da água dos rios	Romman e Kuisi (2023)	A legislação local precisa ser reformada para garantir padrões de qualidade da água na Jordânia.
Poluição da água dos rios	--> Doenças de veiculação hídrica	Singh (2024)	A poluição da água afeta a saúde humana, causando doenças como cólera, febre tifóide e disenteria.
Poluição da água dos rios	--> Doenças de veiculação hídrica	Bochynska <i>et al.</i> (2024)	A poluição da água exerce impacto negativo na saúde, induzindo alterações hormonais e acelerando o envelhecimento.
Poluição da água dos rios	--> Doenças de veiculação hídrica	Sharma, Rajan e Nayak (2024)	Água poluída afeta economia, saúde ambiental e humana. Patógenos da água são uma ameaça à saúde humana em áreas rurais, causando várias doenças.
Poluição da água dos rios	--> Doenças de veiculação hídrica	Niyozmetov <i>et al.</i> (2024)	Sintoma comum de doenças transmitidas pela água é a diarreia.
Poluição da água dos rios	--> Doenças de veiculação hídrica	Sahoo e Goswami (2024)	A poluição da água ameaça a sustentabilidade dos ecossistemas e a saúde humana.
Poluição da água dos rios	--> Doenças de veiculação hídrica	Vidanelage (2024)	Milhões de pessoas morrem anualmente devido a doenças transmitidas pela água, demonstrando que são a principal causa de morte no mundo.

Fonte: elaboração própria (2024).

Conforme evidenciado na Tabela 10, a influência da legislação e políticas ambientais na qualidade da água dos rios é evidenciada por uma série de estudos. Sakamoto *et al.* (2019) destacam que a falta de conformidade das empresas às regulamentações focadas em saneamento pode aumentar a poluição dos rios. Keiser e Shapiro (2019) observam que a implementação da lei da qualidade da água nos Estados Unidos resultou na diminuição da poluição hídrica. Por outro lado, Hasan *et al.* (2019) apontam a ausência de leis rigorosas e infraestrutura de saneamento como principal fator de poluição da água em Bangladesh.

Yurova; Shirokova (2020) ressaltam que políticas e leis visando à proteção de rios de pequeno e médio porte são cruciais para evitar consequências socioambientais e econômicas negativas. Soares *et al.* (2020) enfatizam o papel crucial da legislação ambiental no monitoramento e avaliação da qualidade da água dos rios, fornecendo parâmetros claros para intervenções de proteção e restauração.

Outros estudos, como Chowdhary *et al.* (2020) e Carbonell, *et al.* (2020), destacam que a manutenção de legislações ambientais é fundamental para conservação e controle da poluição hídrica. Cicilinski e Virgens Filho (2022) indicam que os limites estabelecidos pela legislação têm impacto na interpretação da qualidade da água. Tumwebaze, *et al.* (2023) sugerem que políticas ambientais focadas no saneamento básico são essenciais para a qualidade da água e bem-estar da população. Finalmente, Romman e Kuisi (2023) propõem reformas na legislação local para garantir padrões de qualidade da água em regiões específicas.

Globalmente, esses estudos reforçam que a legislação e políticas ambientais têm um papel fundamental na prevenção da poluição e na promoção da qualidade da água dos rios, sendo essenciais para a sustentabilidade ambiental e a saúde pública. Desta forma, propõe-se a terceira hipótese da pesquisa **(H3)**: A existência de legislação ambiental está significativamente e positivamente relacionada a existência da estrutura de saneamento básico nos municípios investigados.

De acordo com o que descrito na tabela 10, Singh (2024), destaca que a poluição da água causa, como cólera, febre tifoide e disenteria, afetando a saúde humana. Já os autores Bochynska, *et al.*, (2024), destacam que poluição da água tem impacto negativo na saúde dos indivíduos, induzindo alterações hormonais e acelerando o envelhecimento das pessoas. Sharma, Rajan e Nayak (2024), citam que patógenos presentes na água poluída são uma das principais ameaças à saúde humana em áreas rurais, causando várias doenças. Niyozmetov, *et al.* (2024), destaca que a diarreia é um dos sintomas mais comuns de doenças transmitidas pela água.

Em conformidade Sahoo e Goswami (2024), sustentam que a poluição da água é um desafio ambiental significativo que ameaça a sustentabilidade dos ecossistemas e a saúde humana. De maneira semelhante, Vidanelage (2024) sugere que milhões de pessoas morrem anualmente devido a doenças transmitidas pela água, destacando a poluição hídrica como uma das principais causas de morte no mundo.

Em conclusão a tabela 10, demonstra a importância crítica da legislação ambiental e da gestão de saneamento básico na melhoria da qualidade da água dos rios. A falta de políticas adequadas resulta em poluição significativa e em impactos negativos sobre a saúde humana, evidenciando a necessidade de reforçar e implementar rigorosamente essas leis para proteger tanto o meio ambiente quanto a saúde pública. Em síntese a relevância das doenças de transmissão hídrica tem sido de grande impacto na saúde pública (Vitor *et al.*, 2021). Desta forma propõe-se a última hipótese a ser testada (H4): A poluição da água dos rios está significativamente e positivamente relacionada a doenças de veiculação hídrica.

3 Metodologia

Esta seção apresenta detalhes sobre a metodologia adotada no presente estudo, o qual empregou uma abordagem quantitativa por meio de pesquisa descritiva e documental, utilizando o método Modelagem de Equações e Análise fatorial.

3.1 Coleta e análise de dados

Por meio da técnica de coleta de dados utilizou-se a estatística descritiva e documental. A estatística descritiva cujo objetivo básico é o de sintetizar uma série de valores de mesma natureza, permitindo dessa forma que se tenha uma visão global da variação desses valores, organiza e descreve os dados de três maneiras: por meio de tabelas, gráficos e medidas descritivas (Guedes, *et al.*, 2005). Já a pesquisa documental vale-se de materiais que não recebem ainda um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetos da pesquisa (Gil, 2002).

Este estudo tem como objetivo examinar a relação entre existência de legislação ambiental municipal, a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, a existência de infraestrutura de saneamento básico e a poluição da água dos rios brasileiros, durante o ano de 2020, em 1048 municípios. A escolha desse período decorre da disponibilidade mais recente dos dados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os dados foram obtidos de fontes secundárias, sendo originários da ANA (2020) e do Instituto Brasileiro de

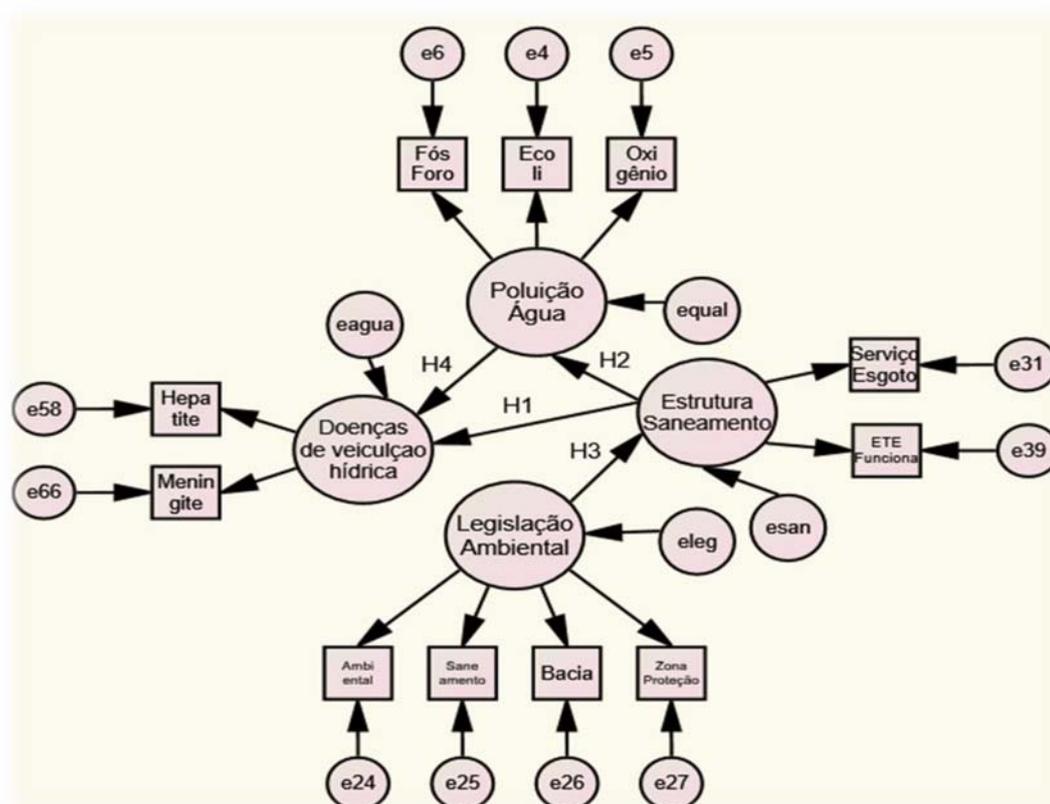
Geografia e Estatística (IBGE, 2024) e da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, disponível em IBGE (2017). Fez-se o uso do SPSS 24.0 para estatísticas descritivas e Alfa de Cronbach, e o SPSS Amos TM 24.0 para análise fatorial e de equações estruturais.

3.2 Modelo teórico proposto

Nesta pesquisa foram propostos 4 construtos: poluição da água, estrutura de saneamento básico, doenças de veiculação hídrica e legislação ambiental. O modelo teórico proposto neste estudo pode ser observado na figura 6.

Modelo teórico proposto

Figura 6 - Modelo teórico



Fonte: Autoria própria (2024).

O construto infraestrutura de saneamento básico foi formado pelas variáveis *Dummy*: serviço de esgotamento sanitário, em que a unidade indica a inexistência de serviço de esgotamento sanitário no município e pela variável *Dummy* ETE, em que a unidade indica a existência de pelo menos uma estação de tratamento de efluente em funcionamento no município. As variáveis foram obtidas através de IBGE (2017). O construto denominado de doenças de veiculação hídrica foi formado pelas variáveis: ocorrência de casos de Hepatite e de

Meningite em cada um dos municípios analisados. Os dados foram obtidos através de DATASUS (2024).

O construto legislação ambiental foi formada por quatro variáveis do tipo *Dummy*, em que a unidade indica: a existência de legislação ambiental no município, a existência de legislação sobre saneamento básico, a existência de legislação que trata da gestão de bacias hidrográficas e a existência de legislação que trata da zona de proteção ambiental nas proximidades dos rios. Os dados foram obtidos do levantamento denominado de Pesquisa de Informações Básicas Municipais, que foi obtido através de IBGE (2019). Por fim, as setas entre os construtos indicam o sentido da relação causal que dão forma as seguintes hipóteses. Por fim, as setas entre os construtos indicam o sentido da relação causal que dão forma as seguintes hipóteses da pesquisa.

3.3 Validação dos construtos e do modelo

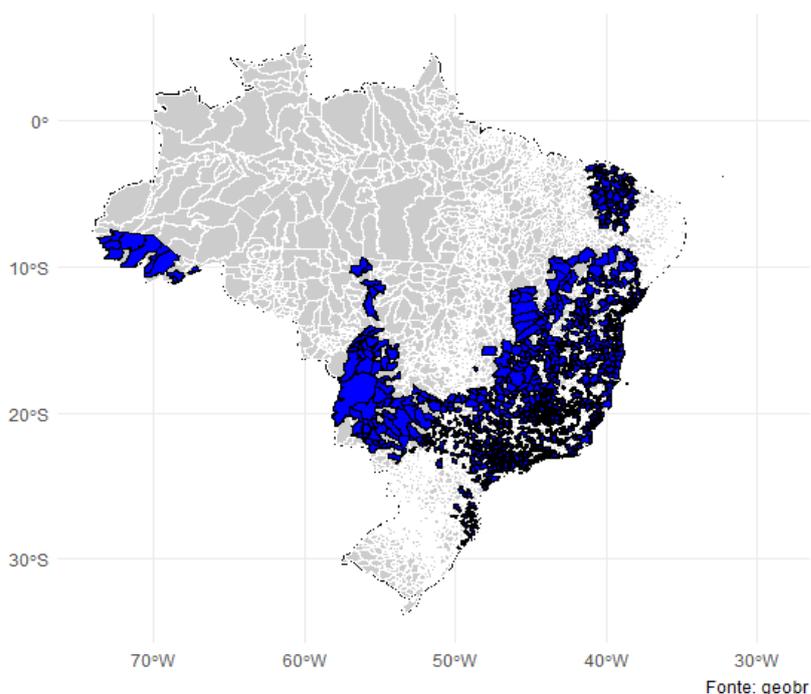
A validação dos construtos e do modelo proposto foi realizada por meio da modelagem de equações estruturais (MEE). Avaliou-se a unidimensionalidade dos construtos e a confiabilidade utilizando o Alfa de Cronbach e o índice de confiabilidade Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), considerando valores superiores a 0,6 como satisfatórios (Hair *et al.*, 2010; Hair *et al.*, 2009). O valor do KMO varia de 0 a 1, com pontuações mais altas indicando melhor adequação dos dados para a análise fatorial. Em geral, valores acima de 0,6 são considerados satisfatórios, valores acima de 0,7 são considerados bons e valores acima de 0,8 são considerados excelentes.

A análise fatorial confirmatória será empregada para validar individualmente os construtos e o modelo final. Por fim, os índices de ajuste absoluto incluíram: Estatística Qui-quadrado, Qui-quadrado relativo, Root MeanSquares Residual (RMSR), Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) e Goodness-of-Fit Index (GFI). Já os índices de ajuste incremental abrangerão: Normed Fit Index (NFI), Comparative Fit Index (CFI) e Tucker-Lewis Index (TLI). Esses índices são essenciais para avaliar a qualidade do ajuste do modelo de medição proposto em relação aos dados observados. Ademais, a significância dos coeficientes estimados será avaliada individualmente.

4 Resultados e Discussão

Este estudo demonstra a relação entre os construtos legislação ambiental municipal, a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, a infraestrutura de saneamento básico e poluição da água dos rios em uma amostra de 1048 municípios brasileiros durante o ano de 2020.

Figura 7 - Mapa da amostra de municípios analisados



Fonte: Autoria própria (2024).

Com base na figura 7, a pesquisa abrangeu principalmente as regiões Sudeste, Sul, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil, com menor presença na região Norte. No Sudeste, a pesquisa se concentrou significativamente em Minas Gerais e São Paulo, onde há uma grande quantidade de municípios destacados em preto e azul. O Espírito Santo e o Rio de Janeiro também apresentam vários municípios destacados, embora em menor quantidade.

Na região Sul, os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul apresentam muitos municípios destacados em azul, especialmente no norte e centro do Rio Grande do Sul. Na região Centro-Oeste, Goiás e Mato Grosso do Sul possuem vários municípios destacados em azul. O Distrito Federal também está incluído, mas com menos intensidade em

comparação com Minas Gerais e São Paulo. Na região Nordeste, a Bahia apresenta diversos municípios destacados em preto e azul. Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará também têm vários municípios destacados em azul e preto.

Na região Norte, o estado do Acre possui alguns municípios destacados em azul, assim como Tocantins. Em suma, a pesquisa abrangeu principalmente as regiões Sudeste, Sul, Centro-Oeste e Nordeste, com menor presença na região Norte, destacando a abrangência e diversidade geográfica da amostra estudada. A seguir, na Tabela 11, são demonstradas as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na pesquisa.

Tabela 11 - Estatística Descritiva das variáveis utilizadas na pesquisa

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Valor médio de Fósforo dos rios do município	0,010	6,510	0,183	0,070
Valor médio de Ecoli dos rios do município	1,000	8.260.000,000	43.551,216	1.388,430
Valor médio de Oxigênio Dissolvido dos rios do município	0,560	14,360	6,611	7,000
Existe Legislação de zona de proteção ambiental no município	0,000	1,000	0,562	1,000
Existe Legislação de proteção de bacia hidrográfica no município	0,000	1,000	0,270	0,000
Existe Legislação de saneamento no município	0,000	1,000	0,724	1,000
Existe Legislação ambiental no município	0,000	1,000	0,855	1,000
Existe Serviço de Esgoto no município	0,000	1,000	0,574	1,000
Existe Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) no município	0,000	1,000	0,561	1,000
Número de casos de Hepatite no município	1,000	1.233,000	17,366	3,000
Número de casos de Meningite no município	1,000	958,000	18,981	3,000

Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 11, apresenta estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na pesquisa, proporcionando uma visão dos dados coletados sobre a qualidade da água, a existência de legislação ambiental e de saneamento, e a incidência de doenças em diferentes municípios.

Começando pelos parâmetros de qualidade da água dos rios dos municípios analisados, o valor médio de fósforo varia de 0,010 a 6,510 mg/L, com uma média de 0,183 mg/L e uma mediana de 0,070 mg/L. Esses valores indicam uma ampla variabilidade na concentração de fósforo, um nutriente que, em excesso, pode levar à eutrofização dos corpos hídricos. O valor médio de *Escherichia coli* (*E. coli*), um indicador de contaminação fecal, apresenta uma variação extrema de 1 a 8.260.000 colônias/100mL, com uma média de 43.551,216 colônias/100mL e uma mediana de 1.388,430 colônias/100mL. A grande disparidade entre a média e a mediana sugere a presença de alguns municípios com níveis muito altos de contaminação. Os três municípios com maior índices de contaminação foram: São Bernardo do Campo (SP), Limeira (SP) e Vila Velha (ES). O oxigênio dissolvido, crucial para a vida

aquática, varia de 0,560 a 14,360 mg/L, com uma média de 6,611 mg/L e uma mediana de 7,000 mg/L, indicando que a maioria dos rios mantém níveis de oxigênio adequados, embora hajam casos de águas potencialmente anóxica.

No que diz respeito à legislação ambiental e de saneamento, a existência de legislação de zona de proteção ambiental apresenta uma média de 0,562, indicando que pouco mais da metade dos municípios tem esse tipo de legislação, com uma mediana de 1,000, sugerindo que muitos municípios têm essa legislação implementada. A legislação de proteção de bacia hidrográfica é menos comum, com uma média de 0,270 e uma mediana de 0,000, o que indica que a maioria dos municípios não possui essa proteção específica. A legislação de saneamento é mais prevalente, com uma média de 0,724 e uma mediana de 1,000, mostrando que a maioria dos municípios possui normas regulatórias para saneamento. A existência de legislação ambiental geral tem uma média de 0,855 e uma mediana de 1,000, refletindo uma ampla adoção de políticas ambientais entre os municípios.

Em termos de infraestrutura, 57,4% dos municípios têm serviços de esgoto, com uma mediana de 1,000, sugerindo que muitos municípios possuem essa infraestrutura básica. A presença de estações de tratamento de efluentes (ETE) está em 56,1% dos municípios, também com uma mediana de 1,000, indicando que mais da metade dos municípios possui sistemas para tratar efluentes antes de liberá-los no ambiente.

Finalmente, analisando a saúde pública, o número de casos de hepatite varia de 1 a 1.233, com uma média de 17,366 e uma mediana de 3,000, enquanto os casos de meningite variam de 1 a 958, com uma média de 18,981 e uma mediana de 3,000. A disparidade entre média e mediana em ambos os casos indica que a maioria dos municípios reporta poucos casos dessas doenças, mas alguns apresentam números significativamente mais altos, o que pode estar relacionado a fatores de saneamento e qualidade da água.

Em resumo, a Tabela 11, revela a diversidade e complexidade dos dados sobre saneamento, qualidade da água e saúde pública nos municípios estudados. A variabilidade nas concentrações de fósforo e E. coli destaca diferenças significativas na qualidade da água, enquanto os dados sobre a legislação ambiental e infraestrutura de saneamento sugerem uma adoção desigual de políticas e práticas. A análise da incidência de doenças mostra a necessidade de investimentos contínuos e estratégias integradas para melhorar a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. Os resultados apresentados na próxima tabela são obtidos após a realização da Modelagem de Equações Estruturais (MEE) que busca testar as hipóteses propostas nesta pesquisa. A seguir, na Tabela 12, são discutidos os valores dos índices de ajuste do modelo proposto, comparados com os valores de referência estabelecidos na literatura.

Tabela 12 -Valores do índice de ajuste, autores e valores de referência

Índices de ajuste	Autor de referência	Valor de referência	Valor
Razão Qui-quadrado	Carmines e Mciver (1981)	<3,00	2,963
GFI	Byrne (2013)	>0,95	0,981
CFI	Byrne (2013)	>0,95	0,999
TLI	Hu e Bentler (1999)	>0,95	0,999
IFI	Bollen (1989)	>0,90	0,999
RMSEA	Steiger (2007)	<0,10	0,043
RMSR	Hooper; Coughlan; Mullen (2008)	<0,05	0,048

Legenda: * Razão qui-quadrado pelos graus de liberdade (df). ** Não Aplicável.

Fonte: Elaboração Própria (2024).

A tabela 12, apresenta os valores dos índices de ajuste utilizados para avaliar a adequação do modelo estrutural proposto. Conforme os critérios estabelecidos pelos autores de referência, os resultados indicam que o modelo atende aos padrões aceitáveis de ajuste. A razão qui-quadrado, um indicador da discrepância entre o modelo proposto e os dados observados, apresenta um valor de 2,962, próximo ao limite recomendado de 3, indicando um bom ajuste.

Os índices de ajuste incremental, como GFI (Goodness of Fit Index), CFI (Comparative Fit Index), TLI (Tucker-Lewis Index) e IFI (Incremental Fit Index), todos excedem os valores de referência de 0,95 estabelecidos por Byrne (2013) e Hu e Bentler (1999), demonstrando que o modelo possui um bom ajuste comparativo e incremental em relação aos modelos nulos alternativos. Além disso, o RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation), um índice que avalia o ajuste do modelo em relação à população, apresenta um valor de 0,043, abaixo do limite crítico de 0,10 sugerido por Steiger (2007), indicando um ajuste adequado do modelo aos dados. O RMSR (Root Mean Square Residual), que avalia o erro de aproximação do modelo, também está abaixo do limite de 0,05, com um valor de 0,048, conforme recomendado por Hooper, Coughlan e Mullen (2008).

Portanto, com base nos índices de ajuste apresentados, podemos concluir que o modelo estrutural proposto neste estudo demonstra um ajuste satisfatório aos dados observados, validando sua utilização para analisar as relações entre infraestrutura de saneamento, legislação ambiental, qualidade da água dos rios e saúde pública conforme discutido nas hipóteses da pesquisa (Giles-Corti; Lowe; Arundel, 2020). A seguir na tabela 13, apresenta-se as Cargas diretas estimadas padronizadas do modelo da pesquisa.

Tabela 13 - Cargas diretas estimadas (padronizadas) do modelo

Construto/Variável	Direção	Construto/Variável	Carga	p-valor
Estrutura de Saneamento do município	<---	Legislação Ambiental do município	0,325	***
Poluição Água dos Rios do município	<---	Estrutura de Saneamento do município	-0,097	*
Doenças relacionadas à água	<---	Estrutura de Saneamento do município	-0,396	**
Doenças relacionadas à água	<---	Poluição Água dos Rios do município	0,252	**
Valor médio de Fósforo dos rios do município	<---	Poluição Água dos Rios do município	0,694	***
Valor médio de E. Coli dos rios do município	<---	Poluição Água dos Rios do município	0,522	***
Valor médio de Oxigênio Dissolvido dos rios do município	<---	Poluição Água dos Rios do município	-0,538	***
Existe legislação de zona de proteção ambiental no município	<---	Legislação Ambiental do município	0,525	***
Existe legislação de proteção de bacia hidrográfica no município	<---	Legislação Ambiental do município	0,317	**
Existe legislação de saneamento no município	<---	Legislação Ambiental do município	0,762	***
Existe legislação ambiental no município	<---	Legislação Ambiental do município	0,870	***
Existe serviço de esgoto no município	<---	Estrutura de Saneamento no município	0,893	***
Existe estação de tratamento de efluentes (ETE) no município	<---	Estrutura de Saneamento no município	0,800	***
Número de casos de Hepatite no município	<---	Doenças relacionadas à água no município	0,743	***
Número de casos de Meningite no município	<---	Doenças relacionadas à água no município	0,594	***
	e26 <--->	e27	0,250	***

Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 13, apresenta as cargas diretas estimadas e padronizadas do modelo proposto, delineando as relações entre diversos construtos e variáveis fundamentais para a compreensão da dinâmica entre saneamento básico, legislação ambiental, qualidade da água e saúde pública. A análise desses dados revela evidências que corroboram as hipóteses propostas nesta pesquisa (H1, H2, H3, H4).

A primeira relação abordada é entre a Estrutura de Saneamento do Município e a Legislação Ambiental do Município, representada por uma carga de 0,325 ($p < 0,01$), validando a hipótese H3. Esta relação positiva e estatisticamente significativa indica que municípios que apresentam legislação ambiental tendem a possuir uma melhor infraestrutura de saneamento. Este achado é apoiado por estudos como os de Sakamoto et al. (2019) e Soares *et al.* (2020), que enfatizam a importância de políticas ambientais rigorosas na promoção de uma infraestrutura de saneamento adequada.

A segunda relação, entre a Poluição da Água dos Rios e a Estrutura de Saneamento do Município, é representada por uma carga negativa de $-0,097$ ($p < 0,05$), confirmando a hipótese H2. Embora a carga fatorial seja baixa, esta relação sugere que melhorias na estrutura de saneamento contribuem para a redução da poluição dos rios. Pesquisas como as de Jiménez *et al.* (2019) e Boets *et al.* (2021) sustentam este achado, demonstrando que investimentos em estações de tratamento de águas residuais têm um impacto significativo na melhoria da qualidade da água dos rios.

A terceira relação, entre as Doenças Relacionadas à Água e a Estrutura de Saneamento do Município, possui uma carga negativa de $-0,396$ ($p < 0,01$), validando a hipótese H1. Esta relação negativa e estatisticamente significativa indica que uma infraestrutura de saneamento mais eficiente está associada à redução de doenças transmitidas pela água. Estudos de Rodríguez Miranda *et al.* (2016) e Helgertz e Önerfors (2019) corroboram esta conclusão, evidenciando que investimentos em saneamento básico são cruciais para a saúde pública, reduzindo a incidência de doenças veiculadas pela água.

A quarta e última relação significativa analisada é entre as Doenças Relacionadas à Água e a Poluição da Água dos Rios, com uma carga positiva de $0,252$ ($p < 0,01$), confirmando a hipótese H4. Este resultado indica que a poluição dos rios está diretamente associada ao aumento de doenças de veiculação hídrica. Estudos como os de Vitor *et al.* (2021) e Wolf *et al.* (2022) reforçam essa relação, mostrando que a contaminação hídrica é um vetor crucial para a transmissão de várias doenças, incluindo amebíase, giardíase e hepatite A.

Além das hipóteses principais, a Tabela 13, também apresenta outras relações importantes, como a forte associação entre a Estrutura de Saneamento e a presença de serviços de esgoto ($0,893$, $p < 0,001$) e estações de tratamento de efluentes ($0,800$, $p < 0,001$). Estas relações sublinham a interdependência entre diferentes componentes da infraestrutura de saneamento e a importância de uma abordagem integrada para melhorias efetivas.

Por outro lado, a análise também destaca a influência significativa da Legislação Ambiental sobre diversas variáveis relacionadas, como a existência de legislação de proteção ambiental ($0,870$, $p < 0,001$), saneamento ($0,762$, $p < 0,001$) e proteção de bacias hidrográficas ($0,317$, $p < 0,01$). Estes achados são congruentes com estudos como os de Keiser e Shapiro (2019), que mostram a eficácia de leis de qualidade da água na redução da poluição hídrica.

Em síntese, a análise da Tabela 5, revela a complexa inter-relação entre a infraestrutura de saneamento, legislação ambiental, qualidade da água e saúde pública. As evidências empíricas confirmam que tanto a melhoria da infraestrutura de saneamento quanto a implementação de políticas ambientais rigorosas são essenciais para a redução da poluição

hídrica e a incidência de doenças de veiculação hídrica. Assim, os resultados obtidos reforçam a necessidade de investimentos contínuos e a formulação de políticas públicas integradas para promover a saúde e a sustentabilidade ambiental.

5 Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo explorar a complexa inter-relação entre a legislação ambiental municipal, a infraestrutura de saneamento básico, a qualidade da água dos rios e a ocorrência de doenças de veiculação hídrica em uma amostra abrangente de 1048 municípios brasileiros no ano de 2020. A análise, baseada na modelagem de equações estruturais, revelou várias relações significativas que fornecem insights valiosos para a formulação de políticas públicas e estratégias de gestão ambiental e de saúde.

Os resultados confirmam que uma legislação ambiental robusta é um fator crucial para a promoção de melhorias na infraestrutura de saneamento básico. A análise mostrou que municípios com legislação ambiental abrangente tendem a ter melhor infraestrutura de saneamento, incluindo a presença de serviços de esgotamento sanitário e estações de tratamento de efluentes. Isso se reflete na redução significativa da poluição hídrica, evidenciada pelos menores níveis de fósforo e E. coli, bem como pelo aumento nos níveis de oxigênio dissolvido nos rios. Esses achados são consistentes com a literatura existente, que aponta para a eficácia de políticas ambientais rigorosas na melhoria da qualidade da água.

Além disso, o estudo demonstrou que a qualidade da água dos rios tem um impacto direto na saúde pública. Municípios com melhor qualidade da água apresentaram menor incidência de doenças de veiculação hídrica, como hepatite e meningite. A poluição da água, medida pelos níveis de fósforo e E. coli, mostrou-se positivamente correlacionada com a incidência dessas doenças, reforçando a importância de uma água limpa e segura para a prevenção de problemas de saúde.

A infraestrutura de saneamento básico revelou-se um determinante crítico tanto para a qualidade da água quanto para a saúde pública. Municípios com infraestrutura adequada, incluindo serviços de esgotamento sanitário e estações de tratamento de efluentes, apresentaram menores níveis de poluição hídrica e menor incidência de doenças de veiculação hídrica. Este estudo corroborou evidências anteriores, destacando que investimentos em saneamento básico são fundamentais para a promoção da saúde pública e a sustentabilidade ambiental.

Adicionalmente, a análise dos coeficientes de carga padronizada confirmou a importância de uma abordagem integrada que combine legislação ambiental eficaz com

investimentos em infraestrutura de saneamento. Os dados mostraram que a presença de legislação específica sobre saneamento, gestão de bacias hidrográficas e zonas de proteção ambiental está fortemente associada a melhorias na infraestrutura e na qualidade da água. Esses achados enfatizam a necessidade de uma abordagem holística e coordenada para a gestão ambiental e de saúde pública.

Os índices de ajuste do modelo utilizado no estudo também indicam uma boa adequação dos dados, reforçando a validade das conclusões. A análise fatorial confirmatória e os índices de ajuste absoluto e incremental demonstraram que o modelo teórico proposto é robusto e capaz de capturar as complexas inter-relações entre os diferentes construtos analisados.

Em suma, este estudo evidencia a importância de uma legislação ambiental rigorosa e de investimentos contínuos em infraestrutura de saneamento básico para a melhoria da qualidade da água e a redução de doenças de veiculação hídrica. Os resultados destacam a necessidade de políticas públicas eficazes e integradas que abordem simultaneamente questões de saneamento, qualidade da água e saúde pública. Para o futuro, recomenda-se a implementação de estratégias de gestão ambiental que promovam a sustentabilidade e a saúde pública, baseando-se nas evidências apresentadas por este estudo.

Referências Bibliográficas

ABRAMS, Amber L. *et al.* Vulnerability to water, sanitation and hygiene in rural and small towns in South Africa: Exploring the role of climate change, marginalization and in equality. **Water**, v. 13, no. 20, p. 2810, 2021.

ALCAMO, José. Water quality and its interconnections with the Sustainable Development Goals. *Current Opinion on environmental sustainability*, vol. 36, p. 126-140, 2019. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343518300307>. Accessed at: 19/01/2024.

ALMEIDA, Lorena Sampaio; COTA, Ana Lúcia Soares; RODRIGUES, Diego Freitas. Saneamento, Arboviroses e Determinantes Ambientais: impactos na saúde urbana. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 25, p. 3857-3868, 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ANGELAKIS, Andreas N. *et al.* Water quality and life expectancy: parallel courses in time. **Water**, v. 13, no. 6, p. 752, 2021.

ARRUDA, Regina de Oliveira Moraes et al. Ocorrência de casos de doenças diarreicas agudas e sua relação com os aspectos sanitários na região do alto Tietê, São Paulo. **Hygeia-Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. 15, n. 34, p. 53-61, 2019.

AWAD, Atif et al. Infrastructure Development's role in environmental degradation in sub-Saharan Africa: Impacts and transmission channels. **Journal of Cleaner Production**, p. 137622, 2023.

BARROSO, Gabriela Rodrigues et al. Assessment of water quality based on statistical analysis of physical-chemical, biomonitoring and land use data: Rio Manso supply reservoir. **Science of The Total Environment**, vol. 912, p. 169554, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169554>

BEACH, Brian. Water infrastructure and health in US cities. **Regional Science and Urban Economics**, v. 94, p. 103674, 2022.

BEHERA, Bhagirath *et al.* Analysis of household access to drinking water, sanitation, and waste disposal services in urban areas of Nepal. **Utilities Policy**, v. 62, p. 100996, 2020.

BIJEKAR, Sangha et al. The State of the Art and Emerging Trends in the Wastewater Treatment in Developing Nations. **Water**, v. 14, no. 16, pg. 2537, 2022. Available in: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/16/2537>.

BISHOGE, Obadia, K. Challenges facing sustainable water supply, sanitation and hygiene achievement in urban areas in sub-Saharan Africa. **The International Journal of Justice and Sustainability**, v. 26, 2021 - Edition 7. Available in: <https://doi.org/10.1080/13549839.2021.1931074>.

BITEW, B. D.; WOLDU, W.; GIZAW, Z. Childhood diarrheal morbidity and sanitation predictors in a nomadic community. **Italian Journal of Pediatrics**, v. 43, n. 1, p. 91, out. 2017.

BOCHYNSKA, Stefania *et al.* The impact of water pollution on the health of older people. **Maturitas**, v. 185, p. 107981, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378512224000768>

BOETS, P. *et al.* Do investments in water quality and habitat restoration programs pay off? An analysis of the chemical and biological water quality of a lowland stream in the Zwalm River basin (Belgium). **Environmental Science & Policy**, 2017. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901121001775>. Accessed at: 10/07/2023.

BOLLEN, K A. A new incremental fit index for general structural equation models. **Sociological methods & research**, v. 17, n. 3, p. 303-316, 1989.

BRESSLER, R. Daniel. Science and Challenges of Sustainability. In: **Sustainability: Implications for business and investment**. 2024. pg. 9-38. Available at: https://doi.org/10.1142/9789811240928_0002. Accessed on: 20/01/2024.

BYRNE, B. M. **Structural equation modeling with AMOS: Basic concepts, applications, and programming**. Routledge, 2013.

CAGLAR, Abdullah Emre; DAŞTAN, Muhammet; REJ, Soumen. A new look at China's environmental quality: how does environmental sustainability respond to the asymmetric behavior of the competitive industrial sector?. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 1, pg. 16-28, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1080/13504509.2023.2248584>. Accessed on: 20/01/2024.

CARBONELL, Lucila et al. Localization of links between sanitation and the Sustainable Development Goals to inform municipal policy in eThekweni Municipality, South Africa. **World Development Sustainability**, v. 2, p. 100038, 2023. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772655X22000374>. Accessed at: 10/07/2023

CARMINES, E. G.; MCIVER, J. P. Analyzing Models with Unobserved Variables: Analysis of Covariance Structures. GW Bohrnstedt and EF Borgatta. **Social Measurement**, CA: Sage Publications, 1981.

CASIMIRO, Anaice Rosa Barros. Rio Luanda: Análise a uma alternativa de Tratamento e Distribuição de água em Luanda, Angola. 2021. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/139391/2/528183.pdf>. Acesso em 2023.

CASTRO, Rossana Santos de *et al.* **A qualidade da água distribuída e seus prováveis impactos na saúde da população do Distrito Federal**. 2018. Tese de Doutorado.

CHAPMAN, Jonathan. The contribution of infrastructure investment to Britain's urban mortality decline, 1861–1900. **The economic history review**, v. 72, n. 1, p. 233-259, 2019. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ehr.12699>. Accessed at: 10/07/2023.

CHOWDHARY, *et al.* Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. **Environmental Concerns and Sustainable Development**, v. 1: Air, Water and Energy Resources, 2020. Available in: https://www.researchgate.net/publication/334232617_Role_of_Industries_in_Water_Scarcity_and_Its_Adverse_Effects_on_Environment_and_Human_Health. Accessed at: 10/07/2023.

CICILINSKI, Alana Deduck; VIRGENS FILHO, Jorim Sousa. A new water quality index elaborated under the Brazilian legislation perspective. **International Journal of River Basin Management**, v. 20, n. 3, p. 323-334, 2022.

CISSÉ, G. Food-borne and water-borne diseases under climate change in low- and middle-income countries: Further efforts needed for reducing environmental health exposure risks. **Acta Tropica**, 2019. Available in <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.03.012>. Accessed at: 10/07/2023.

DATASUS: Morbidade Hospitalar do SUS-por local de internação Brasil. Disponível em <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sih/cnv/nrbr.def>. Acessado em 10 julho 2024.

DE MELLO, Kaline et al. Impacts of multiscale land use on water quality: assessment, planning and future prospects in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110879, 2020. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720308094>

DELGADO-CEBALLOS, Javier et al. Connecting the Sustainable Development Goals to company-level sustainability and ESG factors: The need for dual materiality. **BRQ Business Research Quarterly**, vol. 1, pg. 2-10, 2023. Available at: journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/23409444221140919. Accessed on: 31/01/2024

DICKIN, Sarah et al. Sustainable sanitation and gaps in global climate policy and finance. **NPJ Clean Water**, v. 3, no. 1, pg. 24th of 2020. Available at:

<https://www.nature.com/articles/s41545-020-0072-8>.

D'INVERNO, Giovanna; CAROSI, Laura.; ROMANO, Giulia. (2020). Environmental sustainability and service quality beyond economic and financial indicators: A performance evaluation of Italian water utilities. **Socio-Economic Planning Sciences**. 75. 100852. 10.1016/j.seps.2020.100852. Accessed at: 19/01/2023.

EICHELBERGER, Laura *et al.* Implication so fin adequate water and sanitation infrastructure for community spread of COVID-19 in remote Alaskan communities. **Science of the Total Environment**, v. 776, p. 145842, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721009098>

FENG, Tong *et al.* Spatial spillover effects of environmental regulations on air pollution: Evidence from urban agglomerations in China. **Journal of Environmental Management**, v. 272, p. 110998, 2020. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720309269>

GALLANDAT, Karin *et al.* Improving water supply infrastructure to reduce acute diarrheal diseases and cholera in Uvira, Democratic Republic of the Congo: results and lessons learned from a pragmatic trial. **PLOS Neglected Tropical Diseases**, v. 18, no. 7, p. e0012265, 2024. available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0012265>
GALLARDO-ALBARRAN, Daniel. Sanitary infrastructures and the decline of mortality in Germany, 1877–1913. **The Economic History Review**, vol. 73, no. 3, pg. 730-757, 2020. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ehr.12942>.

GENOVA, P; WEI, Y. A socio-hydrological model for assessing water resource allocation and water environmental regulations in the Maipo River basin. **Journal of Hydrology**, v. 617, Part C, February 2023, 129159. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169423001014>.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Editora Atlas SA, 2002.

GILES-CORTI, Billie; LOWE, Melanie; ARUNDEL, Jonathan. Achieving the SDGs: Evaluating indicator to be used to benchmark and monitor progress towards creating healthy and sustainable cities. **Health Policy**, v. 124, n. 6, p. 581-590, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2019.03.001>. Accessed on: 04 July 2024.

GIRMAY, Aderajew Mekonnen *et al.* Factors influencing access to basic water, sanitation, and hygiene (WASH) services in schools of Bishoftu Town, Ethiopia: a cross-sectional study. **Discover Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 5, 2023. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-023-00122-0>.

GOMEZ, Mabel; PERDIGUERO, Jordi; SANZ, Alex. Socioeconomic Factors Affecting Water Access in Rural Areas of Low and Middle Income Countries. **Water**, v. 11, no. 2, pg. 202, 2019. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/202>.

GORETZKO, David; SIEMUND, Karik; STERNER, Philipp. Evaluating model fit of measurement models in confirmatory factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 84, n. 1, p. 123-144, 2024. available at: <https://doi.org/10.1177/00131644231163813>. Accessed on: 29 July 2024.

GUEDES, Terezinha Aparecida *et al.* Estatística descritiva. **Projeto de ensino aprender fazendo estatística**, p. 1-49, 2005.

HAIR, J. F. *et al.* Multivariate Data Analysis. 7 ed. **Upper Saddle River: Prentice Hall**, 2010.

HAIR, J. R. *Et al.* **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HALDER, Joshua Nizel; ISLAM, M. Nazrul. Water pollution and its impact on human health. **Journal of the Environment and Humans**, v. 2, no. 1, pg. 36-46, 2015. Available at: <https://bcpslibrarymedia.pbworks.com/w/file/fetch/134977233/Water-Pollution-and-Its-Impact-on-Human-Health.pdf>.

HASAN, M. K.; SHAHRIAR, A.; JIM, K. U. Water pollution in Bangladesh and its impact on public health. **Heliyon**, v. 5, n. 8, p. e02145, 2019. Available at: Accessed at: 10/07/2023.

HELGERTZ, Jonas; ÖNNERFORS, Martin. Public water and sewerage investments and the urban mortality decline in Sweden 1875–1930. **The History of the Family**, v. 24, n. 2, p. 307-338, 2019. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1081602X.2018.1558411>. Accessed at: 10/07/2023.

HOOPER, D.; COUGHLAN, J.; MULLEN, M. R. Structural equation modelling: guidelines for determining model fit. **Electronic J Business Res Methods**, v. 6, n. 1, p. 53-60. 2008.

HOSSEINPOURTEHRANI, Mina *et al.* Preconditions, processes and structures: Interorganizational collaboration in the provision of post-disaster water, sanitation and hygiene (WASH) services. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 80, p. 103177, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221242092200396X>.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104657>. Accessed on January 20, 2024

HU, L.; BENTLER, P. M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural equation modeling: a multidisciplinary journal**, v. 6, n. 1, p. 1-55, 1999.

HUDA, SSM Sadrul. Increasing green footprints: indications of transformations in the socio-economic spaces of Bangladesh. **Engineering Reports**, pg. e12775, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1002/eng2.12775>. Accessed on: 20/01/2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/>. Acessado em 10 julho 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Painel de Indicadores 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/indicadores.html>. Acessado em 10 julho 2024.

IMMURANA, Mustapha *et al.* Access to basic drinking water and sanitation in Africa: Does financial inclusion matter?. **Cogent Social Sciences**, v. 8, n. 1, p. 2057057, 2022. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311886.2022.2057057>.

ISSA, Carina Graminha. Testes ecotoxicológicos para avaliação do potencial impacto ambiental em corpos receptores por efluente de Estação de Tratamento de Esgoto. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-22052019-150827/en.php> acessado em 10/10/2022.

JADEJA, Niti B. *et al.* Water pollution in India – currents cenario. **Water Security**, v. 16, p. 100119, 2022.

JIMÉNEZ, Alejandro *et al.* The enabling environment for participation in water and sanitation: A conceptual framework. **Water**, v. 11, n. 2, p. 308, 2019. Available in: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/308>. Accessed at: 10/07/2023.

JOHNSON, Justin Andrew *et al.* The mesoscale as a frontier in interdisciplinary sustainability modeling from the local to the global scale. **Environmental Research Letters**, v. 18, no. 2, p. 025007, 2023. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acb503/meta>. Accessed on: 31/01/2021

JUNG, M. S.; *et al.* Water quality and surroundings for systemic management of springs in rural areas. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 15, n. 6, p. e3923, 2024. DOI:10.7769/gesec.v15i6.3923. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/3923>. Acesso em: 5 jul. 2024.

KEISER, David A.; SHAPIRO, Joseph S. US water pollution regulation over the past half century: burning waters to crystal springs?. **Journal of Economic Perspectives**, v. 33, n. 4, p. 51-75, 2019. Available at: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.33.4.51>. Accessed at: 10/07/2023.

KHAN, Syed Abdul Rehman *et al.* Determinants of economic growth than environmental sustainability in South Asian Association for Regional Cooperation: evidence from panel ARDL. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 45675-45687, 2020. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-10410-1>. Accessed at: 19/01/2024

KIM, S.; CHUNG, S. Causal impact analysis of enhanced phosphorus effluent standard on river water quality. **Journal of Environmental Management**, v. 320, p. 115931, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115931>. Accessed at: 10/07/2023.

LIU, Conghu *et al.* Decoupling of waste water eco-environmental damage and China's economic development. *Science of The Total Environment*, v. 789, p. 147980, 2021.

LIU, Haiying *et al.* The path to sustainable environment: Do environmental taxes and governance matter?. **Sustainable Development**, 2023.

MENSAH, Justice *et al.* Causes and effects of weaken for cement of environmental sanitation laws in Ghana. **Journal of Human Behavior in the Social Environment**, v. 33, n. 5, p. 663-684, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1080/10911359.2022.2080146>.

Mineral resource extraction and resource sustainability: Policy initiatives for agriculture, economy, energy, and the environment, *Resources Policy*, Volume 89, 2024, 104657. available at: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104657>. Accessed on January 20, 2024

NIYOZMETOV, M. *et al.* DISEASES CAUSED BY THE CONSUMPTION OF UNPURIFIED DRINKING WATER. **Science and innovation**, v. 3, no. D4, p. 407-414, 2024. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diseases-caused-by-consumption-of-unpurified-drinking-water>.

ODHA, Gene Aila; MBATARU, Patrick. Environmental policy implementation effects on river water pollution control and prevention in Kenya: A case of Ngong River, Nairobi City County. **International Academic Journal of Arts and Humanities**, v. 1, n. 4, p. 116-130, 2024. Available at: https://www.iajournals.org/articles/iajah_v1_i4_116_130.pdf

O'GORMAN, Melanie. Mental and physical health impacts of water/sanitation infrastructure in First Nations communities in Canada: An analysis of the Regional Health Survey. **World Development**, v. 145, p. 105517, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X21001297>.

OLIVEIRA, F. C. *et al.* Viroses entéricas: principais patologias de veiculação hídrica e suas manifestações clínicas. **Revista Conhecimento Online**, [S. l.], v. 1, p. 191–217, 2020. DOI: 10.25112/rco.v1i0.1598. Disponível em: <https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistaconhecimentoonline/article/view/1598>. Acesso em: 4 jul. 2024.

ONU. Nações Unidas Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/159303-36-bilh%C3%B5es-de-pessoas-vivem-sem-saneamento-seguro>. Acessado em: 19/06/2023.

ONU. Nações Unidas Brasil. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acessado em 01/07/2024.

PILATI, Ronaldo; LAROS, Jacob Arie. Modelos de equações estruturais em psicologia: conceitos e aplicações. **Psicologia: teoria e pesquisa**, v. 23, p. 205-216, 2007. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-37722007000200011>. Acessado em 30 julho 2024.

RAIMI, Morufu Olalekan *et al.* The Sources of Water Supply, Sanitation Facilities and Hygiene Practices in an Island Community: Amassoma, Bayelsa State, Nigeria. Social Science Research Network (20 February 2019), 2019. **Resources Policy**, Volume 89, 2024, 104657.

RODRIGUES, Karla Cristina Tyskowski Teodoro *et al.* Estrutura do saneamento básico no Brasil: receita, dispêndio de gastos e atenção básica à saúde. 2020. <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5240>. acessado em 2023.

RODRÍGUEZ MIRANDA, J. P., GARCÍA-UBAQUE, C. A., GARCÍA-UBAQUE, J. C. Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico em Colombia. **Revista de salud pública** 2016. Available in <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n5.54869>. Accessed at: 10/07/2023.

ROMMAN, Zeinab Abu; AL KUISI, Mustafa. The impact water legislation on ground water sustainability in an arid region: Spatial statistical approach. **Environmental Development**, v. 46, p. 100852, 2023. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211464523000520>. Accessed at: 10/07/2023.

SAHOO, S.; GOSWAMI, S. Theoretical Framework for Assessing the Economic and Environmental Impact of Water Pollution: A Detailed Study on Sustainable Development of

India. **Journal of Future Sustainability**, vol. 4, no. 1, p. 23-34, 2024. Available at: <http://dx.doi.org/10.5267/j.jfs.2024.1.003>

SAHOO, S.; GOSWAMI, S. Theoretical framework for assessing the economic and environmental impact of water pollution: A detailed study on sustainable development of India. **Journal of Future Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 23-34, 2024.

SAHOO, S.; GOSWAMI, S. Theoretical framework for assessing the economic and environmental impact of water pollution: A detailed study on sustainable development in India. **Future Sustainability Magazine**, v. 1, pg. 23-34, 2024. Available at: <http://dx.doi.org/10.5267/j.jfs.2024.1.003>. Accessed on: 20 /01/2024

SAKAMOTO, Maiko et al. Water pollution and the textile industry in Bangladesh: flawed corporate practice sores strictive opportunities?. **Sustainability**, v. 11, n. 7, p. 1951, 2019. Available in: <https://doi.org/10.3390/su11071951>. Accessed at: 10/07/2023.

SAMPAIO, PRP; Sampaio. The challenges of regulating water and sanitation tariffs under a model of shared authority federalism three levels: the case of Brazil. **Public Services Policy**, v. 64, p. 101049, 2020. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720319562>.

SCHRECONGOST, Alyse et al. Citywide inclusive sanitation: a public service approach for reaching the urban sanitation SDGs. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 19, 2020. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.00019/full>.

SHARMA, Krati; RAJAN, Shijin; NAYAK, Soumya Kanta. Water pollution: primary sources and associated risks to human health with special emphasis on rural areas. In: **Water Resources Management for Rural Development**. Elsevier, 2024. p. 3-14. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18778-0.00014-3>

SINGH, Bikramjit; CHAKRABORTY, Ayon; SEHGAL, Rippin. A systematic review of industrial wastewater management: Assessing challenges and facilitators. **Journal of Environmental Management**, vol. 348, p. 119230, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>. Accessed on: 04 July 2024

SINGH, Vir. Water pollution. In: Text book of Environment and Ecology. Singapore: **Springer Nature Singapore**, 2024. p. 253-266. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-8846-4_17

SOARES, Fernanda Chaves. **Tratamento de água de esgotos para fins não potáveis pelo uso de raízes**. Associação de Ensino Superior de Nova Iguaçu, Universidade Iguaçu–Unig dirigentes-campus Nova Iguaçu, p. 52.

SOJOBI, A. O., ZAYED, T. (2022). Impact of sewer overflow on public health: A comprehensive scient metric analysis and systematic review. **Environmental research**, **203**, **111609**. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111609>.

SONG, Jian; CHEN, Yang; LUAN, Fushu. Air pollution, water pollution, and robots: Is technology the panacea. **Journal of Environmental Management**, v. 330, p. 117170, 2023.

SOUZA, F. R. da S. Educação Ambiental e sustentabilidade: uma intervenção emergente na escola. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 115–

121, 2020. DOI: 10.34024/revbea.2020.v15.9616. Disponível em:
<https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/9616>. Acesso em: 20 jan. 2024.

STEIGER, J. H. Understanding the limitations of global fit assessment in structural equation modeling. **Personality and individual differences**, v. 42, n. 5, p. 893-898, 2007.

TOKATLI, Cem; VAROL, Memet. Impact of the COVID-19 lockdown period on surface water quality in the Meriç-Ergene River Basin, north west Turkey. **Environmental Research**, v. 197, p. 111051, 2021. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935121003455>.

TORTAJADA, Cecilia. Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. **NPJ Clean Water**, v. 3, no. 1, pg. 22 of 2020. Available at:
<https://www.nature.com/articles/S41545-020-0069-3>.

TOYAMA, Daniele; SANTINO, Marcela Bianchessi da Cunha; FUSHITA, Angela Terumi. Qualidade da água e doenças de veiculação hídrica: o caso dos municípios de barra bonita e Igarauçu do Tietê-SP. **V SIGA Ciência (Simpósio Científico de Gestão Ambiental)**, v. 1.

TUMWEBAZE, Innocent K. et al. Access to and factors influencing drinking water and sanitation service levels in informal settlements: Evidence from Kampala, Uganda. **Habitat International**, v. 136, p. 102829, 2023. Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397523000899>. Accessed at: 10/07/2023.

TZANAKAKIS, Vasileios A.; PARANYCHIANAKIS, Nikolaos V.; ANGELAKIS, Andreas N. Water supply and water scarcity. **Water**, v. 12, no. 9, p. 2347, 2020. Available at:
<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2347>. Accessed on: 31/01/2023

VAN VLIET, Michelle TH *et al.* Global water scarcity, including surface water quality and the expansion of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, v. 16, no. 2, p. 024020, 2021. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbfc3/meta>. Accessed at: 19/01/2024

VILA NOVA, *et al.*, Doenças de Veiculação Hídrica Associadas à Degradação dos Recursos Hídricos, município de Caruaru -pe water-related diseases associated with water resource degradation, Caruaru-pe caminhos de geografia -revista online 2019. Disponível em: 10.14393/rcg207145545.acessado em 05 julho 2024

VITOR, GA.; *et al.* Título saúde e saneamento no Brasil: uma revisão narrativa sobre a associação das condições básicas de saneamento com doenças de veiculação hídrica. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, n. 15, p. e521101522913, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i15.22913. Disponível em:
<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22913>. Acesso em: 5 jul. 2024.

WANG, Huanhuan; XIONG, Jiabin, 2022. "Governance over Water Pollution: Evidence from China's New River Regulatory System," **Economic Modeling**, vol. 113(C). Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264999322001249>.

WANG, Shuang, YANG Lihong, Mineral resource extraction and resource sustainability: Policy initiatives for agriculture, economy, energy, and the environment,

WOLF, J. *et al.* Effectiveness of interventions to improve drinking water, sanitation, and handwashing with soap on risk of diarrheal disease in children in low-income and middle-income settings: a systematic review and meta-analysis 2022. **The Lancet** (London, England), 400(10345), 48–59. Available in: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)00937-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)00937-0). Accessed at: 10/07/2023

XIANG, Xiaojun *et al.* Management of urban water resources for sustainable environmental planning using artificial intelligence techniques. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 86, p. 106515, 2021. available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925520307939>. Accessed on: 31/01/2024

YANG Jianxun, *et al.* Economic risks hidden in local water pollution and global markets: A retrospective analysis (1995-2010) and future perspectives on Sustainable Development Goal 6, **Water Research**, 2024, available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121216>.

YUROVA, Yuliya; SHIROKOVA, Vera. Geocological assessment of anthropogenic impacts on the Osetr River Basin. **Geosciences**, v. 10, n. 4, p. 121, 2020. Available in: <https://doi.org/10.3390/geosciences10040121>. Accessed at: 10/07/2023

ZAMORA-LEDEZMA, Camilo *et al.* Water pollution by heavy metals: a new look at hazards, new and conventional remediation methods. **Environmental Technology and Innovation**, v. 22, p. 101504, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186421001528>.

ZHAO, Xin *et al.* Exploring the role of environmental regulation in energy security: Contextual outcomes for sustainable development in Chinese provinces. **Gondwana Research**, v. 113-124, 2023.

ZILIOTTO, Marina; CHIES, José Artur Bogo; ELLWANGER, Joel Henrique. Saneamento Ambiental na Cidade de Porto Alegre, Brasil: Um Passo Básico para o Desenvolvimento.

6 Considerações Finais da Dissertação

Esta dissertação analisou a relação entre crescimento econômico, poluição dos rios, qualidade da água, infraestrutura de saneamento básico e legislação ambiental no Brasil, através de três estudos empíricos. As investigações proporcionaram uma visão integrada sobre os complexos desafios enfrentados na gestão dos recursos hídricos e suas implicações para a saúde pública e o desenvolvimento sustentável.

O primeiro artigo aborda a relação complexa entre crescimento econômico, poluição dos rios e saneamento básico no Brasil, utilizando a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) como um indicador da poluição hídrica e o Produto Interno Bruto (PIB) per capita como um marcador de crescimento econômico. A pesquisa foi realizada em 950 municípios brasileiros durante o ano de 2020, revelando disparidades regionais significativas e estágios distintos de desenvolvimento que exigem intervenções ambientais específicas.

Além disso, os resultados do estudo mostraram que, nas regiões mais desenvolvidas, há uma concentração de atividades industriais e urbanas que contribuem para níveis mais altos de poluição dos rios. Isso se deve à maior densidade populacional e à intensificação das atividades econômicas que geram poluentes industriais e domésticos. Por outro lado, as áreas menos desenvolvidas enfrentam grandes desafios na melhoria da infraestrutura de saneamento básico, resultando em condições de poluição hídrica precárias. A falta de infraestrutura adequada nessas áreas exacerba a contaminação dos corpos d'água devido à ausência de sistemas de tratamento de esgoto e gestão de resíduos.

Além disso, o estudo identificou pontos de inflexão na relação entre o PIB per capita e a poluição dos rios, sugerindo que em certos estágios de crescimento econômico são necessárias intervenções específicas para proteger os recursos hídricos. Este fenômeno, conhecido como Hipótese da Curva Ambiental de Kuznets, indica que a degradação ambiental inicialmente aumenta com o crescimento da economia, mas começa a diminuir após atingir um certo nível de renda per capita, quando a sociedade se torna mais consciente dos problemas ambientais e pode investir em tecnologias mais limpas e infraestrutura de saneamento.

Esses achados destacam a necessidade urgente de investimentos em infraestrutura de saneamento básico, especialmente nas regiões menos desenvolvidas, e a importância da implementação de estratégias de gestão ambiental que equilibrem o crescimento econômico com a conservação dos recursos hídricos. As conclusões deste estudo fornecem subsídios

valiosos para a formulação de políticas públicas voltadas para a gestão sustentável dos recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável no Brasil.

O segundo artigo investiga a relação entre a DBO e variáveis econômicas e populacionais ao longo do período de 2008 a 2020 em 73 municípios brasileiros. Utilizando técnicas econométricas avançadas, como o Teste de Cointegração de Pedroni e o teste de causalidade de Granger, o estudo busca entender as dinâmicas de longo prazo e as relações de causa e efeito entre a qualidade da água e os fatores econômicos e demográficos. Os resultados do teste de cointegração indicam uma forte relação de longo prazo entre a DBO e o PIB agropecuário per capita, o PIB industrial per capita e a população. Isso sugere que tanto a atividade agrícola quanto a industrial, além do crescimento populacional, têm um impacto significativo e duradouro na qualidade da água dos rios.

Ademais as atividades agropecuárias e industriais são fontes importantes de poluição hídrica devido ao uso de fertilizantes, pesticidas, despejo de efluentes industriais e outras práticas que contribuem para a contaminação dos recursos hídricos. Além disso, os resultados do teste de causalidade de Granger revelam uma relação bidirecional entre a primeira diferença da DBO e as primeiras diferenças do PIB agropecuário per capita e da população, com impactos significativos em médio e longo prazo.

Dessa forma, isso implica que não apenas as atividades econômicas afetam a qualidade da água, mas também a degradação hídrica pode influenciar a atividade econômica, por exemplo, ao afetar a disponibilidade de água de boa qualidade para a agricultura e a indústria, bem como a saúde da população. Esses achados destacam a importância de considerar os efeitos cumulativos e interligados da produção industrial e agrícola, além do crescimento populacional, na qualidade da água dos rios. As conclusões sugerem a necessidade de políticas públicas e práticas que promovam um desenvolvimento econômico sustentável e o gerenciamento adequado dos recursos hídricos para garantir a preservação dos ecossistemas aquáticos e a saúde pública.

O terceiro artigo investiga a relação entre legislação ambiental municipal, infraestrutura de saneamento básico, poluição dos rios e doenças de veiculação hídrica em 1.048 municípios brasileiros durante 2020. Utilizando Modelagem de Equações Estruturais (SEM), o estudo examina como a legislação ambiental influencia a qualidade da água dos rios, que por sua vez afeta diretamente a incidência de doenças relacionadas à água. Os resultados deste estudo destacam que melhorias na infraestrutura de saneamento básico são fundamentais para reduzir a incidência de doenças de veiculação hídrica e estão negativamente associadas à poluição da água dos rios. Isso se deve ao fato de que uma infraestrutura sanitária adequada permite o

tratamento eficiente dos resíduos e esgotos, evitando a contaminação dos corpos d'água com patógenos e outros poluentes.

Além disso, a qualidade da água dos rios é fortemente influenciada por uma legislação ambiental rigorosa, que estabelece padrões de qualidade, monitoramento e controle das fontes de poluição. A poluição da água dos rios intercede a relação entre a infraestrutura de saneamento e as doenças relacionadas à água, o que significa que a melhoria das condições de saneamento pode reduzir significativamente a poluição hídrica e, conseqüentemente, a ocorrência de doenças. Estes achados sublinham a importância de políticas integradas que promovam melhorias na infraestrutura sanitária e reforcem a legislação ambiental para mitigar os riscos à saúde pública associados à poluição hídrica.

Em resumo, a dissertação revelou a complexidade e interdependência dos fatores econômicos, ambientais e sociais que afetam a qualidade da água dos rios no Brasil. Os achados dos três artigos apontam para a necessidade de estratégias integradas a políticas públicas como monitoramento e fiscalização das águas residuais que promovam a melhoria da infraestrutura de saneamento, o fortalecimento da legislação ambiental e o desenvolvimento sustentável. A implementação dessas políticas é crucial para mitigar os impactos negativos do crescimento econômico sobre os recursos hídricos e garantir a saúde pública e o bem-estar das gerações presentes e futuras.

Referências Bibliográficas da Dissertação

- ACAR, Yasin; GÜRDAL, Temel; EKERYILMAZ, Sebnem. Environmental Kuznets Curve for CO emissions: An analysis for developing countries, the Middle East, OECD and OPEC. **Environmental and Socioeconomic Studies**, vol. 4, p. 48-58, 2018.
- ACORDADO, A, *et al.* River water pollution status and water policy landscape in Ethiopia: Raising awareness for better implementation in developing countries. **Environmental Management** 58, 694–706 (2016). Available at: <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0734-y>.
- ADELODUN, Bashir *et al.* Assessing socio economic Inequality based on the use of virus-contaminated water in developing countries: a review. **Environmental Research**, v. 192, p. 110309, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120312068>.
- AHMED, Zahoor *et al.* Economic growth, renewable energy consumption and ecological footprint: Exploring the role of environmental regulation and democracy in sustainable development. **Sustainable Development**, vol. 30, no. 4, p. 595-605, 2022. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sd.2251>
- AKHTAR, Naseem *et al.* Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. **Water**, v. 13, no. 19, p. 2660, 2021. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/19/2660>.
- ALKHARS, Mohammed A. *et al.* A literature review of the Environmental Kuznets Curve in the GCC for 2010–2020. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 14, p. 100181, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972722000137>
- ALVES, Ana Vanuzia. Saneamento básico como fator relacionado às doenças de veiculação hídrica no município de São Cristóvão-SE. 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/17484>.
- ANA- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Política Nacional de Recursos Hídricos 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>.
- AWAN, Abdul Ghafoor *et al.* Relationship between environment and sustainable economic development: A theoretical approach to environmental problems. **International Journal of Asian Social Science**, v. 3, n. 3, p. 741-761, 2013.
- BAYER, Natássia Molina; URANGA, Paulo Ricardo Ricco; FOCHEZATTO, Adelar. The environmental Kuznets curve in the production of household solid waste in Brazilian municipalities, 2011-2015. **Economy and Society**, v. 31, p. 129-142, 2022. Available at: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/mnb36bRxRnmh8zRxFmC7ThK/?lang=pt>.
- BORETTI, Alberto; ROSA, Lourenço. Reavaliando as projeções do relatório mundial sobre o desenvolvimento da água. **NPJ Água Limpa**, v. 1, pág. 15, 2019.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de Julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referências sobre o serviço de

saneamento. **Secretaria-Geral Sub chefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, 15 de julho de 2020; 199º da Independência e 132º da República.

BRIANT, Nicolas *et al.* Lead missing from the Loire River estuary: an example of successful environmental regulation. **Environment pollution**, v 340. 122860. January 1, 2024. 122860. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123018626#sec5>. Accessed on: 11/22/2024.

BRITO, D. A água no Brasil: da abundância à escassez. **Agência Brasil**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-10/agua-no-brasil-da-abundancia-escassez>>. Acesso em: 18 Nov. 2023.

CASTRO, Raysa Moraes et al. Spatio temporal analysis of water quality indicators in a river basin in the Brazilian Cerrado. **Water Supply**, v. 23, no. 3, p. 1161-1176, 2023. Available at: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.061>. Accessed on: 22/11/2023.

CHEN, Zhao *et al.* The consequences of spatially differentiated regulation of water pollution in China. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 88, p. 468-485, 2018. available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069616302741>.

COSTA, David de Andrade *et al.* Do monitoramento e modelagem à gestão: como melhorar a qualidade da água nos rios brasileiros? Um estudo de caso: Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha. **Água**, v. 13, n. 2, pág. 176, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/2/176>.

DASGUPTA, Susmita; LAPLANTE, Benoit; MAMINGI, Nlandu. Pollution and capital markets in developing countries. **Journal of Environmental Economic sand Management**, v. 3, p. 310-335, 2001. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069600911616>.

DE TROYER, Niels et al. Water quality assessment of streams and wetlands in a rapidly growing East African city. **Water**, v. 8, no. 4, p. 123, 2016. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/8/4/123>.

DINDA, S. Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. **Ecological Economy**

EVERETT, T. *et al.* Economic growth and the environment. **MPRA-Munich Personal RePEc Archive**, 2010. Available at: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/23585/>.

FALCÃO, MM da S.; ARCOS, AN; COSTA, FS da. Avaliação da qualidade ambiental dos recursos hídricos ao longo do Rio Preto da Eva, no Amazonas, Brasil. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 15, pág. e107101522560, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i15.22560. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22560>. Acesso em: 18 nov. 2023.

FERREIRA, Diogo Cunha et al. Investimento em água potável e infraestrutura de saneamento e seu impacto na disseminação de doenças transmitidas pela água: o caso brasileiro. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 779, p. 146279, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721013474>.

FORTES, Ana Carolina Chaves; BARROCAS, Paulo Rubens Guimarães; KLIGERMAN, Débora Cynamon. A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do

acesso. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 20-34, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sdeb/a/MScwKFMGMHc9j5yv49ZwhHM/>. Acessado em: 08/10/2023.

GADELHA, J. E. F. D. S.; *et al.* CONSEQUÊNCIAS DA EUTROFIZAÇÃO EM CORPOS HÍDRICOS. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, [S. l.], v. 3, n. 1, 2023. Disponível em: <https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/908>. Acesso em: 18 nov. 2023.

GENOVA, Paulina, WEI, Yongping (2023). A socio-hydrological model to evaluate water resource allocation and water environmental regulations in the Maipo River basin. **Journal of Hydrology** 617 (Part C) 129159-114. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129159>.

GUIDOLINI, Janaína Ferreira et al. Water sustainability in the Rio Grande River Basin, Brazil: An approach based on the sustainability barometer. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, vol. 11, p. 2582, 2018. Available at: <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/11/2582>.

HALDER, Joshua Nizel; ISLAM, M. Nazrul. Water pollution and its impact on human health. **Environmental and human magazine**, v. 2, no. 1, pg. 36-46, 2015. Available at: DOI: 10.15764/EH.2015.01005.

HASEENA, Mehtab et al. Water pollution and human health. **Environmental Risk Assessment and Remediation**, v. 1, n. 3, 2017.

INABO, Obaka Abel; ARSHED, Noman. Impact of health, water and sanitation as key drivers of economic progress in Nigeria. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 2, p. 235-242, 2019. Available at: <https://journals.co.za/doi/abs/10.1080/20421338.2018.1551832>

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. Histórico da Ação Estatal em Recursos Hídricos no Brasil. Capítulo 1. Rio de Janeiro: Edição 1, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/4/Cap.1_Historico_da_acao_estatal.pdf. Acessado em 18/11/2023

JABEEN, Azra; HUANG, Xisheng; AAMIR, Muhammad. The challenges of water pollution, the threat to public health, the flaws in water laws and policies in Pakistan. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 7, no. 17, p. 1451-1460, 2015. DOI: 10.4236/jwarp.2015.717125.

LATIF, Nazia *et al.* Unraveling the Nexus: The Impact of Economic Globalization on the Environment in Asian Economies. **Globalization Research**. V 7, 00169. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2023.100169>. Accessed on: 11/22/2023.

LIN, Li; YANG, Haoran; Xu, Xiao cang. Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: a review. **Frontiers in environmental science**, v. 10, p. 880246, 2022.

LUO, Pingping *et al.* Assessing water quality trends in Jakarta: a rapidly growing Asian megacity. **PloSone**, v. 14, no. 7, p. e0219009, 2019. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0219009>.

MEHMOOD, Saima *et al.* The Role of Green Industrial Transformation in Mitigating Carbon Emissions: Exploring the Channels of Technological Innovation and Environmental Regulation. **Energy and the Built Environment**. V 5, Ed 3. P 464-479. 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123323000065#sec0010>. Accessed on: 11/22/2-23.

MELLO, Kaline *et al.* Impactos multiescalares do uso do solo na qualidade da água: avaliação, planejamento e perspectivas futuras no Brasil. **Revista de Gestão Ambiental**, v. 270, pág. 110879, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720308094>.

MEYBECK, Michel. River inequality in the Anthropocene: Propositions for global spatial and temporal analysis, illustrated by the River Seine. **Aquatic Sciences**, v. 64, p. 376-393, 2002. available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/PL00012593>.

MISHRA, ArunPratap *et al.* Assessment of water quality index using Analytic Hier Archy Process (AHP) and GIS: a case study of a struggling Asan River. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 104, n. 5, p. 1159-1171, 2024.

MORA, Abrahan. *et al.* A review of the current environmental situation and implications for human health of one of the most polluted rivers in Mexico: the Atoyac River, Puebla. **Science of the Total Environment**. V 782, 146788, August 15, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721018568>.

MORIN-CRINI, Nadia *et al.* Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 4, p. 2311-2338, 2022. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-022-01447-4>.

OÑATE-VALDIVIESO, Fernando *et al.* Application of the Ostrom Institutional Analysis and Development Framework to River Water Conservation in Southern Ecuador. Case Study – The Zamora River. **Water**, v. 13, no. 24, p. 3536, 2021.

ORUBU, Christopher O.; OMOTOR, Douglasson G. Environmental quality and economic growth: Searching environmental Kuznets curves for air and water pollutants in Africa. **Energy Policy**, v. 7, p. 4178-4188, 2011. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421511003089>.

PAN, Dan *et al.* Do environmental regulations on livestock farming reduce water pollution in China?. **Ecological Economy**, v. 204, p. 107637, 2023. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800922002981>.

PAUDEL, Sushila *et al.* Nexus between the water security framework and public health: a comprehensive scientific review. **Water**, v. 13, no. 10, p. 1365, 2021. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/10/1365>.

RAMOS, M. A. G. **Avaliação da qualidade da água dos rios Jaguarí e Atibaia por meio do índice de qualidade da água - IQA e ensaios toxicológicos**. 2015. Disponível em: <https://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/25-01-2016/000857425.pdf>.

SANDOVAL HERAZO, Luis Carlos *et al.* Impact of the citrus industry on water quality in the Filo bobos River in Veracruz, Mexico. **Sustainability**, vol. 16, no. 4, p. 1536, 2024.

SARKER, Bijoyee *et al.* Surface and ground water pollution: Causes and effects of urbanization and industrialization in South Asia. **Scientific Review**, vol. 7, no. 3, p. 32-41, 2021. available at: <https://arpgweb.com/journal/10/archive/07-2021/3/7>.

SCHAFFNER, Monica; BADER, Hans-Peter; SCHEIDEGGER, Ruth. Modeling the contribution of point and diffuse sources to Thachin River water pollution. **Science of the Total Environment**, v. 407, no. 17, p. 4902-4915, 2009. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969709004628>.

SILVEIRA, Nara *et al.* Temporal Analysis of Water Quality in the Nilo Coelho Reservoir, Terra Nova, Pernambuco, Brazil. **Water**, v. 15, no. 16, p. 2899, 2023. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/16/2899>. Accessed on: 22/11/2023.

STETS, Edward G. *et al.* Landscape factors of dynamic change in water quality in US rivers. **Environmental Science and Technology**, v. 7, p. 4336-4343, 2020. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.9b05344>.

SU, Shiyue; QAMRUZZAMAN, Doctor; KARIM, Salma. Mapping a sustainable future: the impact of economic policy, environmental taxation, innovation and natural resources on clean energy consumption. **Sustainability**, vol. 15, no. 18, p. 13585, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151813585>. Accessed on: 9 July 2024.

TRIPATHI, Mansi; SINGAL, Sunil Kumar. Allocation of weights using factor analysis to develop a new water quality index. **Ecotoxicology and environmental safety**, vol. 183, p. 109510, 2019.

VAL, Adalberto Luís *et al.* Qualidade da água no Brasil. **Qualidade da Água nas Américas**, v. 103, 2019.

VESKOVIĆ, Jelena *et al.* Entropy-weighted water quality index, hydrogeochemistry and Monte Carlo simulation of ground water source-specific health risks in the Morava river plain (Serbia). **Marine Pollution Bulletin**, vol. 201, p. 116277, 2024.

WANG, Xiu-Heng *et al.* Environmental implications of increasingly stringent sewage discharge standards at municipal wastewater treatment plants: case study from a cold area of China. **Cleaner Production Magazine**, v. 94, p. 278-283, 2015. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615001110>.

WANG, Yan-Bo *et al.* Effects of land use patterns on seasonal water quality at multiple spatial scales in the Jialing River, Chongqing, China. **CATENA**. V 234. 107646. January 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816223007373#s0080>. Accessed on: 11/22/2023.

WENZHONG, Tang, *et al.* Twenty years of water pollution control in China: experiences and challenges. **Chemosphere**, v. 295, p. 133875, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565352200368X>.

WOLKMER, Maria de Fátima S.; PIMMEL, Nicole Freiburger. Política Nacional de Recursos Hídricos: governança da água e cidadania ambiental. Sequência (Florianópolis), p. 165-198, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-7055.2013v34n67p165>. Acessado em 16/11/2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION *et al.* Water and sanitation. 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Sanitation. Geneva: WHO; 2021. Available at: Sanitation (who.int).

XIAOXUE *et al.* Spatio temporal analysis of water quality using multivariate statistical techniques and the water quality identification index for the Qinhuai River Basin, East China. **Water**, v. 12, no. 10, p. 2764, 2020. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2764>.

YANG, Shiwei *et al.* Influence of socioeconomic development on river water quality: a case study of two river basins in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 38, p. 53857-53871, 2021.

ZAHOOR, Iqra; MUSHTAQ, Ayesha. Water pollution from agricultural activities: A critical global review. **Int. J. Chem. Biochem. Sci**, vol. 23, no. 1, p. 164-176, 2023.

ZHANG, N. *et al.* An inaccurate two-steepwater quality management model to support sustainable development in a rural system. **Environmental Informatics Magazine**, v. 1, 2014.