

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JULIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS

CÂMPUS DE ARARAQUARA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E
BIOPROCESSOS**

MESTRADO PROFISSIONAL

ÉMERSON RIBEIRO MOREIRA

**ANÁLISE DA BIOSSUSTENTABILIDADE EM RECURSOS HÍDRICOS PARA
MITIGAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS PELO LANÇAMENTO DE
EFLUENTES DOMÉSTICOS EM CORPOS HÍDRICOS NA REGIÃO DE
ARARAQUARA/SP**

ARARAQUARA - SP

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA

ÉMERSON RIBEIRO MOREIRA

ANÁLISE DA BIOSSUSTENTABILIDADE EM RECURSOS HÍDRICOS
PARA MITIGAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS PELO
LANÇAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS EM CORPOS
HÍDRICOS NA REGIÃO DE ARARAQUARA/SP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Guilherme Peixoto

ARARAQUARA - SP

2025

M838a Moreira, Émerson Ribeiro.
Análise da biossustentabilidade em recursos hídricos para
mitigação de impactos ambientais pelo lançamento de efluentes
domésticos em corpos hídricos na região de Araraquara/SP / Émerson
Ribeiro Moreira. – Araraquara, 2025.
77 f. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual
Paulista. "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Ciências
Farmacêuticas. Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Biomateriais e Bioprocessos. Área de Biomateriais, Bioprocessos,
Bioprodutos.

Orientador: Guilherme Peixoto.

1. Biossustentabilidade. 2. Efluentes domésticos. 3. Poluição hídrica.
4. Técnicas de tratamento. 5. Recuperação de água. I. Peixoto,
Guilherme, orient. II. Título.

Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP - Campus de Araraquara
Kazumi Tomoyose - CRB 8/10904

CAPES: 33004030170P0
Esta ficha não pode ser modificada



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Araraquara



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise da biossutentabilidade em recursos hídricos para mitigação de impactos ambientais pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos na região de Araraquara/SP

AUTOR: ÉMERSON RIBEIRO MOREIRA

ORIENTADOR: GUILHERME PEIXOTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos, área: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GUILHERME PEIXOTO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Farmacêuticas do
Campus de Araraquara da Unesp

Prof. Dr. ARIIVALDO JOSÉ DA SILVA (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Prof. Dr. ALVARO DE BAPTISTA NETO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Farmacêuticas do
Campus de Araraquara da Unesp

Araraquara, 10 de fevereiro de 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para o sucesso deste trabalho. Sem o apoio de vocês, esta jornada não teria sido possível.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Peixoto, pela orientação, paciência e valiosos insights ao longo deste processo. Sua dedicação e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos e colegas, que compartilharam conhecimento, ideias e momentos de descontração, meu muito obrigado. Suas contribuições enriqueceram minha experiência e me motivaram a seguir em frente.

Por fim, aos meus familiares, àqueles que acreditaram em mim e me incentivaram a perseguir meus objetivos acadêmicos, expresse minha profunda gratidão. Seus sacrifícios e amor foram a base para esta conquista.

Que esta dissertação seja uma pequena forma de retribuir a todos que estiveram ao meu lado. A todos vocês, meu sincero agradecimento!

RESUMO

A crescente urbanização em Araraquara/SP tem intensificado a problemática da poluição hídrica devido ao lançamento inadequado de efluentes domésticos em corpos hídricos. Com isso, este estudo analisa a aplicação de biossustentabilidade como estratégia para mitigar os impactos ambientais decorrentes desse cenário. Para isso adotou-se uma metodologia que incluiu revisão bibliográfica, diagnóstico das condições locais e avaliação de soluções biossustentáveis. As melhores soluções apontadas por este estudo são polímeros naturais, para floculação de partículas e remoção de sólidos; lodos de fita e escamas, que melhoram a eficiência de remoção de contaminantes; biochar, utilizado para adsorção de compostos tóxicos; lodos ativados, altamente eficientes na remoção de matéria orgânica; reatores de leito móvel, que aumentam a eficiência biológica no tratamento de poluentes; algicultura, para remoção de nutrientes e geração de biomassa; bioeletroquímica, que integra tratamento de efluentes e geração de energia; e microalgas para fotossíntese, para conversão de poluentes em compostos menos nocivos. Sendo assim, este estudo indica que essas técnicas podem reduzir significativamente a carga de poluentes, melhorando a qualidade da água e promovendo a saúde dos ecossistemas. Por fim, o estudo também destaca a importância de políticas públicas integradas e do engajamento comunitário para assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos. A pesquisa conclui que a biossustentabilidade é uma abordagem viável e necessária para a gestão ambiental em áreas urbanas.

Palavras-chave: biossustentabilidade; efluentes domésticos; poluição hídrica; técnicas de tratamento; recuperação de água.

ABSTRACT

The growing urbanization in Araraquara/SP has intensified water pollution issues due to the improper discharge of domestic effluents into water bodies. This study analyzes the application of biosustainability as a strategy to mitigate the environmental impacts of this scenario. The methodology included a literature review, diagnosis of local conditions, water quality analysis, and evaluation of biosustainable solutions. The suggested techniques include natural polymers, for particle flocculation and solid removal; sludge in ribbons and scales, to enhance contaminant removal efficiency; biochar, for adsorption of toxic compounds; activated sludge systems, highly efficient in organic matter removal; moving bed biofilm reactors, for increased biological treatment efficiency; algae cultivation, for nutrient removal and biomass generation; bioelectrochemical systems, combining effluent treatment and energy generation; and microalgae for photosynthesis, to convert pollutants into less harmful compounds. Results indicate that these techniques significantly reduce pollutant loads, improve water quality, and promote ecosystem health. The study highlights the importance of integrated public policies and community engagement to ensure water resource sustainability. It concludes that biosustainability is a viable and essential approach to environmental management in urban areas.

Keyword: biosustainability; domestic effluents; treatment techniques; water pollution; water recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Publicações nos últimos quarenta anos (ano x documentos).....	21
Figura 2: Publicações por autor nos últimos quarenta anos	22
Figura 3: Fontes onde foram feitas as publicações nos últimos quarenta anos	22
Figura 4: Tipos de publicações nos últimos quarenta anos	23
Figura 5: Áreas de publicações nos últimos quarenta anos.....	23
Figura 6: Países que mais contribuíram nas publicações nos últimos quarenta anos.	24
Figura 7: Concentrações de Espumas no Ponto de Lançamento do Efluente no Corpo Hídrico após Tratamento da ETE de Araraquara/SP	45
Figura 8: Coloração do Efluente no Final do Tratamento	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias e faixas de classificação dos Índices de Qualidade de Água.....	27
Tabela 2: Vantagens e Desvantagens da Aplicação das Técnicas de Biomateriais	37
Tabela 3: Técnicas Biossustentáveis Recomendadas para a ETE de Araraquara/SP	50
Tabela 4: Resumos dos Custos Estimados de Implementação	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional das Águas
APP - Área de Preservação Permanente
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COT – Carbono Orgânico Total
CQS - Critério de Avaliação da Qualidade dos Sedimentos
DAAE – Departamento Autônomo de Água e Esgoto
DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
ETA – Estação de Tratamento de Água
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
FEHIDRO – Fundo Estadual de Recurso Hídricos
FNMA – Fundo Nacional de Meio Ambiente
FUNDAP – Fundação para o Desenvolvimento da Pesquisa
GEM – *Genetically Engineered Microorganisms*
IAP - Índice de Qualidade da Águas Brutas para fins de Abastecimento Público
IB - Índice de Balneabilidade
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICF - Índice da Comunidade Filantrópica
ICTEM – Índice de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Município
ICZ - Índice da Comunidade Zooplânctônica
IET - Índice do Estado Trófico
IQA - Índice de Qualidade da Água
IVA - Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática
MMA – Ministério do Meio Ambiente
PDAI – Programa de Desenvolvimento de Infraestrutura Ambiental
PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos
SIMA – Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo
UGRHI - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1.	Introdução	12
2.	Objetivo	14
2.1.	Objetivos Específicos	14
3.	Revisão Bibliográfica	16
3.1	O Meio Urbano e as Atividades Antrópicas	16
3.2	Tratamento de Efluentes	20
3.3	Enquadramento dos Corpos Hídricos	24
3.4	Classificação das águas	25
3.5	Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos	26
3.6	Índices de Qualidade das Águas e do Sedimento	27
3.7	Perfis de Temperatura e Oxigênio Dissolvido	29
3.8	Mortandade de Peixe	30
3.9	Indicador de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Município - ICTEM	30
3.10	Biossustentabilidade no Tratamento de Efluentes	30
4.	Metodologia	40
5.	Resultados	43
	Referências Bibliográficas	67
	Apêndice A - Figura 9: Mapa de Localização da UGRHI 13 e do Município de Araraquara no Estado de São Paulo	72
	Apêndice B - Figura 10: Municípios da UGRHI 13 – Tietê/Jacaré	73
	Apêndice C - Figura 11: Indicador de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Município em 2022	74
	Apêndice D - Figura 12: Classificação dos Corpos Hídricos em Araraquara/SP	75

1. Introdução

A crescente urbanização tem levado a um aumento significativo na produção de efluentes domésticos, resultando em uma carga cada vez maior de poluentes lançados nos corpos hídricos urbanos. Essa poluição hídrica representa uma ameaça à qualidade da água, aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana. Nesse contexto, é fundamental desenvolver estratégias eficientes para mitigar os impactos ambientais causados pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos urbanos.

O lançamento de efluentes domésticos não tratados ou inadequadamente tratados em corpos hídricos urbanos configura-se como um problema ambiental de magnitude alarmante, com consequências devastadoras para a saúde humana e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Essa prática nociva, impulsionada pelo crescimento populacional desordenado e pela falta de infraestrutura adequada de saneamento básico, resulta em uma série de impactos negativos que exigem medidas urgentes de mitigação.

Segundo Gleick (1998), nesse contexto, a biossustentabilidade com relação aos recursos hídricos refere-se à busca por práticas e políticas que promovam a utilização responsável e sustentável da água, visando à conservação dos ecossistemas aquáticos e à disponibilidade contínua de água de qualidade para as gerações presentes e futuras. Essa abordagem considera a interconexão entre os seres vivos e o ambiente aquático, reconhecendo a importância dos ecossistemas e sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais.

A gestão biossustentável dos recursos hídricos envolve a implementação de estratégias que minimizem a poluição da água, protejam as áreas de recarga dos aquíferos, restaurem ecossistemas aquáticos degradados e promovam o uso eficiente da água. Além disso, são necessárias políticas de governança e parcerias colaborativas para garantir uma gestão integrada e equitativa dos recursos hídricos (ANA, 2025).

A implantação de estratégias para mitigar o impacto ambiental dos recursos hídricos que recebem carga de efluente doméstico é de extrema importância para preservar a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Quando os

efluentes domésticos não são adequadamente tratados, podem ocorrer impactos negativos significativos, como a contaminação da água por nutrientes, patógenos e substâncias tóxicas, o que pode levar à deterioração da qualidade da água e à degradação dos ecossistemas aquáticos (Von Sperling, 2014).

Segundo Metcalf & Eddy (2014), existem estratégias eficientes de tratamento de efluentes domésticos baseadas em bioprocessos e que são amplamente utilizadas para remover contaminantes e poluentes presentes nos efluentes, contribuindo para a mitigação do impacto ambiental. Os bioprocessos envolvem o uso de microrganismos, como bactérias e fungos, para decompor e metabolizar compostos orgânicos e inorgânicos presentes nos efluentes, transformando-os em formas menos nocivas.

De acordo com Gupta (2018), o uso de biomateriais no tratamento de efluentes domésticos tem sido uma abordagem promissora para melhorar a eficiência dos processos de tratamento. Biomateriais são materiais de origem biológica ou produzidos a partir de organismos vivos que possuem propriedades únicas para remoção de contaminantes e poluentes dos efluentes. Esses materiais podem atuar como suportes para o crescimento de microrganismos benéficos, adsorver substâncias indesejáveis ou catalisar reações químicas. Existem diferentes tipos de biomateriais que podem ser empregados no tratamento de efluentes domésticos, como sendo alguns deles: carvão ativado, zeólitas, bioissorventes, biofilmes, entre outros.

Contudo, considerando os impactos ambientais causados pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos urbanos, é fundamental investigar e avaliar estratégias de mitigação eficazes que levem em consideração a biossustentabilidade e o uso racional dos recursos hídricos.

2. Objetivo

O objetivo deste estudo é analisar a aplicação da biossustentabilidade em recursos hídricos como forma de mitigar os impactos ambientais gerados pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos urbanos, propondo estratégias sustentáveis para o tratamento e a destinação desses efluentes. Analisar a aplicação da biossustentabilidade como ferramenta para mitigar os impactos ambientais gerados pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos urbanos no município de Araraquara/SP, se propõe a ser um farol para um futuro mais verde e resiliente.

2.1. Objetivos Específicos

Dentro do contexto dos objetivos gerais acima e da proposta da pesquisa no programa, a mesma se concentrará em:

- Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre biossustentabilidade e tratamento de efluentes domésticos, abordando conceitos, desafios e tecnologias disponíveis.
- Identificar e caracterizar os principais impactos ambientais causados pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos urbanos, com base em estudos científicos e dados de monitoramento ambiental, especialmente dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).
- Analisar o contexto dos recursos hídricos urbanos e identificar os principais impactos ambientais causados pelo lançamento de efluentes domésticos, considerando aspectos como a qualidade da água, saúde dos ecossistemas e a disponibilidade de água para usos múltiplos na cidade de Araraquara/SP.
- Investigar e avaliar as diversas tecnologias de tratamento de efluentes domésticos com base em princípios biossustentáveis, considerando sua eficiência na remoção de poluentes, viabilidade técnica, econômica e ambiental, e impacto na qualidade da água.
- Propor e analisar estratégias sustentáveis para o tratamento e a destinação de efluentes domésticos em corpos hídricos urbanos, considerando soluções inovadoras e integradas que combinem biotecnologias, sistemas naturais de tratamento e infraestrutura adequada.

- Avaliar a viabilidade e o potencial das estratégias propostas para promover a biossustentabilidade dos recursos hídricos urbanos, considerando aspectos técnicos, econômicos, sociais, ambientais e institucionais.
- Recomendar políticas públicas e medidas de gestão para a implementação das estratégias biossustentáveis de tratamento e destinação de efluentes domésticos, visando à proteção dos recursos hídricos urbanos e à promoção do desenvolvimento sustentável.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 O Meio Urbano e as Atividades Antrópicas

As preocupações com o meio urbano junto a problemas decorrentes do processo de urbanização é um tema bastante discutido nas últimas décadas. A partir da Revolução Industrial, no final do século XVIII, o grande processo de industrialização fez com que se agravasse o aumento populacional, gerando diversos problemas urbanos em diversas atividades antrópicas, ocasionando danos à saúde pública e ao meio ambiente. Nesse contexto, desenvolveu-se leis, com enfoque principal no saneamento, buscando evoluir para um melhor entendimento e planejamento urbano integrado as questões ambientais de modo a buscar um desenvolvimento que garanta um equilíbrio urbano integrado, de modo a garantir a sobrevivência das gerações futuras, buscando uma equidade social, econômica e ambiental.

O conceito de desenvolvimento sustentável em termos gerais foi reconhecido pela primeira vez pelo relatório da comissão Brundtland em 1987 e tem sido um tema popular no planejamento desde então (Marlow *et al.*, 2013).

Dentro desse contexto, a preservação dos recursos hídricos representa um fator essencial. No Brasil, nos processos de expansão urbana, na maioria das vezes ocorrendo sem o planejamento necessário, verifica-se a exploração predatória do meio ambiente em geral, especialmente nos mananciais e aquíferos. Dada a degradação da qualidade das águas superficiais, bem como do aumento de sua demanda, associados ao insuficiente abastecimento dos serviços de saneamento, a utilização das águas subterrâneas tem aumentado consideravelmente nos últimos 30 anos (Kauffmann *et al.*, 2004). Com isso, nota-se a necessidade do ordenamento e limitação do crescimento urbano, aliado à gestão de recursos hídricos. Sendo assim, busca-se desta forma a sustentabilidade urbana que, se completa junto a indicadores de sustentabilidade na gestão e legislação urbanística, controle ambiental, além de um efetivo controle do uso do solo e ocupação indiscriminada.

Avaliar os impactos ambientais urbanos é fundamental para o ordenamento, planejamento e desenvolvimento das cidades. Entretanto, a necessidade de desenvolvimento gera o pressuposto de que a ocupação geográfica carece da utilização de recursos naturais. Seguindo esse raciocínio, observa-se principalmente nas cidades a crescente demanda por recursos naturais e espaço físico, fazendo com que áreas que deveriam servir como suporte à preservação

ambiental como Áreas de Preservação Permanente (APP), sejam ocupadas de forma indiscriminada sem o ordenamento e planejamento necessário, acarretando diversos problemas de origem antrópica como inundações, proliferação de doenças veiculadas a água, despejo de efluentes sanitários *in natura* e em corpos hídricos, dispersão de resíduos e materiais sólidos em mananciais e no solo, enchentes, deslizamentos de terra, aumento de área impermeabilizada, aumento do escoamento superficial, entre outros problemas (Da Silva, 2016).

Outro ponto a considerar que a exploração excedente dos recursos naturais, em especial dos recursos hídricos, a ocupação irregular do solo e a limitação de normas legais colocam em risco a qualidade natural dos recursos (Ribeiro; Rocha; Garcia, 2011).

Na grande maioria dos casos, os recursos naturais vêm sendo utilizados pela humanidade, sem o conhecimento de suas interações, o que potencializa cada vez mais os impactos ambientais negativos em ambientes rurais e urbanos, afetando diretamente a qualidade de vida das pessoas, caminhando contra os princípios da sustentabilidade.

A ocupação urbana tem sido um forte fator de impacto nas relações hídricas e suas interações com o meio ambiente. O homem, cada vez mais ocupando os espaços ambientalmente estáveis, tem alterado o meio como um todo, propagando mudanças drásticas no balanço hídrico, na quantidade e na qualidade das águas superficiais e subterrâneas (Fitts, 2014).

Sendo assim, a urbanização tem sido um forte aliado na geração de problemas no saneamento e ações prejudiciais ao meio ambiente. A água, em especial, tem sido um recurso natural comprometido pela crescente ocupação. Esse fator tem sido foco de diversos estudos e pesquisas em busca de soluções para evitar o uso irracional, a contaminação e o comprometimento das águas para uso e abastecimento das populações.

A água é um recurso natural finito, básico para nossa sobrevivência e necessário a quase todas as atividades do ser humano. De toda água existente na Terra ($1.380.000 \text{ km}^3$), 97,3% são salgadas e apenas 2,7% águas doce. Da água doce disponível na terra (37.000 km^2), 77,20% se encontram em forma de gelo nas calotas polares (28.564 km^3), 22,40% se tratam de água subterrânea (8.288 km^3), 0,35% se encontra nos lagos e pântanos (128 km^3), 0,04% se encontra na atmosfera (16 km^3) e apenas 0,01% da água doce está nos rios (4 km^3). O Brasil possui uma posição

privilegiada com relação aos totais de água doce disponível no planeta, disponibilizando um total estimado de 12% de toda água doce do planeta, sendo 1,6% desse total disposto apenas no Estado de São Paulo (DAEE, 2017). Embora os mananciais urbanos representem apenas uma pequena fração do total de água doce disponível, é no ambiente urbano e nas áreas industriais que são verificados os maiores impactos (Cunha; Nobre; Melo, 2008).

Neste contexto, a crescente demanda da água no abastecimento público, irrigação, indústria e projetos de engenharia, fez com que acentuasse a preocupação no uso racional da água. Consequentemente, a necessidade de compreender como a água é utilizada de forma sustentável, veio a ser um importante aspecto a ser considerado pela sociedade. Questões de abastecimento público e do uso racional da água tomaram a frente do saneamento há algumas décadas. E essa preocupação passou a ser divulgada com maior ênfase à medida que as cidades foram se desenvolvendo, alterando as formas de uso e a preocupação com sua falta.

Independente da água doce ser o recurso mais essencial para a humanidade, a qualidade de água disponível está diminuindo em todo o mundo devido às pressões antrópicas como as mudanças climáticas, o crescimento populacional, a urbanização, as atividades agrícolas e a industrialização. Estudar o desempenho dos sistemas hídricos atuais é crucial para encontrar soluções sustentáveis. Já existe uma ampla gama de aplicações da gestão sustentável de recursos hídricos, indicando que está se tornando mais desafiador avaliar e promover a sustentabilidade (Yonca *et al.*, 2014).

Visto ao exposto, a gestão da água nas áreas urbanas, quer dispostas naturalmente, quer empregadas nos sistemas de distribuição de água, é um elemento importante da sustentabilidade. Considerando que a infraestrutura hídrica urbana requer uma quantidade significativa de investimento, tanto para sua implantação quanto para sua operação e manutenção, entende-se como necessário o emprego de indicadores de sustentabilidade, resiliência e vulnerabilidade a fim de avaliar o comportamento desse sistema de abastecimento.

Também deve-se considerar que o desenvolvimento econômico tem resultado em drásticas influências negativas ao meio urbano. A modernização dos diversos processos produtivos junto à urbanização e o aumento populacional resultam, por muitas vezes, em impactos negativos ao meio ambiente. Diversas regiões do planeta têm substituído as áreas naturais por áreas urbanas, resultado em

danos aos ecossistemas naturais, comprometendo os bens e serviços proporcionados por estes (Trevisan *et al.*, 2018).

Considerando a realidade atual no Brasil, revela-se a necessidade do planejamento adequado do território, visando a melhoria da qualidade ambiental e urbana, valorizando aspectos e funcionalidades ambientais dos ecossistemas. É primordial a análise de paisagens no seu contexto geográfico, local e regional, bem como estudos de estruturas ecológicas, urbanas e agrícolas, estabelecendo metas e normas compatíveis com o crescimento e adensamento das cidades, contribuindo para um desenvolvimento sustentável na ocupação e uso do solo. A aglomeração populacional em meio urbano sem a falta de planejamento, junto a características tais como a impermeabilização do solo, induz a diversos riscos e prejuízos ambientais como a poluição hídrica, atmosférica, alta geração de resíduos, perda de biodiversidade, além da redução na cobertura vegetal. Entretanto, uma das primordiais consequências desse processo urbano é a degradação do solo, seu assoreamento e a consequente ocorrência de processos erosivos. O solo é tido como um dos principais recursos naturais, devido ao crescimento populacional, o mesmo tem sido visto como um recurso atuante em papel secundário no planejamento o que, na maioria das vezes, não são consideradas suas características de potencial uso, que acaba por inviabilizar o desenvolvimento vegetal. Ainda, a urbanização tem provocado um excesso de superfícies impermeabilizadas, reduzindo a infiltração de águas das chuvas, aumentando os riscos de erosão, deslizamentos do solo, compactação, além de alagamentos e poluição de córregos e rios (Cadorin; Mello, 2011).

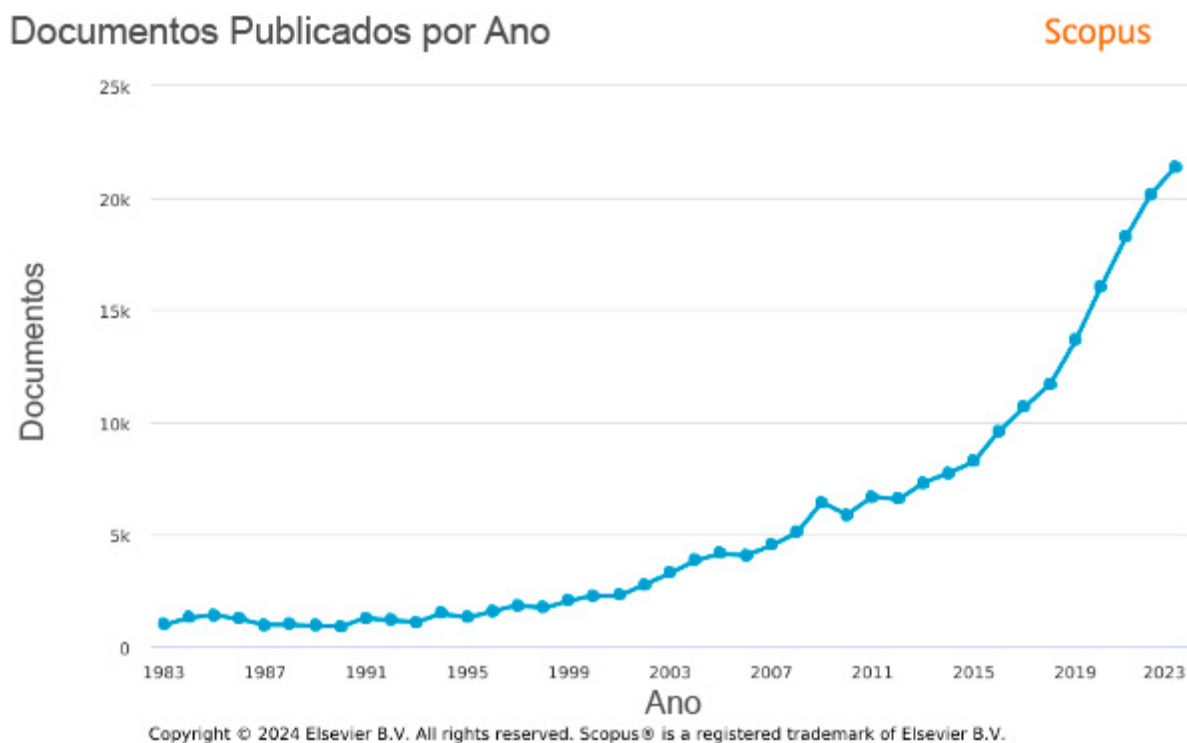
É importante considerar que mais da metade da população mundial vive em cidades. Logo, é muito importante que o efluente urbano seja considerado nos estudos de áreas urbanas, porém a maior dificuldade é diferenciar as características naturais das características resultantes do uso urbano que é bastante complexo. Pode haver diferentes alterações nos efluentes decorrentes dessas atividades, tais como a alta concentração de metais pesados, metano, disposição de rejeitos de construção e industriais, além da alteração do regime hídrico e térmico. Com essa variedade de efeitos, têm-se uma dificuldade em estabelecer metodologias e técnicas de mitigação de impactos em meio urbano. Vários processos antropogênicos interagem, resultando em alterações ecológicas que podem contribuir para o comprometimento da sustentabilidade em área urbana (Pedron *et al.*, 2004).

Por fim, Pedron *et al.* (2004) enfatizam que a humanidade passou por um processo de evolução tecnológica que lhe sujeitou a possibilidade de alterar o chamado espaço natural. Logo, a falta de planejamento na expansão dos centros urbanos, concomitante às atividades antrópicas, degradam significativamente o meio ambiente, o que na maioria das vezes, dificulta sua recuperação aumentando os custos de processo.

3.2 Tratamento de Efluentes

Se fizer uma bibliometria sobre as pesquisas e os avanços da engenharia no processo de tratamento de efluentes de maneira geral, seja doméstico ou industrial, veremos que muitas delas avançaram para o tema nos últimos quarenta (40) anos. Segundo a base de dados *Scopus*, se utilizarmos como pesquisa as palavras “efluentes” e “tratamento”, teremos os dados estatísticos acerca das publicações e pesquisas nesse período:

Figura 1 - Publicações nos últimos quarenta anos (ano x documentos)



Fonte: Scopus (2024)

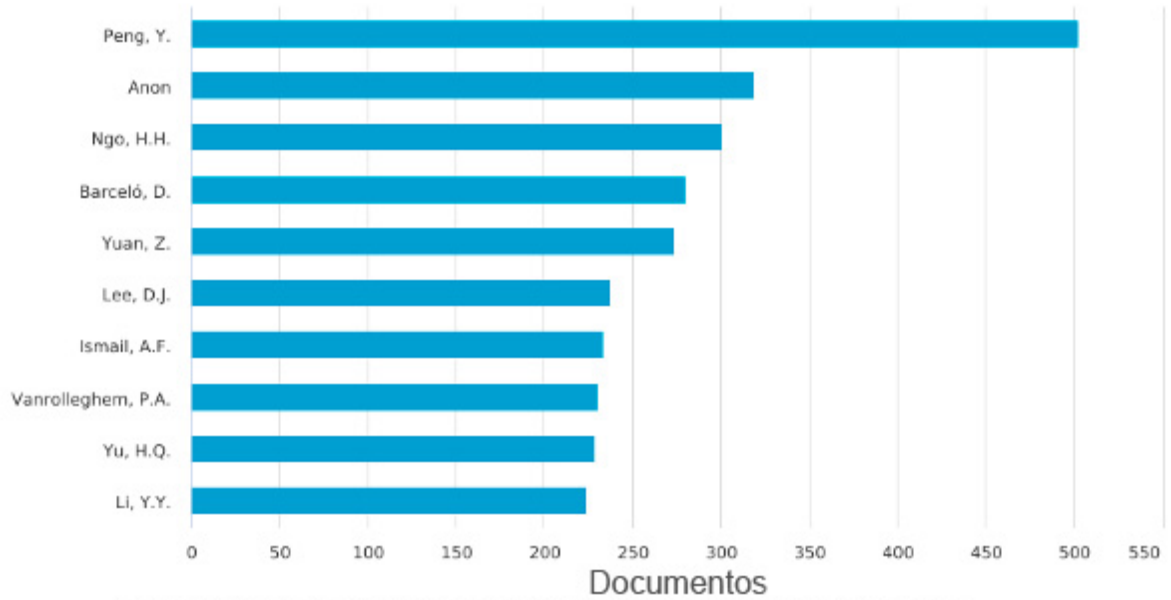
Analisando o gráfico acima, em 1983 tivemos 988 publicações, dez anos após tivemos 1070, 3266 em 2003, 7259 em 2013 e, por fim, 21352 publicações acerca do tema em 2023. Em todo o período acumulado acima fora registrado 224000 publicações contabilizados na plataforma. Logo, nota-se um crescimento notável em busca de alternativas ao tratamento sustentável dos diferentes tipos de efluentes, evidenciando a importância da necessidade em busca do desenvolvimento sustentável.

Figura 2 - Publicações por autor nos últimos quarenta anos

Documentos por Autor

Comparação de documentos considerando até 15 autores.

Scopus



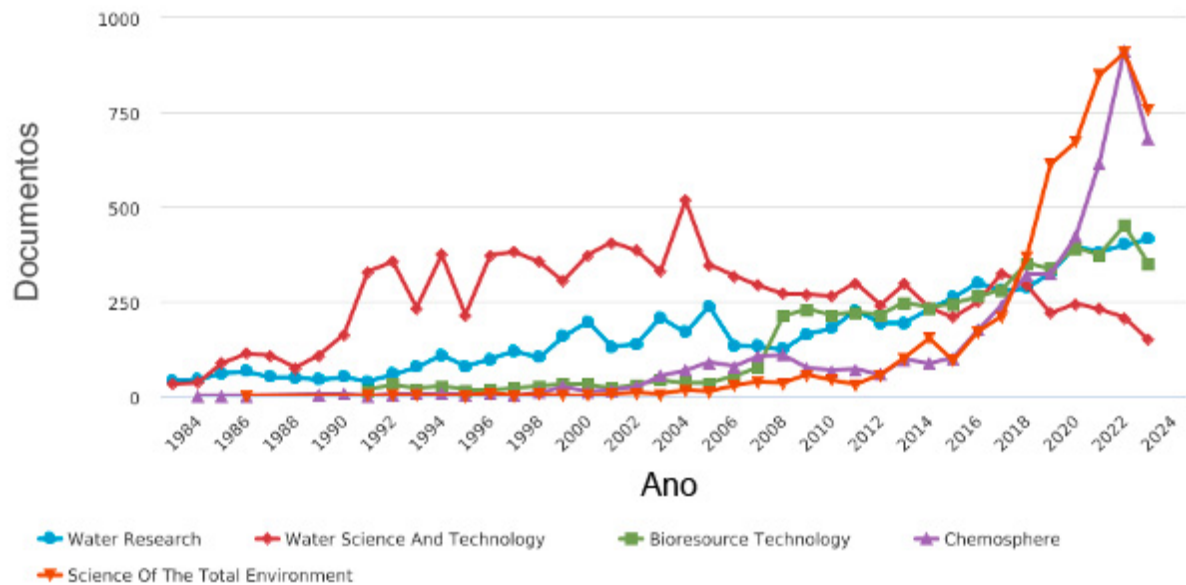
Fonte: Scopus (2024)

Figura 3 - Fontes onde foram feitas as publicações nos últimos quarenta anos

Documentos por Ano e Fonte

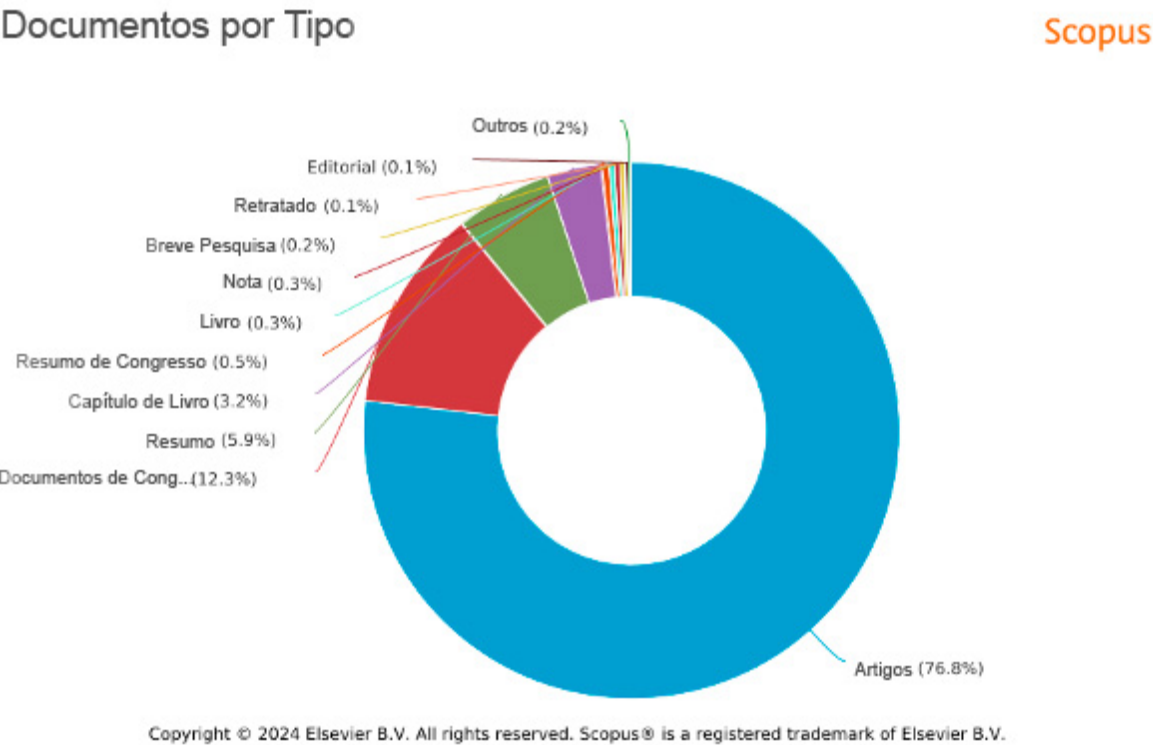
Comparação de documento considerando até 10 fontes.

Scopus



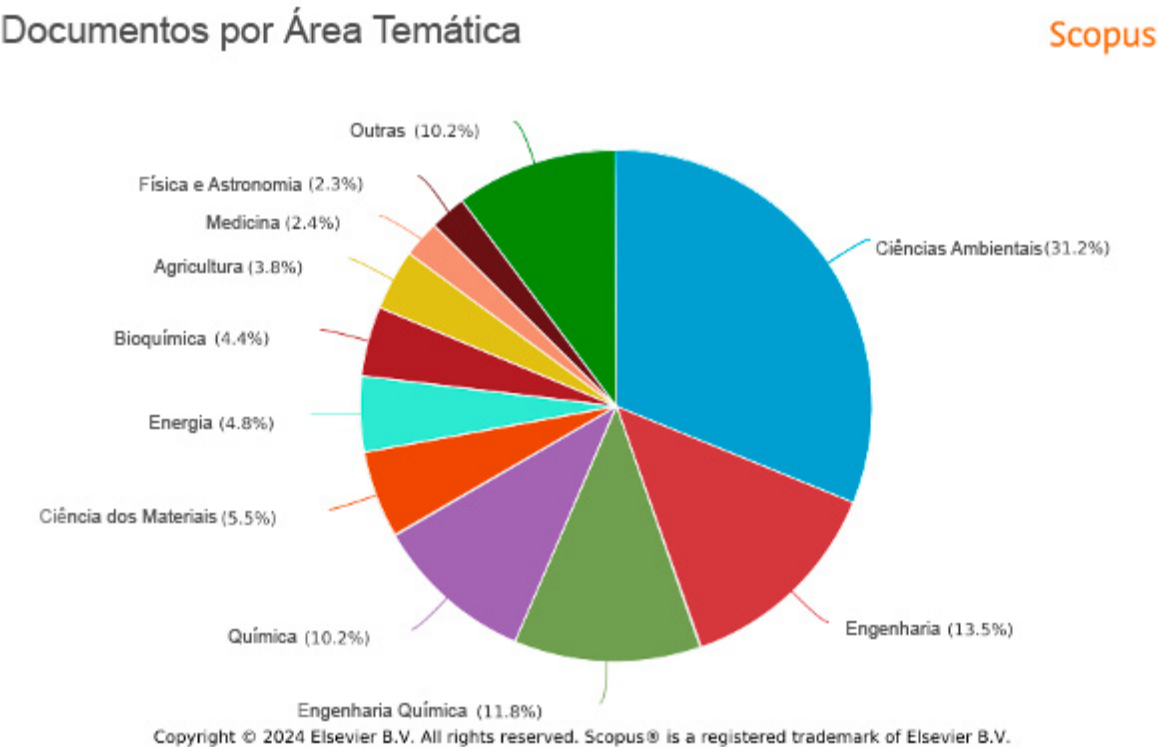
Fonte: Scopus (2024)

Figura 4 - Tipos de publicações nos últimos quarenta anos



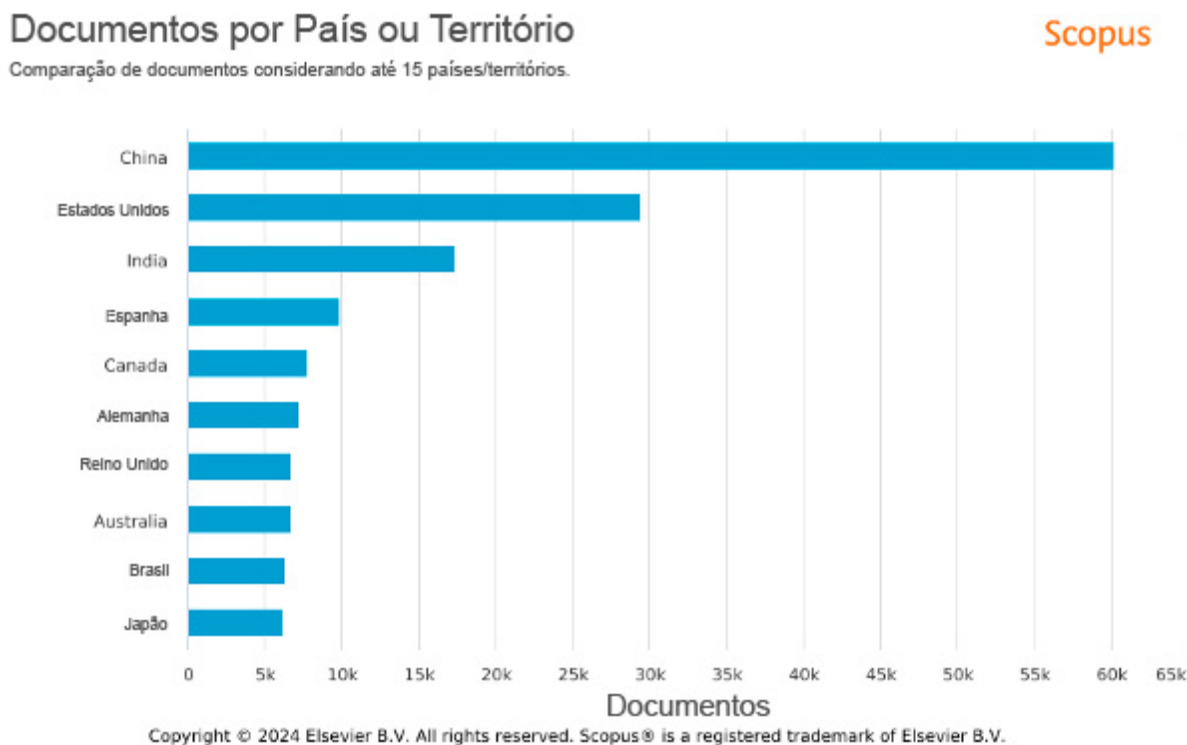
Fonte: Scopus (2024)

Figura 5 - Áreas de publicações nos últimos quarenta anos



Fonte: Scopus (2024)

Figura 6 - Países que mais contribuíram nas publicações nos últimos quarenta anos



Fonte: Scopus (2024)

Analisando os gráficos das imagens acima, nota-se que os autores que mais contribuíram para publicações na área estão listados na figura 2, sendo o pesquisador e professor Yongzhen Peng da Beijing University of Technology da China com 502 publicações sobre o tema, bem como as diferentes fontes que mais publicaram acerca do tema (figura 3). Na figura 4, nota-se que os artigos evidenciam a maior parte das publicações registradas na base de dados, contendo um percentual de 76,8%. Já no gráfico de pizza da figura 5, nota-se as áreas ambiental, engenharia e química como as que mais centralizaram as publicações no período. E, por fim, no gráfico da figura 6 tem-se uma relação dos países que mais contribuíram para a pesquisa no âmbito do tratamento de efluentes, sendo a China como aquele que mais publicou (60146 publicações), seguido pelos Estados Unidos (29360 publicações) e a Índia (17253 publicações). O Brasil figura em nono lugar (9º) no ranking com 6221 publicações.

3.3 Enquadramento dos Corpos Hídricos

Segundo a CETESB (2024) como a água é um recurso natural com múltiplos usos e interesses, foram criados e implementados instrumentos de gestão

para regulamentar sua utilização. O objetivo é garantir que todas as demandas sejam atendidas enquanto se minimiza o impacto sobre os corpos hídricos e se busca constantemente melhorar a qualidade da água.

O enquadramento dos corpos d'água é um instrumento essencial no planejamento, pois integra a política de recursos hídricos com a política ambiental. Ele está associado a outros instrumentos de gestão hídrica, como a outorga do direito de uso de recursos hídricos e a cobrança pelo uso desses recursos, além de instrumentos de gestão ambiental, como licenciamento e monitoramento de qualidade.

O enquadramento não deve ser visto apenas como uma classificação simples; é uma ferramenta de gestão destinada a garantir que a qualidade da água atenda às necessidades dos usuários. Ao identificar os usos mais importantes e, portanto, mais restritivos em termos de qualidade, o enquadramento determina a classe de qualidade da água que deve ser mantida ou alcançada em um segmento específico de um corpo d'água.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelece que as classes dos corpos d'água serão determinadas pela legislação ambiental. Ela também atribui às Agências de Bacia a competência para propor o enquadramento dos corpos d'água aos Comitês de Bacia correspondentes, para que estes encaminhem suas propostas aos respectivos Conselhos Nacional ou Estaduais de Recursos Hídricos, conforme a jurisdição. Antes da PNRH, o Decreto Estadual nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, definiu classes de uso, e o Decreto nº 10.755, de 22 de novembro de 1977, introduziu o enquadramento dos corpos d'água no Estado de São Paulo. Os Decretos Estaduais nº 24.839/86 e nº 39.173/94, junto com as Deliberações do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, estabeleceram o reenquadramento de alguns desses corpos d'água.

3.4 Classificação das águas

Segundo o Decreto Estadual de São Paulo 8.468 de 8 de setembro de 1976, conforme o Título II que trata da Poluição das Águas, Capítulo I, da Classificação das Águas em seu artigo 7.º:

“As águas interiores situadas no território do Estado, para os efeitos deste regulamento, serão classificadas segundo os seguintes usos preponderantes:

I — CLASSE 1 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, sem tratamento prévio ou com simples desinfecção;

II — CLASSE 2 — águas destinadas ao abastecimento doméstico,

após tratamento convencional, à irrigação de hortaliças ou plantas frutíferas e à recreação de contato primário (natação, esqui-aquático e mergulho);

III — CLASSE 3 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, à preservação de peixes em geral e de outros elementos da fauna e da flora e à dessedentação de animais;

IV — Classe 4 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento avançado, ou à navegação, à harmonia paisagística, ao abastecimento industrial, à irrigação e a usos menos exigentes.” (SÃO PAULO, 1976, p. 1).

Para a classificação das águas no perímetro municipal de Araraquara/SP, o anexo D detalha os corpos hídricos e suas classificações, conforme diretrizes acima.

3.5 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

As Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), instituídas em dezembro de 1994 a Lei Estadual nº 9.034, que instituiu o Sistema de Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos são áreas geográficas definidas dentro de uma bacia hidrográfica ou um conjunto de bacias hidrográficas, conforme o anexo D, criadas para facilitar a administração e o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos. Essas unidades são essenciais para a implementação eficiente das políticas de recursos hídricos, permitindo uma abordagem mais local e específica no gerenciamento da água.

As UGRHI têm várias funções importantes:

1. Planejamento e Coordenação: Elas servem como base para o planejamento e a coordenação de ações voltadas para a gestão dos recursos hídricos. Isso inclui a elaboração de planos diretores de recursos hídricos que considerem as características específicas da unidade.

2. Monitoramento e Avaliação: As UGRHI permitem o monitoramento contínuo da quantidade e qualidade dos recursos hídricos dentro de suas áreas, ajudando a identificar problemas e tendências que podem afetar a disponibilidade e a qualidade da água.

3. Regulação e Controle: Elas facilitam a aplicação de regulamentos e normas que governam o uso dos recursos hídricos, como a outorga de direitos de uso da água e a cobrança pelo uso da água.

4. Implementação de Políticas Públicas: As UGRHI são fundamentais para a implementação de políticas públicas de recursos hídricos, permitindo que as ações sejam adaptadas às necessidades e características específicas de cada unidade.

5. Participação e Conscientização: Elas promovem a participação dos diversos atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos, incluindo governos, usuários, ONGs e a comunidade em geral. Isso aumenta a conscientização sobre a importância da conservação e do uso sustentável da água.

6. Integração de Usos e Soluções de Conflitos: As UGRHI ajudam a integrar os diferentes usos da água, como abastecimento público, irrigação, indústria e conservação ambiental, buscando soluções para possíveis conflitos entre esses usos.

Ao dividir uma bacia hidrográfica em unidades menores e gerenciáveis, conforme o anexo B que delimita a UGRHI 13, as UGRHIs permitem uma gestão mais eficaz e focada dos recursos hídricos, contribuindo para a sustentabilidade e a equidade no uso da água.

3.6 Índices de Qualidade das Águas e do Sedimento

Os índices são empregados para oferecer uma visão geral da qualidade da água, pois condensam os resultados de várias variáveis em um único indicador. Para tornar essas informações compreensíveis ao público em geral, a CETESB utiliza índices específicos que indicam a qualidade da água conforme seus usos previstos.

Tabela 1 - Categorias e faixas de classificação dos Índices de Qualidade de Água

Índice de Qualidade	Categoria					
IQA	Ótima $79 < IQA \leq 100$	Boa $51 < IQA \leq 79$	Regular $36 < IQA \leq 51$		Ruim $19 < IQA \leq 36$	Péssima $IQA \leq 19$
IAP	Ótima $79 < IAP \leq 100$	Boa $51 < IAP \leq 79$	Regular $36 < IAP \leq 51$		Ruim $19 < IAP \leq 36$	Péssima $IAP \leq 19$
IVA	Ótima $IVA \leq 2,5$	Boa $2,6 \leq IVA \leq 3,3$	Regular $3,4 \leq IVA \leq 4,5$		Ruim $4,6 \leq IVA \leq 6,7$	Péssima $IVA \geq 6,8$
IET	Ultraoligotrófico $IET \leq 47$	Oligotrófico $47 < IET \leq 52$	Mesotrófico $52 < IET \leq 59$	Eutrófico $59 < IET \leq 63$	Supereutrófico $63 < IET \leq 67$	Hipereutrófico $IET > 67$
ICF	Ótima 1	Boa 2	Regular 3		Ruim 4	
ICZ		Boa	Regular		Ruim	Péssima
IB	Ótima Praias excelentes em 100% do tempo	Boa Praias próprias em 100% do tempo	Regular Praias impróprias em até 25% do tempo		Ruim Praias impróprias entre 25 e 50% do tempo	Péssima Praias impróprias em mais de 50% do tempo

IQA – Índice de Qualidade das Águas; IAP - Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público; IVA - Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática; IET – Índice do Estado Trófico; ICF - Índice da Comunidade Fitoplancônica; ICZ - Índice da Comunidade Zooplancônica; IB - Índice de Balneabilidade

Fonte: Cetesb, 2022.

3.6.1 IQA – Índice de Qualidade das Águas

O Índice de Qualidade das Águas (IQA) indica a presença de efluentes sanitários nos corpos d'água, oferecendo uma visão geral da qualidade das águas superficiais. Este índice também pode refletir a contribuição de efluentes industriais, desde que sejam biodegradáveis. O IQA é calculado em todos os pontos da Rede Básica.

3.6.2 IAP – Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público

O Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP) é utilizado pela CETESB para indicar a qualidade da água destinada ao abastecimento público. Além das variáveis consideradas no IQA, são avaliadas substâncias tóxicas e fatores que afetam a qualidade organoléptica da água. O IAP é calculado apenas nos pontos de captação usados para abastecimento público ou em locais onde há transposição de água para reservatórios destinados ao abastecimento.

3.6.3 IVA – Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática

O Índice de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática (IVA) avalia a qualidade da água para a preservação dos organismos aquáticos. Este índice considera variáveis essenciais, como oxigênio dissolvido, pH, toxicidade (avaliada por ensaios ecotoxicológicos com *Ceriodaphnia dubia*), substâncias tóxicas e grau de trofia. O cálculo do IVA é priorizado em pontos classificados para a proteção da vida aquática, excluindo-se os corpos hídricos de Classe 4 conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005.

3.6.4 IET – Índice do Estado Trófico

O Índice do Estado Trófico (IET) classifica os corpos d'água de acordo com seu grau de trofia, avaliando o enriquecimento por nutrientes e seu efeito no crescimento excessivo de algas e cianobactérias. O IET é calculado prioritariamente em pontos onde a classe prevê a proteção da vida aquática.

3.6.5 ICF, ICZ e ICB – Índices das Comunidades Fitoplanctônica, Zooplanctônica e Bentônica

Os índices das comunidades fitoplanctônica (ICF), zooplanctônica (ICZ) e bentônica (ICB) complementam a avaliação do IVA, fornecendo um diagnóstico ambiental baseado em grupos de organismos. Eles consideram densidade, dominância, diversidade e outras métricas para a classificação dos diferentes ambientes.

3.6.6 IB – Índice de Balneabilidade

O Índice de Balneabilidade (IB) avalia a qualidade da água para recreação de contato primário, sendo aplicado em praias de águas interiores, localizadas em rios e reservatórios. Reservatórios em boas condições são avaliados mensalmente, enquanto aqueles impactados por efluentes domésticos são avaliados semanalmente.

3.6.7 CQS – Critério de Avaliação da Qualidade dos Sedimentos

O Critério de Avaliação da Qualidade dos Sedimentos (CQS) classifica os sedimentos em categorias com base em três principais linhas de evidência: contaminação química, comunidade bentônica e toxicidade (incluindo testes com *Hyallela azteca*). Complementam-se as análises de toxicidade com ensaios de mutação reversa (Teste de Ames), testes de toxicidade aguda (Microtox®) e frequência de deformidades. A análise química inclui fósforo total, carbono orgânico total e nitrogênio Kjeldahl, avaliando a qualidade biogeoquímica e a condição de eutrofização dos corpos d'água.

3.7 Perfis de Temperatura e Oxigênio Dissolvido

A determinação dos perfis de temperatura e oxigênio dissolvido ao longo da coluna de água em corpos hídricos lênticos é importante, especialmente quando ocorre a estratificação térmica, comum no verão. Durante esse período, a camada superficial do reservatório, conhecida como epilânio, apresenta temperaturas mais elevadas e menor densidade, enquanto a camada mais profunda, chamada hipolânio, tem temperaturas mais baixas e maior densidade. Essa diferença de densidade cria uma estabilidade na massa de água, que pode ser desestabilizada por forças externas como vento, entrada de afluentes e mudanças sazonais. A

estabilidade pode resultar em alterações na qualidade da água, particularmente na camada mais profunda, onde a concentração de oxigênio dissolvido pode diminuir devido aos processos de decomposição. Os perfis de oxigênio dissolvido e temperatura são medidos em pontos de amostragem de ambientes lênticos (reservatórios) com o uso de embarcações (CETESB, 2022).

3.8 Mortandade de Peixe

Eventos de mortandade de peixes representam uma pressão extrema no corpo d'água, podendo afetar várias espécies e outros organismos aquáticos. Essas mortandades geralmente estão relacionadas a mudanças na qualidade da água e, embora nem sempre seja possível determinar suas causas, o registro desses eventos é um bom indicador da vulnerabilidade do corpo hídrico às fontes de poluição nas respectivas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs). A CETESB responde a ocorrências de mortandade de peixes através de suas Agências Ambientais e do Setor de Comunidades Aquáticas (CETESB, 2022).

3.9 Indicador de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Município - ICTEM

O ICTEM é um índice desenvolvido pela CETESB para avaliar a eficiência dos serviços de coleta e tratamento de esgoto nos municípios. Esse indicador é composto por cinco elementos que representam as condições a serem avaliadas no sistema público de tratamento de esgotos.

O ICTEM é utilizado para monitorar a infraestrutura de saneamento, identificando a cobertura de serviços de coleta de esgoto sanitário, tratamento e sua eficiência, conforme em imagem do anexo C. Ele é uma ferramenta importante para a gestão ambiental e para a elaboração de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade dos serviços de saneamento básico (CETESB, 2022).

3.10 Biossustentabilidade no Tratamento de Efluentes

Pesquisas sobre biossustentabilidade no tratamento de efluentes focam em desenvolver métodos eficientes e ambientalmente amigáveis para tratar e reutilizar a água residual. A reutilização da água tratada é uma prática crescente, especialmente em regiões com escassez hídrica, e é essencial seguir normas rigorosas para garantir

a segurança ambiental e de saúde pública (Kasari, *et. al.*, 2021).

Por exemplo, uma revisão detalhada dos custos de tratamento de efluentes destaca a importância de métodos sustentáveis para o gerenciamento adequado da água. Esses métodos visam reduzir a contaminação por metais pesados e patógenos, permitindo o uso seguro da água tratada para agricultura e outras finalidades, como o abastecimento público.

Ainda, estudos mostram que a aplicação de técnicas de bio sustentabilidade no tratamento de efluentes pode melhorar significativamente a qualidade da água, reduzir impactos ambientais e fornecer soluções inovadoras para a reutilização da água tratada em diversas áreas.

Analisando-se os estudos acerca do tema, nota-se que vários artigos citam a importância da bio sustentabilidade no tratamento de efluentes (águas residuárias) para o meio ambiente, bem como para o reuso dessas águas.

Segundo Gallego-Valero *et. al.* (2021) no artigo *Custos de Tratamento de Águas Residuais: Uma Visão Geral da Pesquisa Através da Análise Bibliométrica* os autores destacaram a importância dos recursos hídricos e a necessidade de uma gestão adequada da água, bem como uma exploração mais sustentável deste recurso, o tratamento de águas residuais e seus custos tornaram-se questões-chave para a gestão adequada da água. O estudo também apresenta uma visão geral da pesquisa sobre os custos de tratamento de águas residuais no período de 1950 a 2020, utilizando análise bibliométrica de publicações na base de dados *Web of Science*. A pesquisa retornou 22.788 artigos sobre custos de tratamento de águas residuais, representando apenas 12,34% do total de publicações sobre tratamento de águas residuais. Como resultados, os autores apresentaram os seguintes fatores:

- Evolução da Pesquisa: A pesquisa sobre custos de tratamento de águas residuais mostrou um aumento constante desde 2010, refletindo a crescente preocupação social com o meio ambiente e seus recursos. Do total de artigos publicados, 71,11% foram a partir de 2010.

- Principais Áreas de Pesquisa: As áreas mais importantes de pesquisa sobre este tópico são Ciências Ambientais e Ecologia (14% do total), Engenharia (11%) e Recursos Hídricos (10%).

- Países Líderes: Os principais países que lideram a produção científica nessa área são China (28,84% do total), EUA (12,05%), Índia (8,67%), Espanha (4,90%) e Reino Unido (4,88%).

- Instituições Líderes: A produção científica é muito dispersa, com destaque para a Academia Chinesa de Ciências (China), com 2,46% do total, e o Sistema de Institutos de Tecnologia da Índia, com 1,95% do total.

- Jornais Relevantes: Os artigos sobre custos de tratamento de águas residuais são publicados em uma ampla gama de jornais de alto impacto, sendo os preferidos pelos pesquisadores o *Water Science and Technology*, *Chemical Engineering Journal*, e *Desalination and Water Treatment*.

- Custos de UV e Cloração: Muito poucos resultados foram encontrados sobre os custos de UV (4,91%) e cloração (0,61%) em comparação com os custos totais de tratamento de águas residuais. No entanto, esses tópicos registraram um aumento notável a partir de 2000.

Como conclusão, o estudo revelou um aumento constante na pesquisa sobre custos de tratamento de águas residuais, com um crescimento significativo após 2010. As principais áreas de pesquisa são Ciências Ambientais, Engenharia e Recursos Hídricos. China, EUA, Índia, Espanha e Reino Unido são os países líderes nesta área de pesquisa. As instituições de pesquisa mais proeminentes incluem a Academia Chinesa de Ciências e o Sistema de Institutos de Tecnologia da Índia. Embora haja um aumento na pesquisa sobre os custos de tratamentos UV e cloração, ainda há uma necessidade de maior enfoque nesses tópicos devido à sua importância para a desinfecção e reutilização de águas residuais.

Nesse sentido, são notáveis a importância para o tratamento de efluentes e a mitigação dos impactos causados pelo lançamento de efluentes e águas residuais em corpos hídricos, especialmente o esgoto doméstico. O tratamento de efluentes e corpos hídricos é uma necessidade crescente diante do aumento da poluição e do consumo de água. A busca por métodos sustentáveis e eficientes para tratar águas residuais e poluentes tem levado ao desenvolvimento e à aplicação de diversas técnicas baseadas em biomateriais. Esses métodos são valorizados por sua eficácia na remoção de poluentes e por suas características ecológicas e econômicas. Logo, tem-se uma gama de técnicas de biomateriais, suas aplicações e a literatura relevante que apoia seu uso. Dentre elas, têm-se:

- **Biossorção**

A biossorção é uma técnica que utiliza materiais biológicos para remover poluentes da água. Algas, fungos, bactérias e biomassa vegetal têm sido amplamente estudados como biossorventes devido à sua capacidade de se ligar a contaminantes como metais pesados e corantes (Volesky, 2003). A biossorção é vantajosa por ser um método econômico e de baixo impacto ambiental, oferecendo uma solução eficiente para a remoção de poluentes.

- **Biofiltração**

A biofiltração utiliza camadas de biomateriais, como areia revestida com microrganismos, para tratar efluentes. Nesse processo, os microrganismos presentes no biofiltro degradam os poluentes orgânicos à medida que a água passa através da camada filtrante (Schneider *et al.*, 2010). Esse método é eficaz na remoção de sólidos suspensos e compostos orgânicos, e pode ser ajustado para tratar diferentes tipos de efluentes.

- **Lodos Ativados**

Os lodos ativados é um método biológico em que uma mistura de microrganismos e efluentes é utilizada para degradar poluentes. O lodo ativado contém microrganismos que consomem os poluentes presentes na água, convertendo-os em produtos menos nocivos (Metcalf & Eddy, 2014). Este método é amplamente utilizado em estações de tratamento de águas residuais e é conhecido por sua eficiência na remoção de poluentes orgânicos.

- **Reatores de Leito Móvel (MBBR)**

Os reatores de leito móvel utilizam biomateriais para criar um leito onde os microrganismos podem crescer e tratar efluentes. A água passa através deste leito, e os microrganismos presentes degradam os contaminantes (Tchobanoglous *et al.*, 2014). Esse método é eficaz na remoção de compostos orgânicos e sólidos suspensos e pode ser adaptado para diferentes condições operacionais.

- **Filtração por Membranas Biológicas**

A filtração por membranas biológicas combina sistemas de membranas com biomateriais para melhorar a eficiência na remoção de poluentes e sólidos (Le-Clech *et al.*, 2006). As membranas, revestidas com biomateriais, ajudam a captar e degradar contaminantes, oferecendo uma solução eficaz para o tratamento de

efluentes.

- **Fitorremediação**

A fitorremediação utiliza plantas para remover, degradar ou estabilizar poluentes presentes em corpos hídricos. Plantas como o jacinto-d'água têm a capacidade de absorver nutrientes e poluentes da água, proporcionando uma solução natural e sustentável (Raskin *et al.*, 1994). Esse método é eficaz na remoção de nutrientes em excesso, como nitrogênio e fósforo, que podem causar eutrofização.

- **Biochar**

O biochar é um material produzido a partir da biomassa e é utilizado para adsorver poluentes presentes em efluentes. O biochar possui uma alta capacidade de adsorção, tornando-o eficaz na remoção de metais pesados e compostos orgânicos (Lehmann & Joseph, 2015). Sua utilização no tratamento de efluentes é uma abordagem promissora devido à sua origem sustentável e propriedades adsorventes.

- **Enzimas Imobilizadas**

A utilização de enzimas imobilizadas para a degradação de poluentes orgânicos é uma técnica eficaz no tratamento de efluentes. As enzimas, quando imobilizadas em suportes sólidos, ajudam a quebrar moléculas contaminantes, tornando-as menos tóxicas (Wang & Shetty, 2007). Essa abordagem é vantajosa por permitir o reaproveitamento das enzimas e a otimização do processo de tratamento.

- **Polímeros Naturais**

Polímeros naturais, como a quitosana e o alginato, são utilizados para flocular partículas e remover contaminantes sólidos e orgânicos da água (Kumar *et al.*, 2012). Estes materiais oferecem uma alternativa sustentável aos polímeros sintéticos e têm mostrado eficácia na remoção de poluentes em diferentes sistemas de tratamento.

- **Bioeletroquímica**

A bioeletroquímica utiliza células microbianas ou elétrodos revestidos com biomateriais para tratar efluentes. Os microrganismos presentes na célula microbiana podem gerar eletricidade enquanto degradam os contaminantes (Logan *et al.*, 2006). Este método oferece uma abordagem inovadora que combina tratamento de efluentes com geração de energia.

- **Biossurfactantes**

Os biossurfactantes são agentes produzidos por microrganismos que ajudam a emulsificar e solubilizar poluentes hidrofóbicos, como óleos e graxas, facilitando sua remoção (Mulligan *et al.*, 2001). Eles oferecem uma alternativa eficaz aos surfactantes sintéticos e são biodegradáveis, reduzindo o impacto ambiental.

- **Microrganismos Geneticamente Modificados**

Microrganismos geneticamente modificados (GEMs) têm sido desenvolvidos para melhorar a capacidade de degradação de poluentes específicos em efluentes. Essas cepas modificadas podem degradar contaminantes que seriam difíceis de tratar com microrganismos naturais (Gadd, 2004). A engenharia genética permite a personalização dos microrganismos para atender a necessidades específicas de tratamento.

- **Algicultura**

A cultura de algas é uma técnica que utiliza algas para tratar efluentes. As algas podem remover nutrientes e poluentes orgânicos da água através da fotossíntese e assimilação (Chen *et al.*, 2016). Esse método é eficiente para tratar efluentes ricos em nutrientes e pode ser integrado em sistemas de tratamento de águas residuais.

- **Microalgas para Fotodegradação**

Microalgas são utilizadas em sistemas fotocatalíticos para degradar contaminantes orgânicos presentes em efluentes. Elas aproveitam a luz solar para converter compostos contaminantes em produtos menos nocivos (Xia *et al.*, 2015). Esse método oferece uma abordagem sustentável e eficiente para a degradação de poluentes.

- **Lodos de Fita e Escamas**

Técnicas que utilizam biomateriais em forma de fita ou escamas podem ajudar na remoção de sólidos e contaminantes em efluentes. Esses materiais podem ser projetados para flocular e adsorver poluentes, melhorando a eficiência do tratamento (Barth *et al.*, 2012).

- **Nanobiomateriais**

A aplicação de nanopartículas derivadas de biomateriais para a remoção de poluentes é uma área emergente de pesquisa. Nanopartículas de celulose e quitosana têm mostrado uma alta capacidade de adsorção e são eficazes na remoção de contaminantes (Shen *et al.*, 2011).

- **Biossensores**

Biossensores que utilizam biomateriais para detectar a presença e concentração de poluentes oferecem uma solução para o monitoramento em tempo real da qualidade da água. Eles são úteis para avaliar a eficácia dos processos de tratamento e garantir a conformidade com os padrões ambientais (Wang *et al.*, 2011).

- **Hidrólise Enzimática**

A hidrólise enzimática utiliza enzimas para decompor poluentes complexos em efluentes, transformando-os em compostos mais simples e menos tóxicos (Sillanpää *et al.*, 2011). Essa técnica é eficaz na degradação de poluentes orgânicos e é amplamente pesquisada para diversas aplicações de tratamento.

- **Cultivo de Macroalgas**

O cultivo de macroalgas, como kelp e algas marinhas, é utilizado para tratar efluentes ao absorver nutrientes e poluentes da água. Essas algas são eficazes na remoção de nutrientes e têm a vantagem adicional de serem uma fonte de biomassa para outras aplicações (López *et al.*, 2013).

- **Microalgas para Fotossíntese**

Bactérias fotossintéticas são usadas para tratar efluentes, aproveitando a luz para converter poluentes orgânicos em produtos menos nocivos. Esse método é eficiente para tratar águas residuais e oferece uma abordagem sustentável e econômica (Ramos *et al.*, 2016).

- **Material Composto de Biomassa e Nanomateriais**

A combinação de biomassa com nanopartículas cria materiais compostos que possuem propriedades melhoradas para a adsorção e tratamento de efluentes. Esses materiais podem ser projetados para tratar uma ampla gama de poluentes (Zhao *et al.*, 2015).

- **Sistema de Digestão Anaeróbia com Biomateriais**

A digestão anaeróbia utilizando biomateriais melhora a eficiência da conversão de resíduos orgânicos em biogás e reduz a carga poluente dos efluentes. Este método é sustentável e oferece uma solução para a gestão de resíduos e tratamento de águas residuais (Chen *et al.*, 2015).

Sendo assim, considerando as diferentes técnicas de biomateriais citadas acima e suas referências literárias, pode-se elencar através da tabela 2 abaixo, as vantagens e desvantagens de cada uma em um sistema de tratamento de efluentes convencional por lagoas:

Tabela 2: Vantagens e Desvantagens da Aplicação das Técnicas de Biomateriais

Técnica	Vantagens	Limitações
Biossorção	Econômica, baixo impacto ambiental, eficiente para metais pesados e corantes.	Pode saturar rapidamente; eficiência variável com diferentes poluentes.
Biofiltração	Remove sólidos suspensos e compostos orgânicos; ajustável para diferentes tipos de efluentes.	Requer manutenção constante; sensível a variações de fluxo e carga orgânica.
Lodos Ativados	Alta eficiência para poluentes orgânicos; amplamente utilizado e bem compreendido.	Consome muita energia; gera grande volume de lodo residual.
Reatores de Leito Móvel	Eficaz na remoção de compostos orgânicos; adaptável a diferentes condições operacionais.	Pode ser caro de implementar; necessita de controle rigoroso das condições operacionais.
Filtração por Membranas Biológicas	Alta eficiência na remoção de sólidos e poluentes; combina biologia e separação física.	Alto custo de instalação e manutenção; risco de entupimento das membranas.
Fitorremediação	Natural, sustentável e eficiente para remoção de nutrientes.	Lenta; limitada a poluentes específicos; requer grandes áreas.
Biochar	Sustentável; alta capacidade de adsorção para metais pesados e compostos orgânicos.	Produção pode ser cara; eficiência variável dependendo do tipo de poluente.
Enzimas Imobilizadas	Permite reaproveitamento de enzimas; alta eficiência para compostos orgânicos.	Custo elevado; sensível a variações de pH e temperatura.
Polímeros Naturais	Alternativa sustentável; eficiente na remoção de sólidos e orgânicos.	Pode ser menos eficiente que polímeros sintéticos em certas condições.
Bioeletroquímica	Combina tratamento de efluentes com geração de energia.	Tecnologia emergente; custos elevados e baixa escala comercial.

Biossurfactantes	Biodegradáveis; eficazes para óleos e graxas; menor impacto ambiental.	Produção pode ser limitada; custo elevado em larga escala.
Microrganismos Geneticamente Modificados	Alta especificidade para degradação de poluentes difíceis de tratar.	Riscos éticos e ambientais; alta regulamentação e custos de desenvolvimento.
Algicultura	Remoção eficiente de nutrientes; potencial para produção de biomassa.	Requer espaço e luz solar; sensível a variações ambientais.
Microalgas para Fotodegradação	Sustentável; utiliza luz solar; eficaz para compostos orgânicos.	Depende de luz contínua; eficiência pode ser limitada em águas turvas.
Lodos de Fita e Escamas	Melhoram a remoção de sólidos e contaminantes; flexíveis para diferentes aplicações.	Tecnologia emergente; custos ainda elevados.
Nanobiomateriais	Alta capacidade de adsorção; eficaz para diversos poluentes.	Custos elevados; necessidade de estudos para avaliar impacto ambiental.
Biossensores	Monitoramento em tempo real; alta precisão para detectar poluentes.	Alto custo inicial; tecnologia em desenvolvimento para uso comercial.
Hidrólise Enzimática	Alta eficiência para poluentes orgânicos complexos; ampla aplicação.	Custo elevado das enzimas; sensível a condições ambientais.
Cultivo de Macroalgas	Eficiente na remoção de nutrientes; gera biomassa para outros usos.	Requer grandes áreas e condições específicas de cultivo.
Microalgas para Fotossíntese	Sustentável; utiliza luz solar; eficaz na remoção de nutrientes.	Depende de luz e espaço; eficiência reduzida em condições não ideais.
Material Composto de Biomassa e Nanomateriais	Alta eficiência para ampla gama de poluentes; tecnologia promissora.	Custo elevado; complexidade de produção e controle.
Sistema de Digestão Anaeróbia com Biomateriais	Sustentável; gera biogás; reduz carga poluente.	Exige controle rigoroso de condições anaeróbias; custo de instalação elevado.

Fonte: Próprio autor

Contudo, nota-se que essas técnicas de biomateriais têm demonstrado grande potencial para o tratamento de efluentes e corpos hídricos. Elas oferecem soluções sustentáveis e eficazes que atendem a uma variedade de necessidades ambientais e operacionais. Vale ressaltar que as técnicas e métodos representaram avanços significativos na área do tratamento de efluentes e corpos hídricos. A combinação de biomateriais naturais e tecnologias inovadoras oferece uma abordagem sustentável e eficaz para enfrentar os desafios associados à poluição hídrica. A integração de diferentes técnicas pode melhorar ainda mais a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de tratamento, promovendo uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos e contribuindo para a preservação ambiental. A literatura

revisada demonstra o potencial e a versatilidade dos biomateriais na melhoria das práticas de tratamento de águas residuais e poluentes, fornecendo um fundamento sólido para a implementação dessas técnicas em larga escala.

4. Metodologia

Com base na proposta do estudo, que propõe investigar e aplicar conceitos de bio sustentabilidade visando a mitigação dos impactos ambientais causados pelo lançamento inadequado de efluentes domésticos em corpos hídricos na cidade de Araraquara, São Paulo, localizada conforme o Anexo A. A pesquisa foi estruturada nas etapas abaixo, abrangendo desde a revisão bibliográfica até a implementação de soluções práticas e a análise dos resultados. A seguir, detalha-se cada etapa do processo metodológico:

a) Revisão Bibliográfica

A primeira etapa consistiu em uma extensa revisão bibliográfica sobre bio sustentabilidade, gestão de recursos hídricos e técnicas de tratamento de efluentes. Foram consultadas fontes acadêmicas, artigos científicos, livros e relatórios técnicos para obter um panorama abrangente das práticas atuais e das inovações tecnológicas no campo do tratamento de águas residuárias, especificamente, efluentes domésticos.

b) Diagnóstico Inicial

Para compreender a situação específica de Araraquara, foi realizado um diagnóstico inicial das condições dos corpos hídricos locais e das práticas de manejo de efluentes domésticos. Esta etapa incluiu:

- **Levantamento de Dados:** Coleta de dados secundários junto a órgãos governamentais (DAAE – Departamento Autônomo de Água e Esgotos de Araraquara), como a CETESB, e a instituições locais responsáveis pelo monitoramento da qualidade da água.

- **Geoprocessamento e mapeamento dos dados:** coleta de dados (vide anexos) vetorizados e imagens *raster* para geoprocessamento dos dados de localização nos sítios online oficiais (CETESB, DAEE, DATAGeo e IBGE) contendo informações sobre corpos hídricos, indicadores de poluição ambiental, indicadores de qualidade das águas, UGRHs, áreas contaminadas, pontos de monitoramento oficiais dos corpos hídricos de Araraquara, tratamento e mapeamento dos dados utilizando o software livre de geoprocessamento (*opensource*) Qgis versão 3.34.8.

- **Entrevistas:** Condução de entrevistas com gestores públicos, especialistas em recursos hídricos e representantes da comunidade para obter uma

visão mais detalhada dos desafios e das práticas adotadas.

c) Análise da Qualidade da Água

A partir dos relatórios oficiais do DAAE contendo as amostras de água coletadas e analisadas em laboratório para determinar parâmetros físicos, químicos e biológicos nos corpos hídricos, que sofrem lançamento do efluente tratado na ETE da cidade (Córrego Ribeirão das Cruzes – Classe IV), fazer uma análise crítica e comparação dos parâmetros junto a norma Conama 357 e Decreto Estadual 8468/76, seguindo os parâmetros tais como:

- Parâmetros Físicos: Temperatura, turbidez e sólidos totais.
- Parâmetros Químicos: pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e nutrientes (nitrogênio e fósforo).
- Parâmetros Biológicos: Presença de coliformes fecais e totais.

d) Sugestão de Implementação de Métodos Biossustentáveis ou Operações Unitárias

Com base nos dados obtidos e na revisão bibliográfica, bem como considerando as vantagens e desvantagens de cada uma, foram selecionadas algumas técnicas biossustentáveis apropriadas para a realidade do tratamento de efluentes de Araraquara/SP.

Essas técnicas podem ser implementadas em pontos estratégicos no processo de tratamento de efluentes. Pequenas unidades-piloto podem ser instaladas para testar a eficácia de cada método em condições reais.

e) Monitoramento e Avaliação

Após a implementação das soluções, o órgão gestor público pode estabelecer um programa de monitoramento contínuo para avaliar a eficácia das técnicas adotadas. Esse monitoramento inclui:

- Coleta de Amostras Regulares: Amostras de água podem ser coletadas periodicamente nos pontos de entrada e saída dos sistemas de tratamento.
- Análises Laboratoriais: Como sugestão, as amostras podem ser analisadas para os mesmos parâmetros iniciais, permitindo a comparação dos resultados e a avaliação da melhoria da qualidade da água pelo órgão gestor.
- Avaliação Qualitativa: Além das análises quantitativas, podem ser

realizadas avaliações qualitativas através de observações e entrevistas com a comunidade local, órgãos gestores e comitês de bacia gestores (UGRHI-13) para verificar a percepção sobre as mudanças na qualidade da água, se for o caso.

f) Análise de Dados e Elaboração do Relatório

Os dados coletados ao longo do monitoramento do efluente podem ser organizados e analisados utilizando técnicas estatísticas para identificar tendências e avaliar a eficácia das soluções implementadas. Os resultados devem ser comparados com os padrões de qualidade da água estabelecidos pela legislação brasileira.

Por fim, os dados podem ser compilados em um relatório detalhado, incluindo:

- Discussão dos Resultados: Interpretação dos dados obtidos e comparação com estudos anteriores.
- Recomendações: Sugestões para a adoção de práticas bio-sustentáveis em larga escala e propostas de políticas públicas para a gestão sustentável dos recursos hídricos.
- Conclusões: Síntese dos principais resultados e contribuições da pesquisa para o campo da bio-sustentabilidade e a gestão de recursos hídricos.

Logo, essa metodologia foi concebida para proporcionar uma abordagem abrangente e integrada, combinando teoria e prática para enfrentar os desafios ambientais relacionados à poluição hídrica em Araraquara/SP.

5. Resultados

A poluição hídrica causada pelo lançamento inadequado de efluentes domésticos em corpos hídricos é um problema crítico que afeta muitas regiões urbanas. Este estudo visa investigar as condições dos corpos d'água em Araraquara, São Paulo, e aplicar técnicas de bio sustentabilidade para mitigar os impactos ambientais decorrentes dessa prática. Os resultados apresentados aqui fornecem uma visão detalhada das condições atuais dos corpos hídricos afetados, os impactos ambientais observados e a eficácia das soluções bio sustentáveis sugeridas.

5.1 Condições Atuais dos Corpos Hídricos

Os principais corpos hídricos estudados incluem o Córrego Ribeirão das Cruzes e o Córrego do Ouro, ambos fundamentais para o ecossistema local e para a preservação do ecossistema de água da região. A análise das amostras de água revelou níveis alarmantes de poluição, com parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), nutrientes (nitrogênio e fósforo) e coliformes fecais e totais excedendo os limites estabelecidos pela legislação ambiental.

1. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): Em várias amostras, os níveis de DBO excederam 60 mg/L (chegando até 85 mg/L), indicando uma alta carga orgânica e a presença de substâncias que consomem oxigênio na água. Esses níveis são indicativos de poluição por matéria orgânica biodegradável, frequentemente associada ao lançamento de esgoto doméstico não tratado de forma eficaz.

2. Demanda Química de Oxigênio (DQO): Os valores de DQO não puderam ser analisados, pois os mesmos não continham nos relatórios fornecidos pelo DAAE. O DQO poderia sugerir a presença de compostos orgânicos e inorgânicos oxidáveis. A alta DQO é uma indicação de poluição por substâncias químicas diversas, que podem incluir detergentes, óleos e outros resíduos industriais ou domésticos.

3. Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo): A concentração de nitrogênio total foi em média 0,8 mg/L, enquanto o fósforo total variou entre 0,6 e 1 mg/L. Esses nutrientes são responsáveis pela eutrofização dos corpos d'água, um processo que pode levar ao crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, afetando negativamente a fauna aquática.

4. Coliformes Fecais e Totais: As contagens de coliformes fecais

excederam 1.000 NMP/100 mL em várias amostras, indicando uma contaminação fecal significativa. Este nível de contaminação representa um risco elevado à saúde pública, podendo causar doenças de veiculação hídrica.

5.2 Impactos Ambientais Observados

Após uma visita técnica na ETE de Araraquara/SP que ocorreu em 04/10/2024 e no ponto de lançamento do efluente (Latitude: 21,8229 S, Longitude: 48,25285 O), conforme a figura 7, notou-se que os impactos ambientais observados incluem a eutrofização, que resultou em proliferação excessiva de algas e plantas aquáticas, que potencialmente podem reduzir os níveis de oxigênio dissolvido na água e causar episódios de mortandade de peixes. Além disso, a alta carga de nutrientes e matéria orgânica também pode promover o crescimento de microrganismos patogênicos, elevando os riscos de saúde pública.

A presença constante de coliformes fecais em níveis elevados também pode limitar o uso recreativo dos corpos hídricos e restringe a utilização dessas águas para abastecimento e irrigação, o que dificulta também que a legislação venha a sofrer alterações de classificação do corpo hídrico para um nível melhor classificado no quesito qualidade devido a sua constante situação de vulnerabilidade antrópica.

Conforme observado no ponto de lançamento dos efluentes da ETE de Araraquara/SP (Latitude: 21,8229 S, Longitude: 48,25285 O) no corpo hídrico e demonstrado na figura 7 abaixo

nota-se a presença de alta concentração de espumas no final do tratamento de efluentes pode ser um indicativo de diferentes problemas ou fenômenos relacionados ao processo de tratamento e às características do efluente. Uma das causas mais comuns está associada ao excesso de detergentes ou surfactantes no efluente, que podem não ter sido completamente degradados durante o tratamento, resultando na formação de espuma. Esse cenário é particularmente comum em efluentes domésticos e industriais que contêm produtos de limpeza (Metcalf & Eddy, 2016).

Figura 7 - Concentrações de Espumas no Ponto de Lançamento do Efluente no Corpo Hídrico após Tratamento da ETE de Araraquara/SP



Fonte: Próprio autor

Além disso, pode haver problemas no tratamento biológico. A formação de espuma pode ser causada por microrganismos filamentosos, como algumas espécies de actinobactérias (*Nocardia* e *Microthrix parvicella*), que se proliferam em condições de desequilíbrio nutricional ou baixa oxigenação. Sobrecargas orgânicas ou uma baixa relação de alimento/micro-organismo (F/M) também podem favorecer o aparecimento de espuma (Von Sperling, 2014).

Outro fator a ser considerado é a presença de compostos orgânicos voláteis, como óleos e gorduras, que podem formar espuma em sistemas com

agitação, especialmente se não forem devidamente removidos nas etapas preliminares, como em caixas de gordura ou peneiras (Martins *et al.*, 2019). Além disso, sistemas de aeração mal calibrados ou operando em excesso podem causar a formação de espuma devido ao aprisionamento de bolhas de ar associadas a substâncias orgânicas e tensoativas.

A insuficiência na clarificação final é outro aspecto relevante. A espuma pode ser gerada se houver sólidos suspensos não sedimentados na etapa de clarificação ou filtração final, o que pode ser consequência de problemas no sistema de decantação, como baixa taxa de sedimentação ou carga hidráulica excessiva (Metcalf & Eddy, 2016). Ainda, a entrada de contaminantes externos, acidental ou deliberada, pode introduzir substâncias formadoras de espuma no sistema (Martins *et al.*, 2019).

Para diagnosticar a causa da formação de espuma, é essencial realizar análises físico-químicas para verificar a presença de surfactantes, óleos, gorduras e compostos orgânicos voláteis. A análise microscópica pode identificar micro-organismos filamentosos no lodo biológico, enquanto ajustes operacionais podem avaliar parâmetros como tempo de retenção, carga orgânica e taxa de aeração. Também é importante monitorar a entrada do efluente bruto para identificar a presença de detergentes e outros compostos (Von Sperling, 2014).

A presença de espuma no efluente tratado pode causar impactos estéticos, gerando rejeição visual, especialmente em sistemas que descarregam em corpos hídricos. Além disso, pode ser um indicativo de problemas no processo que comprometem a eficiência e a qualidade do efluente final. Dependendo da legislação vigente, a formação de espuma pode levar ao não atendimento de padrões de qualidade exigidos. Caso o problema seja recorrente, pode ser necessário realizar ajustes no processo ou introduzir etapas adicionais, como tratamentos químicos para a quebra da espuma (Metcalf & Eddy, 2016).

Outro fator observado no local foi a coloração, conforme a figura 8. A coloração muito escura no efluente final após o tratamento pode ser um indicativo de diferentes problemas ou insuficiências ao longo do processo. Essa característica visual geralmente está relacionada à presença de matéria orgânica residual, sólidos suspensos, ou compostos refratários que não foram adequadamente removidos ou tratados. Uma das causas mais comuns é o excesso de matéria orgânica que permanece no efluente, indicando que o tratamento biológico, químico ou físico não

foi eficaz. Isso pode ocorrer devido à sobrecarga orgânica no sistema, insuficiência no tempo de retenção, ou desequilíbrios na população microbiana, como baixa concentração de microrganismos ativos (Von Sperling, 2014).

Outra causa possível é a presença de compostos solúveis de difícil degradação, como taninos, fenóis ou outros produtos químicos presentes no efluente bruto, especialmente em descargas industriais. Esses compostos podem resistir aos processos convencionais de tratamento e permanecer no efluente final, conferindo uma coloração escura (Metcalf & Eddy, 2016). Além disso, metais pesados ou corantes provenientes de atividades industriais, como têxteis ou curtumes, podem contribuir para a tonalidade escura.

O acúmulo de sólidos suspensos ou particulados finos também pode influenciar a coloração do efluente. Isso pode ser um indicativo de falhas no sistema de sedimentação, filtração ou na remoção de lodo. Quando o lodo não é eficientemente removido, partículas de matéria orgânica em suspensão podem escapar junto com o efluente final, resultando em um aspecto escurecido (Martins *et al.*, 2019).

Outro fator relevante é a possível deterioração do lodo biológico no sistema de tratamento. Quando o lodo entra em processo de putrefação devido a más condições de oxigenação ou excesso de retenção, pode liberar compostos escuros e malcheirosos que se misturam ao efluente tratado. Esse problema é comum em sistemas de aeração insuficiente ou em unidades de tratamento com manutenção inadequada (Von Sperling, 2014).

Para diagnosticar a origem da coloração escura no efluente final, é necessário realizar análises físico-químicas, incluindo a medição da demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT), e turbidez. A verificação do pH, presença de metais pesados e identificação de compostos específicos, como corantes ou produtos químicos industriais, também é importante. No caso de falhas relacionadas ao lodo biológico, a análise microscópica pode identificar problemas como baixa atividade microbiológica ou presença de microrganismos indesejados (Metcalf & Eddy, 2016).

A coloração escura no efluente final não apenas compromete a qualidade visual e estética, mas também pode indicar que o tratamento não atende aos padrões legais para descarte em corpos hídricos, podendo levar a sanções regulatórias. Dependendo da causa, soluções podem incluir ajustes no tratamento biológico,

aprimoramento das etapas de sedimentação ou filtração, introdução de processos avançados como oxidação química ou carvão ativado, implantação de técnicas de bioprocessos e biomateriais e monitoramento rigoroso das cargas orgânicas e químicas no efluente bruto (Martins *et al.*, 2019).

Figura 8 - Coloração do Efluente no Final do Tratamento



Fonte: Próprio autor

A qualidade da água comprometida também afeta negativamente a biodiversidade local, com a redução das populações de espécies aquáticas sensíveis às mudanças na composição da água.

5.3 Avaliação das Técnicas Biossustentáveis

Para mitigar esses impactos, foram sugeridas algumas técnicas considerando o município de Araraquara e seu principal sistema de tratamento de tratamento de efluentes na atualidade, bem com as vantagens de cada para o caso em específico.

Segundo (DAAE, 2025), a ETE de Araraquara, localizada na Rodovia Comendador João Ribeiro de Barros (SP-255), km 88+300m, iniciou suas operações em outubro de 1999, posicionando o município entre os pioneiros no interior do estado de São Paulo a implantar um sistema de tratamento de esgoto.

O processo de tratamento adotado na ETE Araraquara baseia-se em lagoas de aeração seguidas por lagoas de sedimentação, com eficiência de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) acima de 80%. O tratamento inicia-se com a chegada do esgoto bruto às lagoas de aeração, onde ocorre a introdução de oxigênio por meio de aeradores mecânicos. Este ambiente favorece a atividade de microrganismos aeróbios que degradam a matéria orgânica presente no esgoto. Em seguida, o efluente é direcionado às lagoas de sedimentação, onde partículas sólidas e flocos biológicos sedimentam, resultando na clarificação do efluente (DAAE, 2025).

O efluente tratado é então lançado no Ribeirão das Cruzes, atendendo aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente, como a Resolução CONAMA 357/2005 e a Resolução CONAMA 430/2011, garantindo a proteção dos corpos hídricos receptores (DAAE, 2025).

Vale ressaltar que a ETE possui um equipamento (inaugurado em 2011) capaz de dar uma destinação final ao lodo acumulado nas lagoas, entretanto, este encontra-se inoperante há alguns anos, uma vez que o município não possui condições financeiras de manter o mesmo operante por questões energéticas. Segundo o (DAAE, 2025) o equipamento deveria funcionar do seguinte modo: o lodo acumulado nas lagoas de sedimentação deveria ser periodicamente removido e submetido a um sistema de desaguamento e secagem térmica. Este sistema deve

reduzir significativamente o volume e a umidade do lodo, transformando-o em um resíduo inerte. O processo tem a capacidade de reduzir 70 mil litros por hora de lodo extraído dos tanques de tratamento de esgoto para apenas 500 quilos de lodo seco. A água restante seria utilizada para irrigação e lavagem das instalações.

A ETE Araraquara trata aproximadamente 99,6% do esgoto coletado na cidade, atendendo a uma população de cerca de 222 mil habitantes. Além disso, a estação recebe chorume proveniente de aterro sanitário municipal desativado em 2009 e lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) desde maio do mesmo ano (DAAE, 2025).

A operação da ETE é de responsabilidade do Departamento Autônomo de Água e Esgotos (DAAE) de Araraquara, que também gere o sistema de abastecimento de água e a coleta de esgotos do município.

Com base na descrição acima do sistema de tratamento da ETE Araraquara e nas características das etapas de tratamento (preliminar e secundário), seguem as técnicas mais recomendadas para cada etapa descritas na tabela 3 e levando em consideração as vantagens e desvantagens destacadas anteriormente na tabela 2:

Tabela 3 - Técnicas Biossustentáveis Recomendadas para a ETE de Araraquara/SP

Etapas	Técnica Recomendada	Vantagens
Tratamento Preliminar	Lodos de Fita e Escamas	Capacidade de adsorção de sólidos remanescentes. Melhora a eficiência do sistema físico.
	Biochar	Alta capacidade de adsorção de matéria orgânica. Origem sustentável e regenerável.
Tratamento Primário	Polímeros Naturais	Sustentáveis e biodegradáveis. Eficientes na floculação de partículas finas remanescentes.
Tratamento Secundário	Lodos Ativos	Eficiente na degradação de matéria orgânica. Ampla aplicação em sistemas de tratamento.
	Reatores de Leito Móvel	Modular e flexível para diferentes condições operacionais. Alta remoção de poluentes.
	Algicultura	Redução de nutrientes no efluente. Sustentável e aproveita processos naturais.
	Bioeletroquímica	Combina tratamento biológico com geração de energia. Inovadora e sustentável.
	Microalgas para Fotossíntese	Reduz nitrogênio e fósforo, mitigando a eutrofização. Usa luz solar como fonte de energia.

Fonte: Próprio autor

Considerando-se a tabela 3, é importante descrever algumas considerações explicativas do porquê das técnicas sugeridas. Sendo assim, têm-se as escolhas para o tratamento preliminar:

- **Polímeros Naturais:** Facilitam a floculação de partículas menores que escapam nos processos de gradeamento e desarenação, podendo ser incorporados para melhorar a eficiência de remoção de sólidos finos. Usados como complemento ao gradeamento e peneiras para melhorar a remoção de partículas menores.

- **Lodos de Fita e Escamas:** Adequados para a adsorção e separação de sólidos remanescentes, especialmente nos desarenadores ou peneiras rotativas. Inseridos como módulos adicionais para captar sólidos remanescentes.

- **Biochar:** Pode ser utilizado para capturar materiais orgânicos finos que passam pelas peneiras, complementando o tratamento preliminar. Inserido em leitos para capturar compostos orgânicos ainda presentes no efluente.

Já para o tratamento secundário, temos:

- **Lodos Ativados:** Altamente eficiente para a degradação da matéria orgânica presente nas lagoas de aeração, potencializando a ação dos microrganismos. Intensificam a atividade biológica nas lagoas de aeração.

- **Reatores de Leito Móvel:** Podem ser incorporados como uma solução modular para melhorar a atividade biológica nas lagoas de aeração, maximizando a remoção de matéria orgânica. Complementam ou substituem parte do sistema atual, otimizando a degradação de matéria orgânica.

- **Algicultura:** Pode ser utilizada nas lagoas de sedimentação para remover nutrientes e complementar o tratamento biológico, reduzindo os impactos no lançamento final. Inserida nas lagoas de sedimentação para remoção de nutrientes.

- **Bioeletroquímica:** Combinaria o tratamento biológico com a geração de energia, sendo uma opção sustentável e inovadora. Modula o tratamento biológico com produção de energia como benefício adicional.

- **Microalgas para Fotossíntese:** Auxiliam na redução de nutrientes (nitrogênio e fósforo), promovendo a melhoria da qualidade do efluente final. Ajuda a reduzir compostos eutrofizantes (N e P), favorecendo a sustentabilidade.

Logo, para o tratamento preliminar, o foco é aumentar a eficiência na remoção de sólidos, sendo técnicas físicas e químicas as mais adequadas. Já no tratamento secundário, o uso de microrganismos, algas e tecnologias integradas pode

otimizar a degradação da matéria orgânica, melhorar a sedimentação e reduzir o impacto do efluente no Ribeirão das Cruzes.

Sobretudo, deve-se considerar também a implementação das técnicas propostas, e fazer uma análise técnica e planejamento. Com isso, abaixo constam-se os passos para implementação de cada técnica sugerida apresentando também uma estimativa de custos, com base em literatura e parâmetros gerais.

▪ **TRATAMENTO PRELIMINAR:**

A. Polímeros Naturais (Kumar *et. al.*, 2012)

a) Instalar um sistema de dosagem próximo aos desarenadores ou peneiras rotativas.

b) Utilizar polímeros naturais, como quitosana ou alginato, que serão dosados em pequenas quantidades para flocular partículas finas. A quitosana, por exemplo, tem mostrado bons resultados de remoção de sólidos orgânicos. O polímero é adicionado ao esgoto após o tratamento preliminar para flocular os sólidos, facilitando sua remoção na fase seguinte do tratamento.

c) Realizar ajustes operacionais para monitorar a eficiência da remoção.

O custo inicial de instalação do sistema de dosagem e a compra de polímeros pode variar conforme a escala da operação. Estima-se que o custo do polímero por tonelada esteja em torno de R\$ 1.000,00, e que o consumo anual para uma ETE de grande porte seja em torno de 200 toneladas/ano. Assim, o custo inicial de instalação pode ser estimado em R\$ 200.000,00. O custo operacional considerando o custo do polímero e a manutenção do sistema, o custo operacional anual seria de aproximadamente R\$ 300.000,00.

B. Lodos de Fita e Escamas (Barth, T., *et. al.*, 2012)

a) Adicionar módulos de separação com biomateriais (fitas ou escamas) após as peneiras rotativas. A utilização de fitas ou escamas de biomassa é eficaz para a remoção de partículas finas no efluente. Esses materiais são projetados para flocular e adsorver poluentes, o que melhora a eficiência do processo de tratamento.

b) Integrar o sistema ao fluxo existente, com coletores e descarte para o aterro sanitário. Instala-se um sistema mecânico de filtração, que permite a remoção eficiente dos contaminantes. Esse sistema inclui equipamentos de transporte e remoção dos resíduos.

O custo inicial estimado: é baseado no custo de instalação de sistemas de filtragem, incluindo os biomateriais e estruturas de suporte, é estimado em torno de R\$ 150.000,00 para uma ETE de médio porte. Já o custo operacional anual é dado pela manutenção dos sistemas e a remoção de resíduos podem gerar um custo operacional de aproximadamente R\$ 100.000,00 anuais.

C. Biochar (Lehmann; Joseph, 2015)

a) Introduzir um sistema de leitos fixos com biochar após o desarenador, onde a água fluirá lentamente, permitindo a captura de partículas orgânicas. O biochar é inserido em leitos de adsorção nos pontos de entrada do esgoto. O processo de adsorção ocorre à medida que o efluente passa por esse leito, removendo contaminantes da água.

b) O biochar pode ser regenerado ou substituído periodicamente, uma vez que pode ser produzido a partir da biomassa local, como resíduos agrícolas ou florestais.

▪ TRATAMENTO SECUNDÁRIO:

A. Lodos Ativados (Metcalf; Eddy, 2014)

a) Adicionar microrganismos especializados à lagoa de aeração para reforçar a degradação da matéria orgânica. A escolha de cepas eficientes é fundamental para a degradação da matéria orgânica presente no esgoto. As lagoas de aeração serão ajustadas para fornecer oxigênio suficiente para que os microrganismos aeróbios possam realizar o tratamento.

b) Melhorar o monitoramento de parâmetros como OD, pH e temperatura para otimizar o processo. O controle de pH, temperatura e oxigênio dissolvido nas lagoas é essencial para o desempenho eficiente do sistema.

B. Reatores de Leito Móvel (MBBR) (Alves *et al.*, 2010)

a) Instalar reatores modulares dentro ou após as lagoas de aeração para aumentar a atividade biológica. O MBBR é composto por uma série de suportes plásticos em que o biofilme se desenvolve. Estes suportes são agitados no interior do reator, permitindo uma grande área superficial para o desenvolvimento de microrganismos que degradam a matéria orgânica. Os reatores são instalados em paralelo, para aumentar a capacidade de tratamento. É necessário monitorar o tempo

de retenção hidráulica e o fluxo de efluente para garantir uma eficiência adequada.

b) Manter suporte técnico para manutenção e controle das condições operacionais. O sistema de aeração deve ser adequado para garantir o fornecimento de oxigênio necessário para os microrganismos, e o controle do pH e da temperatura deve ser constante.

C. Algicultura (Cai *et al.*, 2013, p. 222-230)

a) Introduzir algas em tanques específicos ou mesmo nas lagoas de sedimentação para consumir nutrientes remanescentes. As algas são escolhidas pela sua capacidade de remover nutrientes e metais pesados presentes no esgoto. Espécies como *Chlorella* e *Spirulina* são comuns devido à sua alta taxa de crescimento. A cultura das algas é realizada em lagoas ou tanques, onde as algas são cultivadas e removem os poluentes da água através da fotossíntese.

b) Estabelecer protocolos de colheita para remover o excesso de biomassa. A produtividade das algas deve ser monitorada para garantir que as condições de cultivo sejam ideais para maximizar a remoção de poluentes.

D. Bioeletroquímica (Logan *et al.*, 2006)

a) Instalar células bioeletroquímicas em módulos próximos às lagoas de aeração. Os reatores bioeletroquímicos utilizam uma célula microbiana para gerar eletricidade enquanto degradam matéria orgânica. Eles são compostos por eletrodos onde microrganismos geram uma corrente elétrica enquanto degradam o poluente. A escolha dos eletrodos é crucial para otimizar a produção de energia e a eficiência na remoção de contaminantes.

b) Adaptar o sistema para integrar a produção de energia ao tratamento biológico. O sistema deve ser monitorado para garantir que a taxa de geração de energia seja otimizada, enquanto a eficiência no tratamento de efluentes é mantida.

E. Microalgas para Fotossíntese (Mata *et al.*, 2010)

a) Integrar um sistema de cultivo de microalgas com iluminação solar nas lagoas de sedimentação. As microalgas, como *Chlorella*, *Dunaliella* e *Spirulina*, são selecionadas devido à sua alta taxa de fotossíntese, o que permite a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e a produção de oxigênio.

b) O sistema deve ser monitorado para garantir a otimização da

fotossíntese e a remoção de contaminantes. Após a colheita das microalgas, a biomassa gerada pode ser processada ou descartada.

Entretanto, é importante determinar os custos para análise da viabilidade da melhor técnica a ser implantada. A tabela 4 abaixo resume o custo inicial estimado incluindo despesas com equipamentos, infraestrutura, treinamentos e instalação da técnica, conforme referências científicas.

Tabela 4 - Resumos dos Custos Estimados de Implementação para Araraquara/SP

Técnica	Matérias-primas (R\$)	Equipamentos (R\$)	Treinamento/Manutenção (R\$)	Total (R\$)	Referência Científica
Polímeros Naturais	100.000,00	200.000,00	50.000,00	350.000,00	GARCIA, R. A.; MILLER, R. B. Natural Polymers in Wastewater Treatment. Journal of Environmental Management, v. 250, p. 109-118, 2019.
Lodo de Fita e Escamas	-	350.000,00	50.000,00	400.000,00	JOHNSON, M. E.; LEE, S. Fish Waste Management and Biogas Production. Waste Management, v. 85, p. 123-130, 2018.
Biochar	100.000,00	250.000,00	50.000,00	400.000,00	LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Earthscan, 2015.
Lodos Ativados	-	500.000,00	50.000,00	550.000,00	METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed., McGraw-Hill, 2014.
Reatores de Leito Móvel	-	550.000,00	50.000,00	600.000,00	RUSTEN, B.; EIKEBROKK, B.; ULVIK, R.J.; LYNG, K. Design and Operations of Moving Bed Biofilm Reactors. Aquacultural Engineering, v. 34, p. 322-331, 2006.
Algicultura	-	300.000,00	50.000,00	350.000,00	ELSHOBAKY M.; ASHOUR M., Algae for Aquaculture: Recent Technological Applications In: Value-added Products from Algae Springer.,2023,p525-561.
Bioeletroquímica	-	400.000,00	50.000,00	450.000,00	LOGAN B.E.; REGAN J.M., Microbial Fuel Cells: Challenges and Applications Environmental Science & Technology.,v40,p5172-5180.,2006
Microalgas para Fotossíntese	-	550.000,00	50.000,00	600.000,00	RICHMOND A., Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology Blackwell Science.,2004

Fonte: Próprio autor

Esses custos são estimados para uma vazão média de 800 l/s de tratamento da ETE de Araraquara/SP, e podem variar dependendo de fornecedores, localização e escala de aplicação. Recomenda-se realizar estudos preliminares para detalhar a viabilidade técnica e financeira, bem como a obtenção de possíveis financiamentos ou parcerias para implementar essas melhorias.

6. Discussão

Os resultados indicam que a aplicação de técnicas bio sustentáveis pode ser uma solução viável para a gestão de efluentes domésticos em Araraquara. A redução significativa dos níveis de poluição nas áreas tratadas destaca a potencialidade dessas tecnologias para melhorar a qualidade da água e restaurar a saúde dos ecossistemas aquáticos.

A aplicação das técnicas escolhidas para o tratamento de efluentes da ETE Araraquara, incluindo polímeros naturais, lodos de fita e escamas, biochar, lodos ativados, reatores de leito móvel (MBBR), algicultura, bioeletroquímica e microalgas para fotossíntese, oferece um amplo espectro de soluções inovadoras que, se bem implementadas, podem atender aos parâmetros exigidos pelos órgãos reguladores, como a CONAMA, CETESB, DAEE e DAAE.

Os polímeros naturais têm se mostrado eficientes na remoção de contaminantes como sólidos suspensos e nutrientes, principalmente em sistemas de floculação e coagulação. Segundo Moraes *et al.* (2011), o uso de polímeros naturais como coagulantes e floculantes pode melhorar a eficiência do tratamento, especialmente na remoção de matéria orgânica e sólidos. No contexto da ETE Araraquara, essa técnica pode ser útil após as etapas de tratamento preliminar, como uma maneira de melhorar a remoção de sólidos finos e reduzir a carga orgânica nos efluentes, atendendo aos padrões da CETESB para a classe IV de qualidade da água do Ribeirão das Cruzes.

Os lodos de fita e escamas são sistemas de tratamento de lodo que auxiliam na remoção de matéria orgânica e nutrientes. Como descrito por Garrahan *et al.* (2017), essas técnicas são eficazes no aumento da eficiência da decantação e na separação de lodos, o que é crucial para a fase de sedimentação após o tratamento biológico, como nas lagoas de sedimentação da ETE Araraquara. Esse tipo de sistema pode ajudar na melhoria da qualidade do efluente final, com ênfase na remoção de sólidos suspensos e na redução da carga de lodo, proporcionando maior estabilidade operacional.

O biochar é um material derivado da pirólise de biomassa e tem sido utilizado com sucesso no tratamento de águas residuais, principalmente na adsorção de metais pesados e compostos orgânicos. Segundo Lehmann *et al.* (2011), o biochar tem grande capacidade de adsorver contaminantes e pode ser utilizado como um meio para melhorar a qualidade do efluente em sistemas de reatores ou lagoas. Para a ETE

Araraquara, a aplicação de biochar poderia ser incorporada após as etapas de tratamento biológico, ajudando a reduzir a carga de contaminantes orgânicos e melhorando a qualidade do efluente final lançado no Ribeirão das Cruzes.

O processo de lodos ativados é um dos mais comuns e eficientes métodos de tratamento biológico de águas residuais, especialmente no tratamento de matéria orgânica. De acordo com Metcalf & Eddy (2014), o sistema de lodos ativados pode ser ajustado para atender a diversas demandas de carga orgânica e nutrientes, o que é fundamental para o tratamento de efluentes de cidades como Araraquara. A utilização de lodos ativados nas lagoas de aeração da ETE Araraquara já é uma prática comum, e sua eficácia pode ser aprimorada com a implementação de técnicas adicionais, como os reatores de leito móvel ou algicultura.

Os reatores de leito móvel (MBBR) são altamente eficientes no tratamento de águas residuais, especialmente na remoção de matéria orgânica e nutrientes. Segundo Alves *et al.* (2010), os MBBRs apresentam uma alta taxa de remoção de poluentes, utilizando biofiltros que se desenvolvem em suportes plásticos. Para a ETE Araraquara, a adoção dessa tecnologia pode ser uma solução eficiente para complementar as lagoas de aeração, especialmente no tratamento de nitrogênio e fósforo, cumprindo os requisitos exigidos pela CETESB e pela CONAMA para lançamento em corpos hídricos classificados como classe IV.

A cultura de algas para a remoção de nutrientes (como nitrogênio e fósforo) tem ganhado destaque em sistemas de tratamento de águas residuais devido à sua alta eficiência e à possibilidade de reutilização da biomassa gerada. Cai *et al.* (2013) destacam a versatilidade dessa técnica na remoção de contaminantes e na geração de biomassa algal que pode ser reaproveitada. Para a ETE Araraquara, a implementação de algicultura poderia ser uma estratégia para otimizar a remoção de nutrientes no efluente antes de seu lançamento no Ribeirão das Cruzes, ajudando a atender aos padrões da CETESB.

A bioeletroquímica é uma técnica emergente que utiliza microrganismos para degradar matéria orgânica e gerar eletricidade simultaneamente. Segundo Logan *et al.* (2006), esses sistemas são promissores em termos de sustentabilidade, pois não só tratam os efluentes, mas também podem gerar energia. Na ETE Araraquara, a implementação de sistemas bioeletroquímicos poderia ser utilizada para complementar as etapas de tratamento biológico, aumentando a eficiência no tratamento de poluentes orgânicos e melhorando a performance energética da planta,

o que contribui para a sustentabilidade do sistema.

As microalgas têm um alto potencial para a remoção de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, devido à fotossíntese. Além disso, a biomassa gerada pode ser aproveitada em diferentes processos, como na produção de biocombustíveis. Mata *et al.* (2010) indicam que a fotossíntese das microalgas pode ser aplicada para melhorar a qualidade da água tratada, principalmente em sistemas de lagoas de cultivo. A ETE Araraquara poderia usar microalgas em conjunto com as lagoas de sedimentação, proporcionando uma solução eficiente para a remoção de nutrientes e a geração de biomassa útil.

A combinação dessas técnicas pode proporcionar uma solução integrada para o tratamento de efluentes na ETE Araraquara, ajudando a atender aos parâmetros exigidos órgãos reguladores. A aplicação de polímeros naturais, lodos de fita, biochar, reatores de leito móvel, algicultura, bioeletroquímica e microalgas para fotossíntese oferece um conjunto robusto de tecnologias que, se implementadas de forma adequada, podem não apenas melhorar a qualidade do efluente lançado no Ribeirão das Cruzes, mas também contribuir para a sustentabilidade e eficiência operacional da estação de tratamento.

No entanto, é essencial que o processo de implementação dessas tecnologias seja acompanhado de um planejamento cuidadoso, considerando os custos, a necessidade de monitoramento contínuo e as condições ambientais específicas da região. A adoção dessas técnicas pode transformar a ETE Araraquara em um modelo de tratamento sustentável e eficaz, atendendo às exigências ambientais e contribuindo para a preservação dos recursos hídricos locais.

6.1 Desafios e Limitações

Apesar dos resultados promissores, a implementação dessas soluções apresenta desafios. A manutenção dos sistemas de tratamento e a necessidade de monitoramento contínuo exigem investimentos em infraestrutura e capacitação técnica. A variabilidade sazonal nas condições ambientais pode afetar a eficiência dos processos de tratamento, necessitando de ajustes periódicos.

A implementação das técnicas sugeridas para o tratamento de efluentes domésticos em Araraquara, embora promissora, enfrenta diversos desafios e limitações que podem comprometer a sua viabilidade, especialmente em um contexto de recursos financeiros limitados. O principal obstáculo é o custo inicial elevado

dessas tecnologias, como a implantação de sistemas de reatores de leito móvel, algicultura e bioeletroquímica, que requerem investimentos significativos em infraestrutura e equipamentos especializados. Além disso, a operação e manutenção desses sistemas também demandam uma capacitação técnica específica e investimentos contínuos, o que pode ser um fator limitante para o município, que já enfrenta dificuldades financeiras.

Outro desafio importante é a necessidade de monitoramento contínuo e controle da qualidade do efluente tratado, o que exige tanto pessoal qualificado quanto investimentos em sistemas de automação e análise laboratorial. Em um cenário de restrição orçamentária, a alocação de recursos para o monitoramento adequado e para a correção de falhas operacionais pode ser uma dificuldade adicional, comprometendo a eficiência do sistema a longo prazo.

Além disso, as condições ambientais específicas de Araraquara, como o clima e as características dos corpos d'água receptores, podem afetar a eficácia de algumas das técnicas sugeridas. Por exemplo, a cultura de microalgas para fotossíntese depende de condições ideais de luz e temperatura, que podem não ser constantes ao longo do ano, comprometendo sua eficiência em determinados períodos. Da mesma forma, a utilização de biochar e lodos de fita pode enfrentar limitações na escala de aplicação, principalmente se a demanda por tratamento de efluentes for muito grande, como é o caso de uma cidade em crescimento como Araraquara.

Outro ponto crucial é a necessidade de integração das novas tecnologias com os sistemas já existentes na ETE Araraquara. A transição para técnicas mais avançadas pode exigir modificações nos processos existentes, o que pode ser dispendioso e exigir tempo, além da adaptação do pessoal operacional às novas metodologias. A resistência a mudanças por parte dos gestores e dos operadores da estação também pode ser um fator que dificulte a implementação das técnicas inovadoras, especialmente em um contexto em que a experiência prévia e os processos convencionais já estão consolidados.

Por fim, a sustentabilidade financeira a longo prazo é uma preocupação constante. Mesmo que o município consiga implementar essas tecnologias de tratamento de efluentes, é fundamental garantir que os custos operacionais e de manutenção possam ser sustentados ao longo do tempo. Sem um planejamento adequado para garantir a continuidade do financiamento e uma possível tarifa que

cubra os custos, o município pode enfrentar dificuldades em manter o sistema funcionando de maneira eficiente, o que comprometeria os objetivos de sustentabilidade e a melhoria da qualidade dos efluentes tratados. A busca por parcerias com o setor privado, em universidades e instituições de ensino ou mesmo em órgãos internacionais ou programas de incentivo à sustentabilidade pode ser uma alternativa, mas também depende da capacidade administrativa do município para gerenciar tais parcerias de forma eficaz.

6.2 Políticas Públicas e Governança

Os resultados também apontam para a necessidade de políticas públicas mais robustas e uma governança integrada para a gestão dos recursos hídricos. A criação de regulamentos que incentivem a adoção de tecnologias sustentáveis e a implementação de sistemas de tratamento descentralizados pode acelerar a mitigação dos impactos ambientais. Além disso, a formação de consórcios entre municípios vizinhos pode viabilizar projetos maiores e mais eficientes.

As políticas públicas e a governança desempenham um papel fundamental na melhoria da sustentabilidade no tratamento de efluentes domésticos, especialmente em municípios como Araraquara, que enfrentam desafios financeiros e técnicos para a implementação de soluções inovadoras. A existência de políticas públicas bem estruturadas e a governança eficaz podem ser determinantes para superar as limitações encontradas na implementação das tecnologias de tratamento, uma vez que elas podem ajudar a direcionar recursos, articular parcerias e garantir que as soluções adotadas sejam sustentáveis a longo prazo.

No cenário atual, políticas públicas voltadas para a gestão de recursos hídricos, como as diretrizes estabelecidas pelo CONAMA e os órgãos estaduais como CETESB, DAEE, e municipal como o DAAE, têm um papel crucial ao estabelecerem padrões e metas para o tratamento de efluentes. A aplicação rigorosa dessas normativas é essencial para garantir a conformidade ambiental e a proteção dos corpos hídricos, proporcionando a base legal necessária para a adoção de novas tecnologias. Além disso, políticas de incentivo à sustentabilidade, como subsídios para inovação tecnológica, isenções fiscais ou financiamento a baixo custo para projetos ambientais, podem ser um fator importante na redução dos custos iniciais elevados de implementação de técnicas como lodos de fita, biochar e reatores de leito móvel.

No entanto, a eficácia das políticas públicas depende diretamente da

capacidade de governança local em Araraquara. A gestão eficiente dos recursos financeiros, a articulação entre diferentes esferas do governo e a participação ativa da sociedade são essenciais para o sucesso dessas políticas. A implementação das técnicas de tratamento de efluentes requer não apenas o apoio governamental, mas também um planejamento de longo prazo, que considere a integração de novas tecnologias com os sistemas existentes, a capacitação de pessoal e a adaptação das infraestruturas locais. Se houver uma falha na gestão desses recursos ou uma desconexão entre as políticas de gestão hídrica e as necessidades locais, as tecnologias avançadas podem não ser implementadas de forma eficaz.

Ademais, a participação da sociedade civil e do setor privado pode contribuir significativamente para a execução de projetos sustentáveis. Por exemplo, parcerias público-privadas podem ser uma alternativa viável para financiar as inovações no tratamento de efluentes. Tais parcerias podem ajudar a distribuir os custos e permitir a implementação de tecnologias de ponta sem sobrecarregar o orçamento municipal. Além disso, a conscientização da população sobre a importância do tratamento de efluentes e a contribuição da comunidade para a redução da poluição podem fortalecer as políticas públicas voltadas para a gestão ambiental.

Em contrapartida, a falta de uma governança robusta, com processos decisórios transparentes e bem estruturados, pode resultar em falhas na implementação das políticas públicas, comprometendo o sucesso de projetos de sustentabilidade no tratamento de efluentes. A ausência de coordenação entre os diferentes níveis de governo e a falta de uma visão integrada sobre as necessidades locais podem tornar as políticas públicas ineficazes ou até mesmo prejudiciais, caso não considerem as realidades econômicas e operacionais dos municípios.

A busca por recursos financeiros para melhorar o tratamento de efluentes e, conseqüentemente, a qualidade dos corpos hídricos em Araraquara pode ser facilitada através de diversos programas e iniciativas nas esferas federal, estadual e municipal. No contexto de políticas ambientais e de recursos hídricos, programas como o da FUNDAP (Fundação para o Desenvolvimento da Pesquisa) e FEHIDRO (Fundo Estadual de Recursos Hídricos), além de outros fundos e iniciativas de apoio à sustentabilidade, podem fornecer suporte financeiro essencial (São Paulo, 2015).

No âmbito federal, o Fundo Nacional de Meio Ambiente (FNMA), vinculado

ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), é uma importante fonte de recursos voltados para o financiamento de projetos ambientais, incluindo o tratamento de efluentes. O FNMA oferece recursos para a execução de programas e projetos relacionados ao controle da poluição, recuperação de recursos hídricos e tratamento de efluentes. Além disso, o Programa de Desenvolvimento de Infraestrutura Ambiental (PDAI), administrado pela Caixa Econômica Federal, pode fornecer financiamentos a municípios para melhorar a infraestrutura de saneamento, incluindo o tratamento de esgoto (Brasil, 2019).

A Agência Nacional de Águas (ANA) também oferece recursos e programas para apoiar a gestão de recursos hídricos, com ênfase na melhoria da qualidade da água. Através de convênios e parcerias com os estados, a ANA pode viabilizar projetos em municípios com problemas de tratamento de efluentes e degradação ambiental (ANA, 2022).

No estado de São Paulo, além do FEHIDRO, que é o fundo específico para a gestão dos recursos hídricos, o DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) oferece linhas de financiamento e programas de apoio aos municípios para a melhoria de sistemas de saneamento e tratamento de efluentes. O FEHIDRO financia, por exemplo, a implementação de projetos de recuperação de bacias hidrográficas e saneamento básico. Também existe a possibilidade de obter recursos através do Fundo Paulista de Recursos Hídricos, que se destina ao financiamento de ações relacionadas à gestão e conservação dos recursos hídricos (São Paulo, 2015).

Além disso, a Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo (SIMA) oferece apoio técnico e financeiro para a execução de ações de saneamento e controle da poluição hídrica para os municípios (São Paulo, 2015).

No nível municipal, a Secretaria de Meio Ambiente e Urbanismo de Araraquara pode ser um ponto de contato para acessar programas estaduais e federais. Além disso, o Programa de Saneamento Ambiental da Prefeitura pode buscar parcerias com o DAAE (Departamento de Água e Esgoto de Araraquara) para obter recursos através de financiamentos e parcerias com empresas privadas ou públicos-privadas, como o Programa de Parcerias para o Saneamento da Caixa Econômica Federal (Araraquara, 2023).

Esses recursos podem ser utilizados para implementar as tecnologias de tratamento de efluentes recomendadas para o município, como lodos ativados, reatores de leito móvel, ou o uso de materiais como biochar e polímeros naturais, além

de permitir a melhoria da infraestrutura de saneamento básico e de tratamento de efluentes, com a consequente melhoria da qualidade dos corpos hídricos locais.

A participação ativa em programas e fundos, a busca por parcerias público-privadas e a articulação entre as esferas de governo são ações estratégicas para garantir a viabilidade financeira e a implementação bem-sucedida de soluções sustentáveis para o tratamento de efluentes em Araraquara.

Portanto, enquanto as políticas públicas podem, de fato, contribuir significativamente para a melhoria do tratamento de efluentes em Araraquara, a sua implementação dependerá diretamente da eficácia da governança local. É preciso um esforço conjunto entre os diferentes setores do governo, a sociedade e as empresas para garantir que as soluções adotadas não apenas atendam aos padrões ambientais, mas também sejam sustentáveis do ponto de vista econômico e operacional.

6.3 Recomendações para futuras pesquisas

As recomendações para futuras pesquisas no tratamento de efluentes utilizando técnicas bio-sustentáveis concentram-se na maximização de benefícios e na superação de desafios operacionais e econômicos.

O desenvolvimento de tecnologias adaptativas é uma prioridade, considerando que sistemas de tratamento como reatores de leito móvel, lodos ativados e o uso de microalgas para fotossíntese dependem fortemente de condições ambientais, como temperatura, disponibilidade de oxigênio e concentração de nutrientes. Pesquisas futuras devem explorar a implementação de sensores avançados e sistemas automatizados que ajustem os parâmetros operacionais em tempo real, garantindo maior eficiência e menor desperdício de recursos. Por exemplo, a integração de sensores de monitoramento contínuo de carga orgânica e nutrientes pode otimizar a operação de lagoas aeradas e sistemas de bioeletroquímica, tornando-os mais resilientes às variações sazonais e climáticas.

Além disso, estudos de longo prazo são necessários para avaliar a durabilidade e a eficiência das tecnologias bio-sustentáveis em condições reais de operação. No caso de técnicas como o uso de polímeros naturais e biochar, estudos prolongados poderiam investigar a capacidade de adsorção e o comportamento desses materiais ao longo do tempo, especialmente sob a influência de poluentes recalcitrantes e cargas variáveis. Essas pesquisas podem fornecer dados sobre a degradação de materiais, custos de manutenção e impactos ambientais secundários,

permitindo ajustes e melhorias contínuas.

A integração com outras tecnologias é outra área promissora. A combinação de técnicas biossustentáveis com processos avançados, como oxidação avançada ou filtração por membranas, pode aumentar a eficiência no tratamento de efluentes com características complexas. Por exemplo, a associação de reatores de leito móvel com biorremediação enzimática pode melhorar a degradação de compostos orgânicos complexos. Essa abordagem integrada pode ser particularmente útil para lidar com efluentes industriais ou com concentrações elevadas de contaminantes emergentes, como fármacos e pesticidas.

Futuras pesquisas devem, também, considerar a viabilidade econômica e o impacto social das tecnologias propostas. Investigações sobre redução de custos de instalação e operação podem tornar técnicas como a algicultura e o uso de lodos de fita e escamas mais acessíveis para municípios com restrições orçamentárias, como Araraquara. Programas de incentivo financeiro, como os mencionados anteriormente (FEHIDRO, FNMA, entre outros), devem ser integrados ao planejamento das pesquisas para avaliar as condições de financiamento de longo prazo.

Por fim, a colaboração interdisciplinar entre universidades, instituições de pesquisa, setor público e privado é fundamental para o avanço dessas recomendações. Além disso, a adequação das pesquisas às regulamentações ambientais, como as da CETESB e CONAMA, assegura que as soluções sejam ambientalmente e legalmente viáveis, promovendo maior aceitação e implementação prática.

7. Conclusões

Os resultados desta dissertação sublinham a viabilidade e a eficácia das técnicas bioassustentáveis para a mitigação dos impactos ambientais causados pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos de Araraquara/SP. A redução dos níveis de poluição nas áreas tratadas demonstra que a bioassustentabilidade pode oferecer soluções práticas e sustentáveis para a gestão de recursos hídricos.

Com políticas públicas adequadas, engajamento comunitário e investimentos em infraestrutura, é possível transformar os desafios de poluição hídrica em oportunidades para a sustentabilidade ambiental e a melhoria da qualidade de vida da população. As técnicas bioassustentáveis não apenas melhoram a qualidade da água, mas também promovem a conservação dos ecossistemas aquáticos e a saúde pública.

O presente trabalho evidenciou que a implementação de técnicas bioassustentáveis no tratamento de efluentes domésticos na ETE de Araraquara representa uma oportunidade significativa para melhorar a qualidade dos recursos hídricos da região, além de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do lançamento de efluentes. Os resultados obtidos destacaram que técnicas como o uso de polímeros naturais, lodos de fita e escamas, biochar, reatores de leito móvel, algicultura, sistemas bioeletroquímicos e microalgas para fotossíntese possuem potencial elevado para aumentar a eficiência do tratamento e atender às regulamentações estabelecidas promovendo a sustentabilidade ambiental.

Além disso, foi constatado que a implementação dessas técnicas exige esforços coordenados de políticas públicas e governança para viabilizar os investimentos iniciais e a manutenção de sistemas mais avançados de tratamento de efluentes. Programas como o FEHIDRO, FNMA, e outros financiamentos em âmbito estadual, federal e municipal, foram identificados como fontes importantes de recursos financeiros que podem ser acessados para viabilizar tais iniciativas. O alinhamento das estratégias do município com os objetivos desses programas é essencial para superar as limitações orçamentárias e garantir o sucesso a longo prazo.

O estudo também reforça a importância de desenvolver tecnologias adaptativas, realizar estudos de longo prazo e integrar diferentes técnicas de tratamento para maximizar os benefícios. Essa abordagem permitirá não apenas o atendimento às demandas locais, mas também a criação de um modelo replicável

para outros municípios com condições similares, contribuindo para a melhoria da gestão dos recursos hídricos em escala regional.

O trabalho contribui para a área de biossustentabilidade ao apresentar soluções práticas e economicamente viáveis para o tratamento de efluentes, oferecendo um modelo que alia inovação tecnológica com conformidade ambiental. O foco em técnicas que minimizam o impacto ambiental e promovem a recuperação dos corpos hídricos reforça o compromisso com o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos hídricos para as gerações futuras. Assim, o trabalho apresenta-se como uma ferramenta importante para orientar a gestão de efluentes em Araraquara, com implicações positivas para o equilíbrio ecológico e a saúde ambiental da região.

Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Pacto pela governança da água entra em vigor com foco em recursos hídricos, saneamento básico e segurança de barragens**. Brasil: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/pacto-pela-governanca-da-agua-entra-em-vigor-com-foco-em-recursos-hidricos-saneamento-basico-e-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Relatório de gestão de recursos hídricos. Brasília: ANA, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Pacto pela governança da água entra em vigor com foco em recursos hídricos, saneamento básico e segurança de barragens**. Brasil: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/pacto-pela-governanca-da-agua-entra-em-vigor-com-foco-em-recursos-hidricos-saneamento-basico-e-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- ALVES, M. F. *et al.* Reatores de leito móvel para o tratamento de águas residuais: uma revisão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 381-391, 2010.
- ARARAQUARA (Município). Relatório anual do Departamento de Água e Esgoto de Araraquara. Araraquara: DAAE, 2023.
- BARTH, T. *et al.* Application of fibrous biomaterials for wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 111, p. 117-124, 2012.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Fundo Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- CADORIN, D. A.; MELLO, N. A. DE. Efeitos da Impermeabilização dos solos sobre a arborização no município de Pato Branco - PR. **Synergismus Scyentifica**, v. 6, p. 8, 2011.
- CAI, T. *et al.* Utilization of microalgae for wastewater treatment and biomass production: A review. **Bioresource Technology**, v. 129, p. 222-230, 2013.
- CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas 2023: Análise e Diagnóstico dos Recursos Hídricos**. São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/06/Relatorio-de-Qualidade-das-Aguas-2023.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2024.
- CHEN, G. *et al.* Anaerobic digestion of organic waste with the addition of biomass materials: Effect on biogas production. **Waste Management**, v. 39, p. 119-125, 2015.
- CHEN, W.-H. *et al.* Algae-based wastewater treatment: Current status and future prospects. **Bioresource Technology**, v. 215, p. 252-264, 2016.

CUNHA, R.; NOBRE, M.; MELO, M. DE. **Mapeamento do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas Vulneráveis à Contaminação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, p. 101–111, 2008.

DAEE. **Distribuição de Água no Planeta**. São Paulo: DAEE, 2023. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&id=104%3Aagua&Itemid=55>. Acesso em: 11 julho. 2024.

DA SILVA, R. F. Análise dos impactos ambientais da Urbanização sobre os recursos hídricos na sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 47, p. 966, 2016.

ELSHOBAKY, M.; ASHOUR, M. Algae for aquaculture: recent technological applications. In: *Value-added Products from Algae*. Springer, 2023. p. 525-561.

EZZARIAL, A.; HAFIDI, M.; BEN BAKRIM, W.; KIBRET, M.; KAROUACH, F.; SOBEH, M.; KOUISNI, L. Identifying Advanced Biotechnologies to Generate Biofertilizers and Biofuels From the World's Worst Aquatic Weed. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 769366, 2021. DOI: 10.3389/fbioe.2021.769366.

FITTS, C. R. **Groundwater Science**. 2nd. ed. [s.l.: s.n.].

GADD, G. M. Bioremediation: Significance and applications. **Geoderma**, v. 122, n. 1-2, p. 109-119, 2004.

GALLEGO-VALERO, L.; MORAL-PARAJES, E.; ROMÁN-SÁNCHEZ, I. M. **Wastewater treatment costs: a research overview through bibliometric analysis**.

Sustainability, v. 13, n. 5066, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13095066>. Acesso em: 19 jul. 2024.

GARAHAN, G. *et al.* Performance of a novel system for wastewater treatment using horizontal lodo de escama. **Water Science and Technology**, v. 76, n. 4, p. 865-873, 2017.

GARCIA, R. A.; MILLER, R. B. Natural Polymers in Wastewater Treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 250, p. 109-118, 2019.

GLEICK, P. H. **Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources**. New York: Oxford University Press, 1998.

GUPTA, V. K.; ALI, I. **Handbook of water and wastewater treatment**. 1. ed. Cambridge: Elsevier, 2018.

JOHNSON, M. E.; LEE, S. Fish Waste Management and Biogas Production. **Waste Management**, v. 85, p. 123-130, 2018.

KAUFFMANN, E. A.; SILVA, R. M.; RIBAS, F. A. **Tratamento de águas residuárias: Tecnologias e processos**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2004.

KUMAR, K. *et al.* Use of natural polymers for wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 115, p. 123-130, 2012.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar for environmental management: An introduction. In: **Biochar for environmental management: science and technology**, Earthscan, 2011.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Routledge, 2015.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Earthscan, 2015.

LOGAN, B. E.; *et al.* Microbial fuel cells: Challenges and applications. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 17, p. 5505-5510, 2006.

LÓPEZ, N.; *et al.* The role of macroalgae in nutrient removal and wastewater treatment. **Algal Research**, v. 2, n. 2, p. 140-146, 2013.

MARLOW, D. R. *et al.* Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. **Water Research**, v. 47, n. 20, p. 7150–7161, 2013.

MARTINS, M. A.; SILVA, R. A.; FERREIRA, J. A. **Tratamento de Efluentes Industriais: Guia Prático para Engenheiros Ambientais**. 2. ed. São Paulo: Editora ABC, 2019.

MATA, T. M., *et al.* Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.

METCALF, & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. McGraw-Hill Education, 2014.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and resource Recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

MORAES, C. A. *et al.* Uso de polímeros naturais em processos de tratamento de águas residuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 289-298, 2011.

MULLIGAN, C. N. *et al.* Bio-surfactants: An overview. **Biotechnology Advances**, v. 19, n. 5, p. 339-357, 2001.

PEDRON, F. D. A. *et al.* **Solos urbanos**. Ciência Rural, 2004.

POSTEL, S. **Last oasis: facing water scarcity**. New York: W. W. Norton & Company, 1992.

RA'E GA - **O Espaço Geografico em Análise**, v. 44, p. 272–288, 2018.

RAMOS, T. L.; *et al.* Phototrophic bacteria for wastewater treatment: A review. **Journal of Applied Microbiology**, v. 121, n. 4, p. 1001-1013, 2016.

RASKIN, I.; *et al.* Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils and waters. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 5, n. 3, p. 285-290, 1994.

RICHMOND, A. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Blackwell Science, 2004.

RUSTEN, B. *et al.* Design and operations of moving bed biofilm reactors. **Aquacultural Engineering**, v. 34, p. 322-331, 2006.

SCHNEIDER, I. *et al.* Biofiltration: A promising technology for wastewater treatment. **Water Research**, v. 44, n. 15, p. 4425-4437, 2010.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO). São Paulo: SIMA, 2015.

SÃO PAULO (Estado). Decreto n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, 9 set. 1976. Seção 1, p. 1.

SHEN, Y. *et al.* Nanocellulose and its applications in wastewater treatment. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 11, n. 7, p. 5825-5833, 2011.

SILLANPÄÄ, M. *et al.* Enzyme-based treatment processes for the removal of contaminants from water and wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 190, n. 1-3, p. 1-9, 2011.

TREVISAN, D. P.; MOSCHINI, L. E.; DIAS, L. C. C.; GONÇALVES, J. C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de São Carlos – SP. **Ra'e Ga**, Curitiba, v. 44, p. 272-288, maio 2018. eISSN 2177-2738. DOI: 10.5380/raega.

TCHOBANOGLUS, G. *et al.* **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. McGraw-Hill Education, 2014.

VOLESKY, B. **Biosorption of Heavy Metals**. CRC Press, 2003.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

XIA, Y. *et al.* Photocatalytic degradation of organic pollutants using microalgae. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 162, n. 1-2, p. 79-86, 2015.

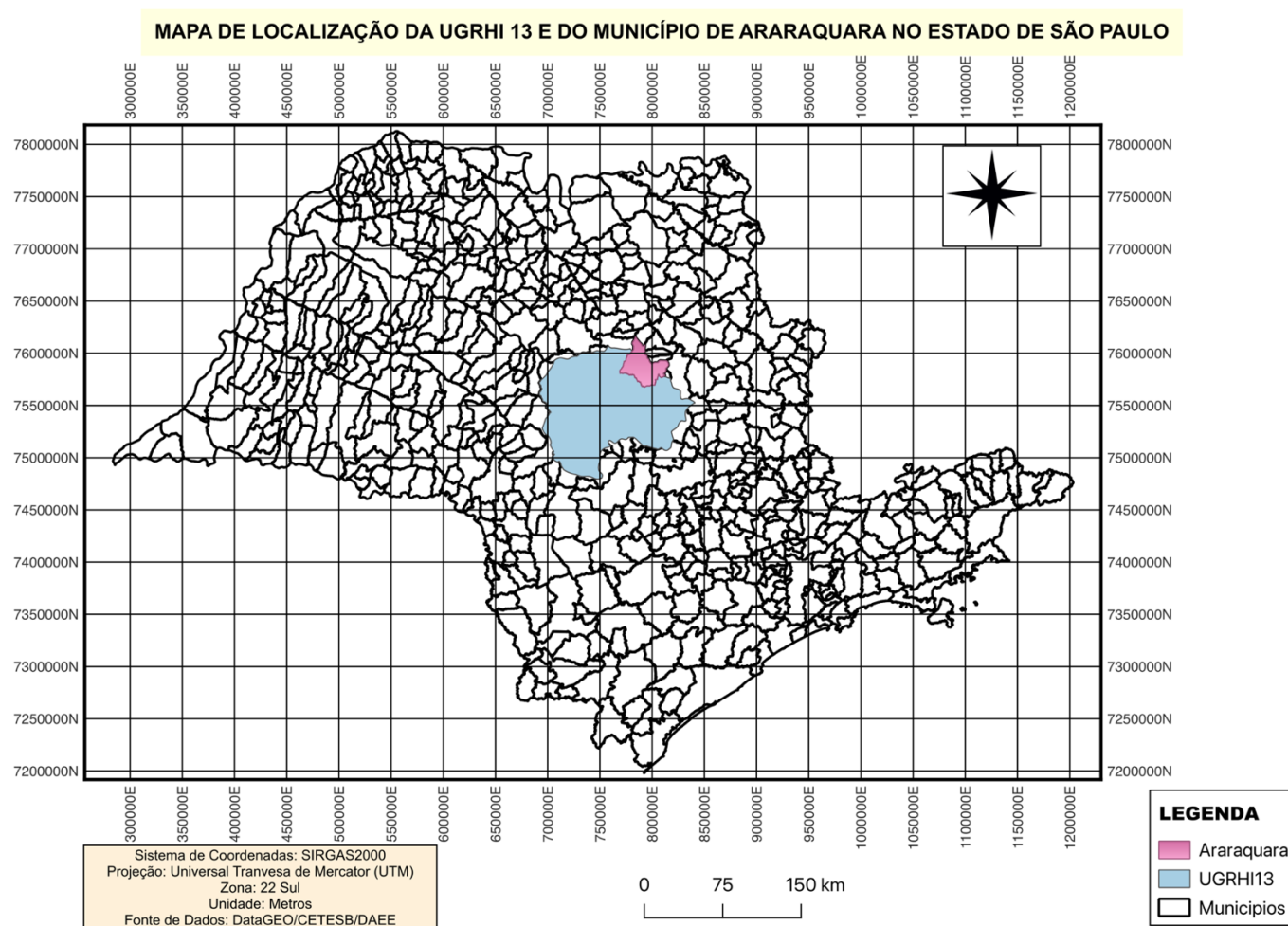
ZHAO, H. *et al.* Nanomaterials in wastewater treatment: A review. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 15, n. 6, p. 4457-4470, 2015.

WANG, J.; SHETTY, K. Enzyme immobilization in water treatment: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 134, n. 2, p. 145-153, 2007.

WANG, J. *et al.* Biosensors for environmental monitoring: A review. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 13, p. 5581-5587, 2011.

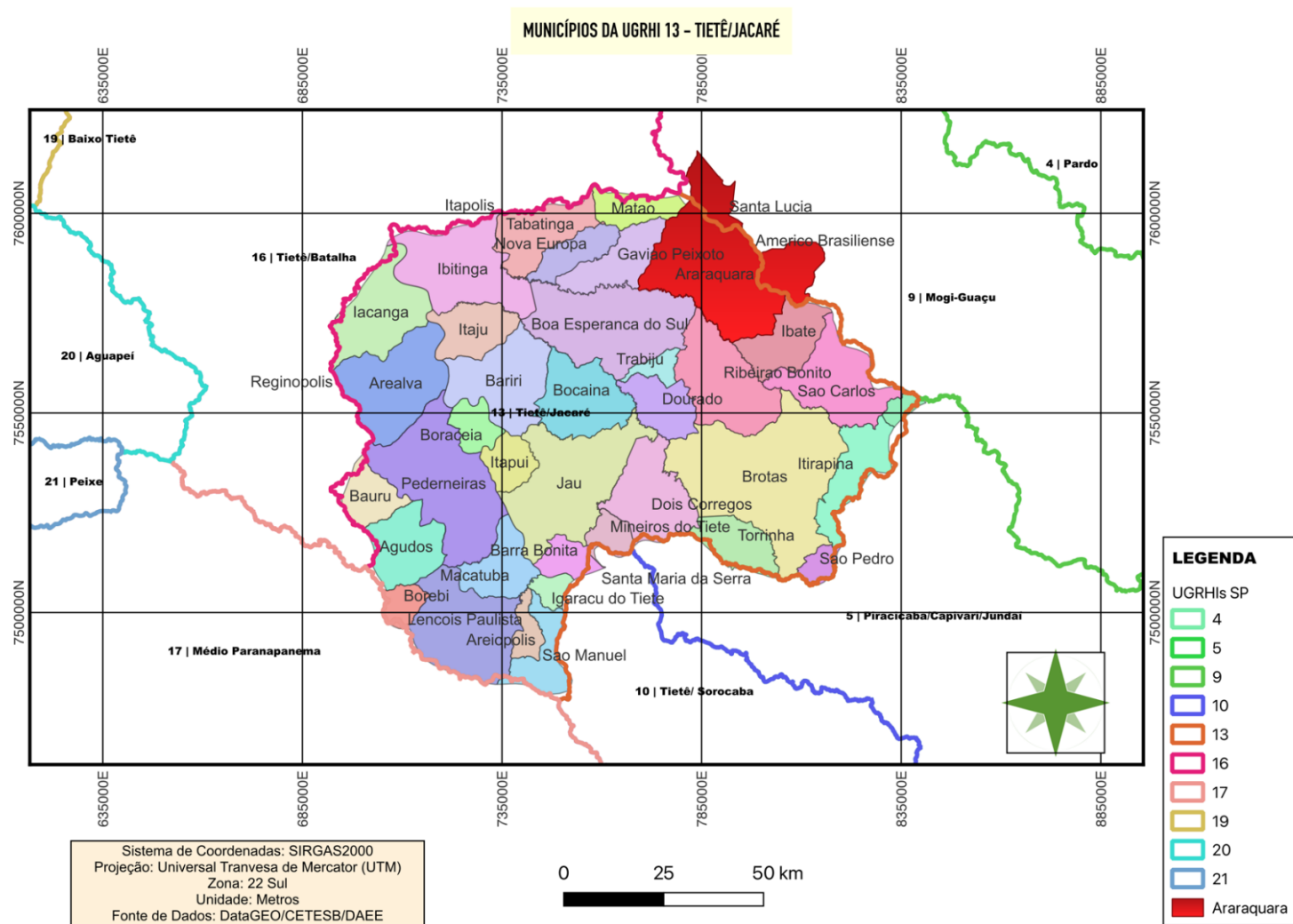
YONCA, N. *et al.* Sustainability Assessment of Urban Water Distribution Systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 25, n. 1, p. 4373–4384, 2014

Apêndice A - Figura 9: Mapa de Localização da UGRHI 13 e do Município de Araraquara no Estado de São Paulo

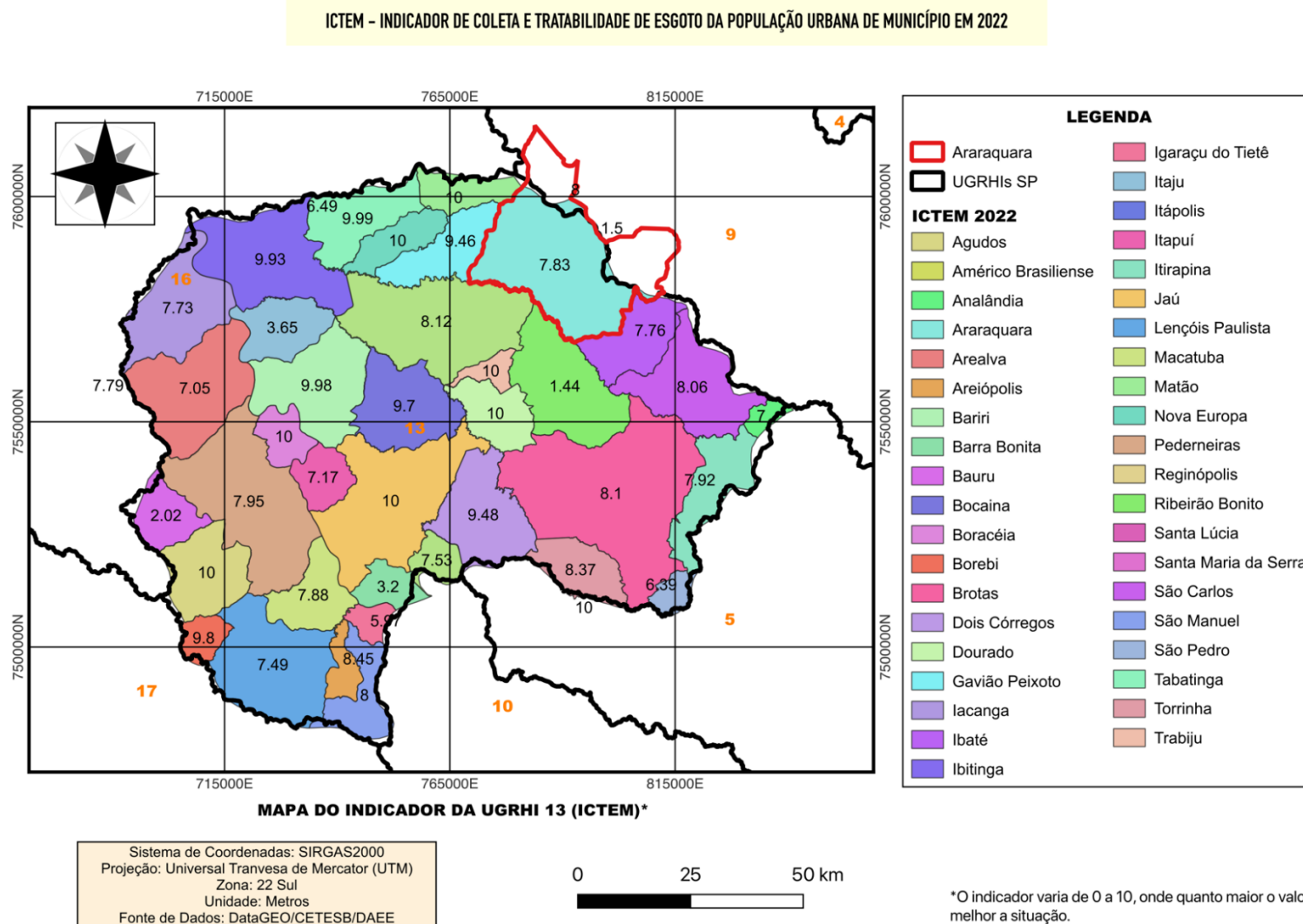


Fonte: Próprio autor

Apêndice B - Figura 10: Municípios da UGHI 13 – Tietê/Jacaré

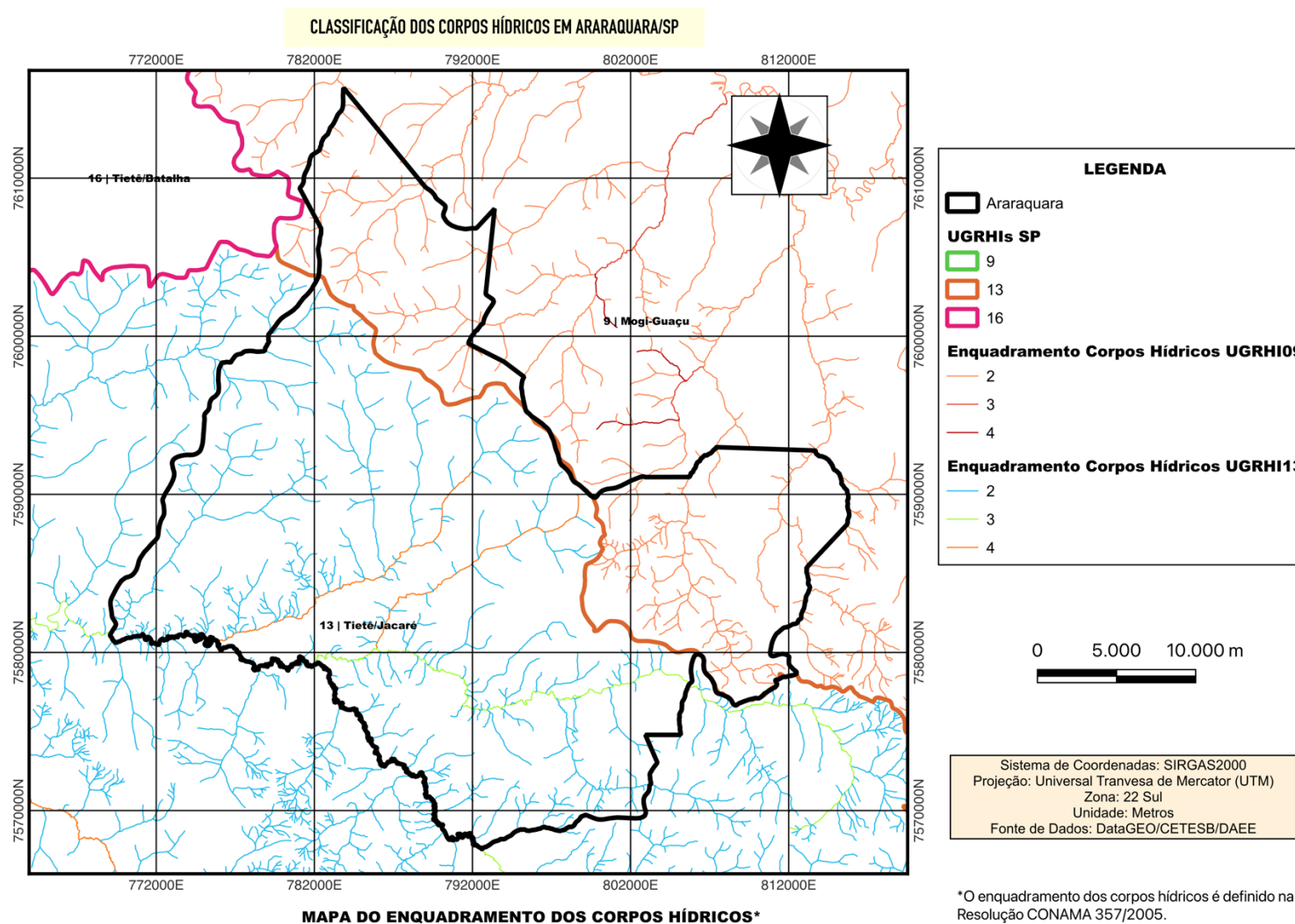


Apêndice C - Figura 11: Indicador de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Município em 2022

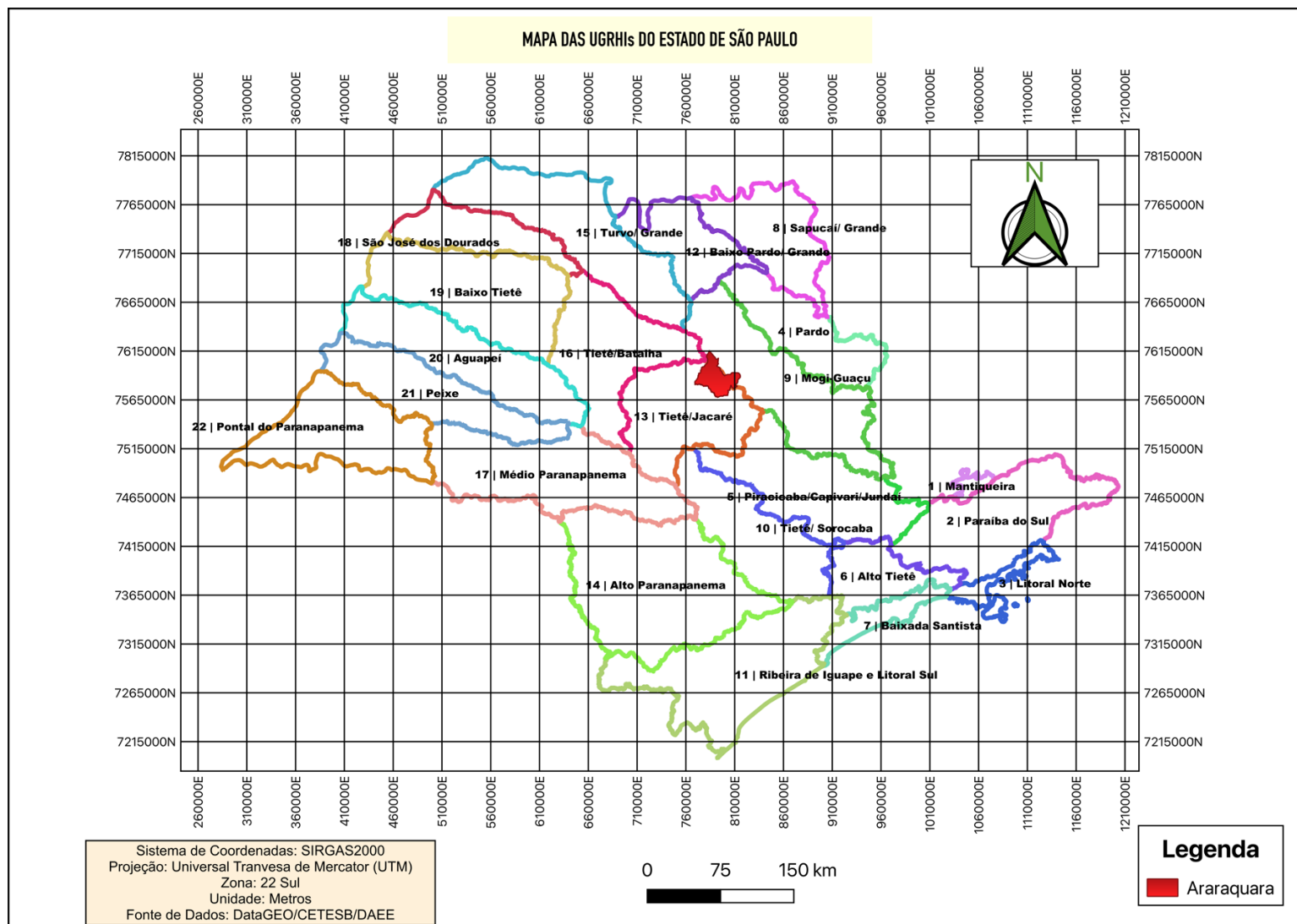


Fonte: Próprio autor

Apêndice D - Figura 12: Classificação dos Corpos Hídricos em Araraquara/SP



Apêndice E - Figura 13: Mapa das UGRHs do Estado de São Paulo



Fonte: Próprio autor