



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MONALISA NEVES ARRAIS

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DO TRATAMENTO
DE ESGOTO SANITÁRIO URBANO DE JUAZEIRO DO NORTE – CE**

Campina Grande – PB

2024

MONALISA NEVES ARRAIS

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DO TRATAMENTO
DE ESGOTO SANITÁRIO URBANO DE JUAZEIRO DO NORTE – CE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração:

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientadores:

Profª. Dra. Mônica de Amorim Coura

Prof. PhD. Rui de Oliveira

Campina Grande – PB

2024

A773c

Arrais, Monalisa Neves.

Uma contribuição para a gestão sustentável do tratamento de esgoto sanitário urbano de Juazeiro do Norte - CE / Monalisa Neves Arrais. – Campina Grande, 2024.

100 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura, Prof. Dr. Rui de Oliveira".

Referências.

1. Sistema de Tratamento de Efluentes – Juazeiro do Norte-CE.
2. Impacto Ambiental. 3. Sustentabilidade. 4. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). I. Coura, Mônica de Amorim Coura. II. Oliveira, Rui de.
- III. Título.

CDU 628.3(813.1)(043)

MONALISA NEVES ARRAIS

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DO TRATAMENTO
DE ESGOTO SANITÁRIO URBANO DE JUAZEIRO DO NORTE – CE**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE, COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada em: 18/11/2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Orientadora

Prof. PhD. Rui de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)
Co-orientador

Profa. Dra. Dayse Luna Barbosa
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Examinadora Interna

Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)
Examinador Externo

Profa. Dra. Andrea Maria Brandao Mendes de Oliveira
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Examinador Externo

Campina Grande – PB

2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): MONALISA NEVES ARRAIS / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a MÔNICA DE AMORIM COURA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. RUI DE OLIVEIRA – UEPB – COORIENTADOR, DR. JUSCELINO ALVES HENRIQUES – IFPE/PE – EXAMINADOR EXTERNO, DR.^a DAYSE LUNA BARBOSA - PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR.^a ANDRÉA MARIA BRANDÃO MENDES DE OLIVEIRA - UACTA/CCTA - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 44/2024). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “UMA CONTRIBUIÇÃO PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO URBANO DE JUAZEIRO DO NORTE-CE” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA I, BLOCO CR, CAMPUS SEDE DA UFCG, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA HÍBRIDA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 18 DE NOVEMBRO DE 2024.**



Documento assinado eletronicamente por **Juscelino Alves Henriques, Usuário Externo**, em 25/11/2024, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rui de Oliveira, Usuário Externo**, em 25/11/2024, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DAYSE LUNA BARBOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/11/2024, às 22:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MONALISA NEVES ARRAIS, Usuário Externo**, em 26/11/2024, às 06:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 26/11/2024, às 08:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MONICA DE AMORIM COURA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/11/2024, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA MARIA BRANDAO MENDES DE OLIVEIRA, COORDENADOR DE POS-GRADUACAO**, em 27/11/2024, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4989450** e o código CRC **10391116**.

Dedico este trabalho à Deus, à minha família, aos meus amigos e a todos os meus colegas de curso que assim como eu encerraram uma difícil etapa da vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que me apoiaram ao longo desta jornada acadêmica. Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sustento, sabedoria e resiliência para superar cada desafio e pela inspiração que me guiou até aqui.

Agradeço também aos meus pais, pelo apoio incondicional, paciência e amor em cada etapa de minha vida. Vocês são minha base e motivação, e sem o suporte de vocês, essa conquista não seria possível.

A Igor Leandro, meu marido, que merece um agradecimento especial, por toda parceria, compreensão, e incentivo ao longo desse desafio.

Aos meus orientadores, Profa. Dra. Mônica Amorim Coura e Prof. Dr. Rui de Oliveira, agradeço imensamente pela orientação, paciência, generosidade e compreensão em compartilhar conhecimentos. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como pesquisadora. Louvo a Deus pela vida de vocês e agradeço por Ele ter os colocado em meu caminho.

Aos membros da banca avaliadora, Profa. Dra. Dayse Luna Barbosa, Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques e Prof. Dr. Igor de Souza Ogata, agradeço pela aceitação do convite e por suas valiosas sugestões e observações, que enriqueceram e fortaleceram este trabalho.

Um agradecimento especial para a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), que prontamente forneceram os dados que foram de fundamental importância para a concretização desse trabalho.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, em especial Maria Adrielly, Laisa Daiana, Glauce Chaves e muitos outros colegas, sou grata pelo incentivo, pelas trocas de experiências e pelo companheirismo. Juntos, enfrentamos os desafios e celebramos as conquistas dessa jornada.

Ao CNPq, sou grata pelo apoio financeiro.

A todos, meu mais sincero agradecimento.

“Ele dá força ao cansado, e aumenta as forças ao que não tem nenhum vigor. Os jovens se cansarão e se fatigarão, e os mancebos cairão, mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças; subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; andarão, e não se fatigarão.”

Isaías 40:29-31

RESUMO

É notório que o cenário do saneamento básico no Brasil caminha à passos lentos, principalmente no que diz respeito ao tratamento de esgotos, com cobertura total de apenas 56% da população brasileira. Além disso, destaca-se a falta de sustentabilidade da gestão nas plantas de tratamento de efluentes, que se restringem apenas ao atendimento à legislação. Diante disso, o presente trabalho visa avaliar a sustentabilidade do sistema de tratamento de efluentes da cidade de Juazeiro do Norte - Ceará, avaliando o desempenho atual das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) e os potenciais impactos ambientais causados por elas, além de indicar melhorias na operação e manutenção. O estudo compreendeu as ETEs que compõem o sistema de tratamento da cidade de Juazeiro do Norte: ETE Malvas, ETE Três Marias e ETE Tenente Coelho. A primeira etapa do trabalho foi a aquisição dos dados necessários à pesquisa, junto à Cagece, bem como a realização de visitas técnicas nas estações. Após o recebimento das informações foi feita uma caracterização do sistema de tratamento e a realização da avaliação dos impactos mediante a ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Adicionalmente, com base nas avaliações realizadas ao longo do estudo, foram indicadas melhorias operacionais e ajustes nos protocolos de manutenção. A ETE Malvas apresentou baixa eficiência de remoção de matéria orgânica, com apenas 56,17% de remoção de DQO, e *E. coli* foi de $6,98E+03$ NMP/100 mL, pH de 8,05, temperatura de 28,42°C e ausência de materiais flutuantes no efluente tratado. Na ETEs Três Marias, a remoção de DQO também foi baixa, com média de 45,75%. O efluente tratado apresentou $3,47E+02$ NMP/100 mL de *E. coli*, 7,41 de pH e 29,85 °C de temperatura. Já a ETE Tenente Coelho foi a estação que mais se destacou dentre as três ETEs estudadas, quanto ao desempenho operacional. A média de remoção de matéria orgânica foi de 79,97%, e $1,66E+01$ NMP/100 mL de *E. coli*, 7,57 de pH e 29,23 °C de temperatura no efluente final. A ACV identificou os principais impactos de *midpoint*, destacando o impacto de Mudanças Climáticas e Formação de Oxidante Fotoquímico que se manifestaram em todas as três estações. O impacto de toxicidade humana apresentou valores expressivos tanto na ETE Três Marias quanto na ETE Tenente Coelho, devido ao uso do cloro na etapa de desinfecção. Na abordagem de *endpoint*, as categorias de impactos de *midpoint* foram associadas aos Danos ao Ecossistema e a Saúde Humana. Dentre essas propostas de melhorias destacam-se a realização de análises de DBO₅, nutrientes e outros indicadores, pelo Laboratório Regional, a criação de um Sistema de Gestão Ambiental e a recuperação e reuso dos recursos gerados pelas ETEs como o lodo, a água tratada e o biogás. A ETE Malvas se mostrou mais relevante nos impactos gerados às áreas de proteção, e a Saúde Humana é a área de proteção que mais sofre com os impactos gerados por essas ETEs, principalmente devido as mudanças climáticas, a formação de oxidante fotoquímico e toxicidade de produtos químicos nos seres humanos.

Palavras-chave: tratamento de esgoto, impacto ambiental, sustentabilidade, avaliação do ciclo de vida.

ABSTRACT

It is well-known that the basic sanitation scenario in Brazil is progressing slowly, especially with regard to sewage treatment, with total coverage reaching only 56% of the Brazilian population. Moreover, the lack of sustainability in the management of wastewater treatment plants stands out, as they are limited to merely complying with legislation. In view of this, this study aims to evaluate the sustainability of the wastewater treatment system in the city of Juazeiro do Norte - Ceará, evaluating the current performance of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) and their potential environmental impacts, as well as suggesting improvements in operation and maintenance. The study was conducted at the WWTPs that make up the treatment system of the city of Juazeiro do Norte: Malvas WWTP, Três Marias WWTP, and Tenente Coelho WWTP. The first stage of the work involved acquiring the necessary data for the research from Cagece, as well as conducting technical visits to the plants. After receiving the information, the treatment system was characterized, followed by the impact assessment using the Life Cycle Assessment (LCA) tool. Additionally, based on the assessments conducted throughout the study, operational improvements and adjustments to the maintenance protocols were suggested. The Malvas WWTP showed low efficiency in organic matter removal, with only 56.17% of COD removal, *E. coli* at $6.98E+03$ MPN/100 mL, a pH of 8.05, a temperature of 28.42°C and absence floating materials in the treated effluent. At the Três Marias STP, COD removal was also low, with an average of 45.75%. The treated effluent presented $3.47E+02$ MPN/100 mL of *E. coli*, a pH of 7.41, and a temperature of 29.85°C. The Tenente Coelho WWTP was the plant that stood out the most among the three WWTPs studied, in terms of operational performance. The average organic matter removal was 79.97%, and $1.66E+01$ NMP/100 mL of *E. coli*, a pH of 7.57 and a temperature of 29.23 °C in the final effluent. The LCA identified the main midpoint impacts, highlighting the impact of Climate Change and Photochemical Oxidant Formation that occurred in all three seasons. The impact of human toxicity had significant values at both the Três Marias and Tenente Coelho WWTPs, due to the use of chlorine in the disinfection stage. In the endpoint approach, midpoint impact categories were associated with Ecosystem Damage and Human Health. Among these improvement proposals, the following stand out: conducting BOD₅ analyses, nutrient assessments, and other indicators by the Regional Laboratory; establishing an Environmental Management System; and recovering and reusing resources generated by the WWTPs, such as sludge, treated water, and biogas. The Malvas WWTP proved to be more relevant in the impacts generated in the protected areas, and Human Health is the protected area that suffers most from the impacts generated by these WWTPs, mainly due to climate change, the formation of photochemical oxidants and the toxicity of chemical products in human beings.

Keywords: wastewater treatment, environmental impact, sustainability, life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Investimentos dos últimos 12 (doze) anos em saneamento básico no município de Juazeiro do Norte.	21
Figura 2 - Processo geral de uma Avaliação de Ciclo de Vida	24
Figura 3 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida, conforme a NBR ISO 14040.	26
Figura 4 - Etapas Metodológicas da pesquisa.	31
Figura 5 - Localização geográfica da área de estudo.....	33
Figura 6 - Sistemas condominiais utilizados na cidade do Juazeiro do Norte.	34
Figura 7 - Croqui da ETE Malvas do Município de Juazeiro do Norte - CE.	37
Figura 8 - Croqui da ETE Três Marias do município de Juazeiro do Norte - CE.	38
Figura 9 - Croqui da ETE Tenente Coelho do município de Juazeiro do Norte - CE. ...	39
Figura 10 - Croqui da ETE Prourb do município de Juazeiro do Norte - CE.	40
Figura 11 - Localização das ETES e pontos de lançamento de esgoto tratado.	41
Figura 12 – Imagens de satélite das Estações de Tratamento de Esgotos e localização dos pontos de lançamento.	42
Figura 13 - Estrutura da ACV do presente estudo.	46
Figura 14 – Concentração de DQO de efluente bruto e efluente tratado da ETE Malvas.	52
Figura 15 - Concentração de E. Coli do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.	54
Figura 16 - pH do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.	55
Figura 17 - Temperatura do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.	57
Figura 18 - Concentração de DQO do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Três Marias.	59

Figura 19 - Concentração de DQO do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Tenente Coelho.....	63
Figura 20 - Eficiência média de remoção de matéria orgânica.	65
Figura 21 - Atendimento à legislação do efluente tratado das ETEs quanto ao indicador de DBO.....	67
Figura 22 - Atendimento à legislação do esgoto tratado das ETEs quanto ao indicador de Coliformes Termotolerantes.	68
Figura 23 - Atendimento à legislação do esgoto tratado das ETEs quanto aos indicadores de pH e Temperatura.....	70
Figura 24 - Impacto de Mudanças Climáticas das ETEs estudadas.	74
Figura 25 - Impacto de Formação de Oxidante Fotoquímico das ETEs estudadas.....	76
Figura 26 - Impacto de Toxicidade humana das ETEs Três Marias e Tenente Coelho.....	78
Figura 27 - Impacto de Ecotoxicidade em água doce, marinha e terrestre das ETEs Três Marias e Tenente Coelho.	80
Figura 28 - Áreas de proteção de endpoint afetadas pelos impactos intermediários.....	82
Figura 29 - Resultado da AICV após a abordagem de endpoint no efluente tratado das ETEs estudadas.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos indicadores do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.	51
Tabela 2 - Estatística descritiva dos indicadores do efluente bruto e efluente tratado da ETE Três Marias.	58
Tabela 3 - Eficiências de remoção de matéria orgânica da ETE Três Marias nos anos de 2020, 2021 e 2022.	60
Tabela 4 - Estatística descritiva dos indicadores do efluente bruto e efluente tratado da ETE Tenente Coelho.	62
Tabela 5 - Eficiências de remoção de matéria orgânica da ETE Tenente Coelho nos anos de 2020, 2021 e 2022.	63
Tabela 6 - Teste de variância (ANOVA) aplicado às eficiências de remoção de matéria orgânica das ETEs estudadas.	66
Tabela 7 - Teste de Tukey aplicado às eficiências de remoção de matéria orgânica das ETEs estudadas.	66
Tabela 8 - Inventário utilizado na ACV das ETEs.	72
Tabela 9 – Potenciais impactos dos efluentes das ETEs.	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipo de sistema de coleta de esgoto em cada bairro atendido.....	35
Quadro 2 - Tratamento aplicado em cada ETE, localização das mesmas e do emissário.	35
Quadro 3 - Características construtivas dos emissários das ETEs.	42
Quadro 4 - Indicadores dos afluentes e efluentes das ETEs.....	43
Quadro 5 - Padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011.	44
Quadro 6 - Fluxos da Ecoinvent® 3.7 utilizados na ACV para cada fluxo do inventário.	48

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AICV - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

CAGECE - Companhia de água e Esgoto do Ceará

COEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

ETE - Estaao de Tratamento de Esgoto

GEE - Gases de Efeito Estufa

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OpenLCA - *Open Source Life Cycle Assessment*

UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

WHO - World Health Organization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo Geral	17
2.2. Objetivo Específicos	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1. Crescimento Urbano e Saneamento Básico.....	18
3.2. Saneamento básico no Nordeste.....	20
3.3. Sustentabilidade e Tratamento de águas residuais.....	22
3.4. Avaliação do Ciclo de Vida	23
3.4.1. <i>Passo a Passo da ACV</i>	25
3.5. Avaliação do Ciclo de Vida em Estações de Tratamento de Esgotos	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Aquisição de dados	32
4.2. Descrição da área de estudo	32
4.2.1. <i>Tratamento de efluentes sanitários em Juazeiro do Norte – CE</i>	35
4.3. Caracterização do Sistema de Tratamento de efluentes	42
4.4. Avaliação do Ciclo de Vida	45
4.4.1 <i>Definição de objetivos e escopo</i>	46
4.4.2 <i>Levantamento do Inventário</i>	47
4.4.3 <i>Avaliação de impacto do ciclo de vida</i>	48
4.5. Propostas e recomendações de melhorias.....	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1. Caracterização do Tratamento de Efluentes.....	50
5.1.1 <i>Eficiência de tratamento</i>	50
5.1.2 <i>Atendimento às exigências legais</i>	67
5.2. Avaliação do ciclo de vida	71
5.2.1 <i>Inventário do ciclo de vida</i>	71
5.2.2 <i>AICV das Estações de Tratamento: midpoint</i>	72
5.2.3 <i>AICV da Estações de Tratamento: Endpoint</i>	80
5.3. Propostas e Recomendações	84
6 CONCLUSÕES	88
7 REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

Os processos de urbanização e crescimento populacional podem trazer inúmeras consequências ao meio social e ambiental, em que se destacam as desigualdades sociais, habitações precárias, deficiência de transportes públicos, prestação insuficiente de serviços públicos essenciais; além de problemas ambientais como impermeabilização do solo, deterioração da água superficial e subterrânea, inundações urbanas, poluição do ar, entre outros que provocam efeitos adversos à população local.

A precariedade do saneamento básico no Brasil, problema também decorrente da intensa urbanização se traduz principalmente na falta do abastecimento de água ou abastecimento com água de qualidade inferior, resíduos sólidos dispostos de forma irregular em lixões, inundações provocadas pela insuficiência das redes de drenagem e ausência de coleta de esgoto ou tratamento inadequado desses esgotos; resultando no favorecimento da proliferação de doenças e causando a degradação dos corpos hídricos e meio ambiente como um todo.

O cenário do saneamento básico no Brasil caminha a passos lentos, principalmente no que diz respeito ao tratamento de esgotos. Apenas 56% da população brasileira tem seus efluentes coletados pela rede de esgoto, isso corresponde a 112,8 milhões de habitantes, o restante da população utiliza soluções alternativas individuais como fossa séptica, fossa rudimentar, vala a céu aberto e até mesmo lançamentos em cursos d'água. Além disso, apenas 81,6% do esgoto coletado é efetivamente tratado (SNIS, 2023).

No âmbito regional, o Sudeste brasileiro é o que menos conseguiu tratar todo o efluente coletado, com apenas 77,4% de alcance, seguido da região Nordeste com 77,9%. O Nordeste brasileiro é uma das regiões que mais sofrem com a ausência de tratamento de esgotos, situação essa agravada pelo contexto de semiárido, onde é comum uma realidade de irregularidade espaço-temporal das precipitações e escassez de recursos hídricos, além de fatores sociais e econômicos (SNIS, 2023).

O conceito de sustentabilidade, por sua vez, vem acrescentar uma nova perspectiva no contexto do saneamento básico. A gestão sustentável de tratamento de efluentes aspira desde ao oferecimento de um serviço de qualidade e eficiente à população, considerando a universalização do serviço, até à utilização dos produtos gerados do tratamento de efluentes como fonte de matérias-primas para outros processos

e/ou produtos, propondo alternativas eficientes e reduzindo os impactos causados pela geração e disposição inadequada de esgotos.

Nesse sentido, a gestão sustentável consolidada desempenha papel fundamental para minimização de impactos adversos e assegura que as operações sejam conduzidas com o menor dano possível à sociedade e ao meio ambiente. Dessa forma, a referida pesquisa tem o objetivo de avaliar a sustentabilidade do sistema de tratamento de efluentes da cidade de Juazeiro do Norte, Ceará. Justifica-se pelo fato de que o ambiente urbano e natural se encontra ameaçado pela carência de tratamento de efluentes adequado e gestão eficiente, incoerentes com a demanda populacional e a legislação brasileira. A realidade atual evidencia um foco limitado ao cumprimento da legislação, frequentemente mal alcançado, deixando lacunas que comprometem a sustentabilidade ambiental e a qualidade dos corpos d'água receptores.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a sustentabilidade do sistema de tratamento de efluentes da cidade de Juazeiro do Norte, Ceará.

2.2. Objetivo Específicos

- Avaliar o desempenho de qualidade das Estações de Tratamento de Esgotos da cidade;
- Avaliar os impactos ambientais de *midpoint* e *endpoint* das Estações de Tratamento de Esgotos;
- Indicar melhorias na operação e manutenção preventiva das Estações de Tratamento de Esgotos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Crescimento Urbano e Saneamento Básico

O acelerado crescimento populacional sem o planejamento adequado tem como consequência alguns problemas de ordem ambiental e social. O inchaço das cidades, provocado pelo acúmulo de pessoas e a falta de uma infraestrutura adequada, geram transtornos para a população urbana. Esses inchaços ocorrem principalmente em cidades em desenvolvimento, em razão da rapidez do processo de urbanização e da falta de infraestrutura (Vieira Filho *et al.*, 2013). Segundo Nascimento (2021) as cidades têm sido o ambiente no qual vêm sendo construídas parte das ameaças ao futuro da humanidade, ligadas ao modo de produção capitalista e o local para onde convergem parcela significativa dos efeitos socioambientais desse processo.

Para Singh *et al.* (2019) o aumento da carga populacional e a urbanização levaram a um maior consumo de água com consequente descarga de poluentes nos corpos hídricos o que resulta em águas impróprias para o consumo. A poluição causada por poluentes orgânicos e nutrientes dá origem a eutrofização e queda na concentração de oxigênio da água. Os autores ainda acrescentam que o aumento da poluição juntamente com a escassez de água dá origem à procura de tecnologias de tratamento adequadas para a remoção de poluentes e reutilização de efluentes tratados em operações que necessitem de água com qualidade inferior à potável.

No caso brasileiro, a condição da situação do saneamento básico ainda é precária e é um dos principais problemas decorrentes do crescimento populacional e intensa urbanização. Conforme Soares *et al.* (2022) pontuou, no século passado, desde a década de 30 o investimento em saneamento básico no Brasil ocorreu de forma tímida, havendo maior impacto da década de 70 com a consolidação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), na década de 80 com a Política Nacional do Meio Ambiente e nos anos 90 com a Política e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Embora não esteja expressamente previsto na Constituição brasileira como direito fundamental, é possível concluir que o acesso ao saneamento básico está contemplado dentre aqueles direitos que tacitamente são considerados fundamentais e que fazem parte de um direito mais amplo, o direito fundamental à saúde, este, expressamente previsto como direito social (Costa, Peirnbom & Soares, 2018). Valente (2019) aponta que a questão do saneamento básico é ponto fundamental para a efetivação do direito social à

saúde, mas também tem repercussão na efetivação de outros direitos fundamentais, como o direito ao meio ambiente equilibrado, direito ao desenvolvimento e o direito à educação.

Atualmente, a principal norma que discute o setor do saneamento é a Lei Federal nº 14.026 (BRASIL, 2020) que define Saneamento Básico como o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem urbana das águas pluviais urbanas. Ressalta-se que a gestão de recursos hídricos não é contemplada pela referida lei. Ferreira, Gomes & Dantas (2021) salientam que apesar de criações de instrumentos legais nacionais, desde 2007, as ações por parte da União não atingiram o território brasileiro de forma homogênea, tendo em vista as características locais dos municípios, como o nível de suas capacidades técnicas, vontade política das gestões municipais e captação de recursos para geração destes instrumentos voltados para o Saneamento Básico.

No Brasil, há um déficit no acesso aos serviços básicos que atinge principalmente as populações mais carentes concentradas em favelas, nas periferias das cidades e nas áreas rurais. A inexistência ou ineficácia de serviços de saneamento favorece o agravamento da saúde e da qualidade de vida da população. Assim, a insuficiência de investimento neste setor interfere de forma negativa no sistema econômico, com gastos elevados para combater as enfermidades propagadas devido às condições sanitárias inadequadas (Santos *et al*, 2018).

De acordo com Saiani (2006), o déficit de acesso aos serviços de saneamento básico no Brasil está intimamente relacionado ao perfil de renda dos consumidores – capacidade de pagamento (tarifas) – e à existência de economias de escala e de densidade no setor – maior facilidade de ofertar os serviços em grandes concentrações populacionais (aglomerações), uma vez que a expansão e a manutenção destes tendem a ter custos reduzidos à medida que aumenta o tamanho da população a ser atingida. Tal fato sugere que os investimentos realizados ao longo do tempo no setor foram motivados mais pela possibilidade de retorno econômico do que pelo grande retorno social que tais serviços podem gerar.

No que diz respeito ao atendimento do esgotamento sanitário, esse é consideravelmente mais preocupante que o nível de atendimento de abastecimento de água (Sales, 2022). Segundo o SNIS (2023), apenas 2.902 municípios do Brasil contam

com sistemas públicos de esgotamento sanitário e em 2.248 municípios são utilizadas soluções alternativas individuais como fossa séptica, fossa rudimentar, vala a céu aberto e até mesmo lançamento em cursos d'água. Dos municípios que possuem sistemas públicos de esgotamento sanitário, as redes de esgotos abrangem apenas 56% da população total desses municípios, correspondendo a 112,8 milhões de habitantes. De todo o esgoto coletado apenas 81,6% é efetivamente tratado, sendo estes passíveis de sofrer interferências, como rompimentos ou entupimentos de tubulações que consequentemente provocam vazamentos e extravasamento, no qual desviam-se do seu destino e impede que sejam devidamente tratados.

3.2.Saneamento básico no Nordeste

O Nordeste brasileiro é uma das regiões que mais sofrem com a ausência de saneamento básico, em particular o tratamento de esgotos. Essa situação é agravada pelo contexto de semiárido, onde vivencia-se uma irregularidade espaço-temporal das precipitações, e consequentemente escassez de recursos hídricos, além de fatores sociais e econômicos. O SNIS (2023) indica que apenas 31,4% da população total da região Nordeste é atendida com rede pública de esgoto. Especificamente no Ceará, o índice de atendimento total com redes de esgoto é de 29,6% de cobertura, sendo o sexto estado da região Nordeste com maior índice. Ainda, calcula-se que apenas 87% dos esgotos coletados são devidamente tratados antes de serem lançados nos corpos receptores.

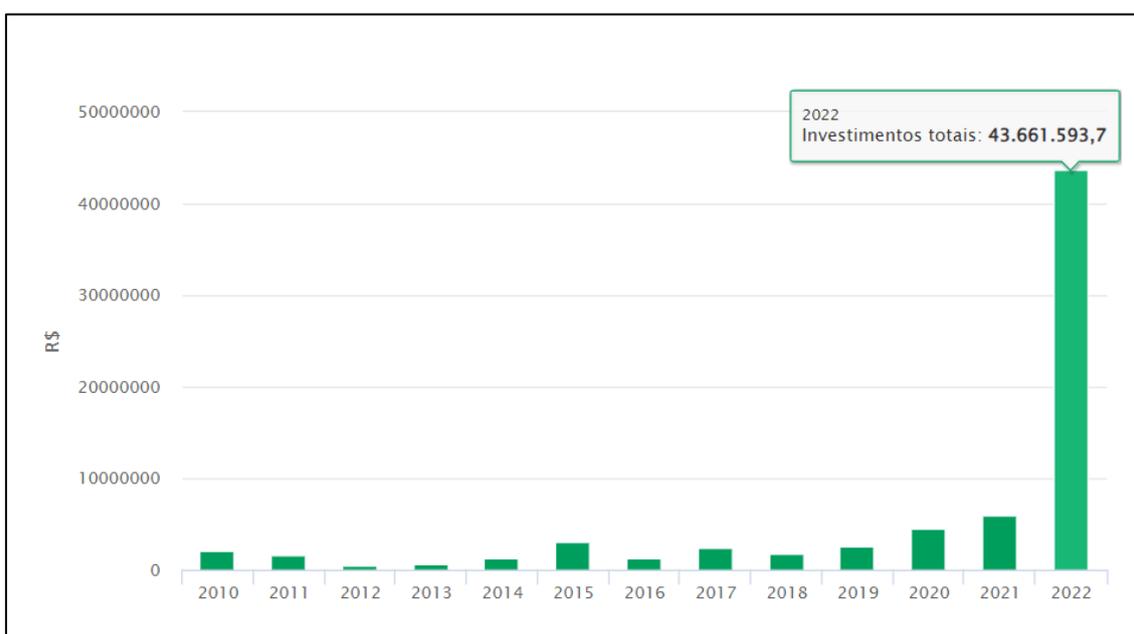
Em Juazeiro do Norte, estado do Ceará, local onde se deu este estudo, a situação não difere da realidade do Nordeste. Segundo a Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará – Cagece (2023), a cobertura da rede pública de esgoto foi de 35,5%. É importante ressaltar que a implantação da rede coletora de esgoto na cidade aconteceu em 1988, e desde então a população do município aumentou em mais de 100 mil habitantes. Todavia, pouco foi feito para avançar com a rede coletora de esgotos, sendo alternativamente utilizadas tecnologias individuais ultrapassadas como fossas sépticas, fossas rudimentares ou até mesmo valas a céu aberto (Juazeiro do Norte, 2022).

Ao longo do processo de crescimento e urbanização do município, o planejamento urbano foi bastante negligenciado. Juazeiro do Norte cresceu de forma desordenada e acelerada, como na maioria das cidades brasileiras e as políticas públicas urbanas não conseguiram acompanhar tal crescimento. Esse desenvolvimento rápido atrai muitas pessoas, que se deslocam de todo país para morar, construir e abrir empresas no

município. Esse aumento contínuo da população provoca o aumento da demanda de espaços territoriais, assim como o uso e ocupação do solo, muitas vezes de maneira equivocada e ilegal. Junto a isso, inúmeros problemas ambientais aparecem, gerando dificuldades para os gestores no que diz respeito ao fornecimento de serviços públicos urbanos, como é o caso do esgotamento sanitário.

Somente no ano de 2022, os esforços e investimentos foram notórios, ultrapassando os 40 milhões de reais, investimento este proveniente por parte da administração pública municipal junto aos poderes estaduais e federais (Figura 1).

Figura 1 - Investimentos dos últimos 12 (doze) anos em saneamento básico no município de Juazeiro do Norte.



Fonte: Trata Brasil (2023).

Em dezembro de 2015, o Decreto N° 219 aprovou a criação do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de Juazeiro do Norte e instituiu a estrutura administrativa para Execução do PMSB, além de listar os programas e projetos que deveriam compor o PMSB, porém o plano de saneamento ainda não foi produzido.

Apesar dos esforços feitos, o percentual da cobertura do esgotamento sanitário não evoluiu significativamente ao longo dos anos. Segundo o relatório do SNIS (2023), Juazeiro do Norte possui o Índice de Atendimento total de esgoto de apenas 23,4%. No entanto, a Cagece registra um percentual de aproximadamente 35,5%, no mesmo ano, e afirma que o principal motivo de percentuais tão inferiores é a baixa aderência por parte

da população ao ligamento de seus esgotos à rede, pelo fato do custo adicional desse serviço no orçamento familiar. O Plano de Metas e Investimentos do Município de Juazeiro do Norte (Cagece, 2019) estabeleceu como meta a cobertura da coleta de esgoto de 50% da cidade até 2025, e somente em 2040 prevê alcançar o Índice de cobertura de 100%. Paralelamente o novo marco legal do saneamento, a Lei 14.026, de 2020, determina que até 2033, o Brasil chegue a 90% do total de pessoas brasileiras com acesso à coleta de esgoto. Dessa forma, compreende-se que as metas do Plano de Metas e Investimento estão alinhadas às metas estabelecidas pela Lei de Saneamento Básico brasileira mais recente.

3.3. Sustentabilidade e Tratamento de águas residuais

Iaquinto (2018) conceitua a sustentabilidade, em síntese, como a solução para a preservação do meio ambiente, a fim de que seja possível a manutenção da existência dos seres vivos no planeta Terra; isso, por meio de novas atitudes a serem implementadas no cotidiano de todos os indivíduos. Nos últimos anos o termo vem sendo bastante utilizado, e por vezes, de modo equivocado. Silva & Leão (2020) explicam que a sustentabilidade é geralmente associada à sustentação dos seres humanos, como garantia de sua preservação na Terra, e desconsidera as outras formas de vida que também necessitam de um ambiente equilibrado.

No contexto do tratamento de efluentes sanitários, Silva (2023) afirma que embora o tratamento de águas residuais tenha recebido atenção significativa nas pesquisas, sua conexão com o gerenciamento sustentável de recursos não é adequadamente abordada. A gestão sustentável dentro do contexto de tratamento de efluentes aspira desde ao oferecimento de um serviço de qualidade e eficiente à população, considerando a universalização do serviço e atendimento à legislação, até à utilização dos produtos gerados do tratamento de efluentes como fonte de matéria-prima para outros processos e/ou produtos, propondo alternativas eficientes e reduzindo os impactos causados pela geração e disposição inadequada de esgotos.

A sustentabilidade pode dar novos fins ao esgoto tratado como: irrigação de espaços paisagísticos, uso em descargas de banheiros, lavagem de pisos, entre outros. Tais alternativas contribuem para a diminuição do uso de água potável para estes fins, além de gerar externalidades positivas sobre a saúde e o meio ambiente (Toneto Júnior, 2004 *apud* Leoneti, Prado & Oliveira, 2011). As limitações na disponibilidade de recursos estão

motivando a reutilização dos recursos gerados pelo tratamento de águas residuais, a fim de atender as demandas da sociedade atuais e futuras (Machineni, 2020).

Meena *et al.* (2019) ressalta o potencial contribuidor para a economia circular do tratamento de águas residuárias, consideradas um recurso valioso ao invés de passivo. O tratamento dessas águas tornou-se uma importante fonte de energia, água de reuso, fertilizantes e nutrientes. A economia circular prioriza a reutilização desses materiais e produtos gerados pelo tratamento para minimizar a pressão sobre os recursos naturais, promovendo a sustentabilidade ambiental do processo (Silva, 2023). Assim, para que sejam consideradas sustentáveis, as ETEs devem atingir baixa descarga de poluentes, proteção sanitária humana e custos de construção e operação viáveis (Maninna *et al.*, 2019).

Brostel (2002) *apud* Freire *et al.* (2023) acrescentam que a sustentabilidade em estações de tratamento de esgoto pode refletir em soluções específicas locais, com a implementação de um sistema economicamente viável, a ausência de substâncias poluentes nos produtos e subprodutos da ETE, a adaptabilidade e a não indução de distorções irreversíveis nos ciclos do meio ambiente.

3.4. Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) está integrada aos princípios do Desenvolvimento Sustentável, pois ambas as abordagens compartilham o objetivo de garantir a disponibilidade de recursos para as gerações presentes e futuras de todos os seres vivos. Nesse contexto, a boa gestão dos recursos é imperativa, e a ACV se destaca como uma ferramenta estratégica promovendo um desenvolvimento equilibrado que beneficia a todos.

A ACV é uma ferramenta que permite avaliar o impacto ambiental potencial associado a um produto ou atividade durante seu ciclo de vida, permitindo, também, identificar quais estágios do ciclo de vida têm contribuição mais significativa para o impacto ambiental do processo ou produto estudado (Coltro, 2007). Essa avaliação ocorre desde da obtenção do recurso natural até a disposição final. Além da quantificação e qualificação de impactos ambientais, a ACV também auxilia no aprimoramento do processo produtivo e nos produtos de uma empresa; também é possível comparar, de uma forma integrada, o desempenho ambiental de seus produtos; ajuda na tomada de decisões da indústria e governos; auxilia na definição de prioridades, de projeto e processos e

subsídia as estratégias de marketing, gerando uma diferenciação na competitividade dos produtos de mercado cada vez mais exigente. Dessa forma, a ACV mostra como uma funcionalidade específica pode ser alcançada de maneira mais ecologicamente correta dentre uma lista predefinida de alternativas, ou em quais partes do ciclo de vida é particularmente importante melhorar (Hauschild, Rosenbaum & Olsen, 2018). A Figura 2 esquematiza de maneira geral o processo de uma ACV.

Figura 2 - Processo geral de uma Avaliação de Ciclo de Vida



Fonte: A autora (2023)

Segundo Hauschild, Rosenbaum & Olsen (2018), o termo Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi criado na década de 1990, porém, anos antes, na década de 1960, já se trabalhava com os métodos chamados Análise de Perfil Ambiental e de Recursos ou Ecobalanças, estes foram os métodos precursores da ACV como se conhece hoje. Os primeiros estudos da ACV aconteceram nos Estados Unidos e norte da Europa e foram estudados sobre embalagens, se concentrando principalmente no uso de energia e algumas emissões. Ao longo das décadas a metodologia se consolidou na comunidade científica das universidades e indústrias, que por sua vez ampliou uma gama cada vez maior de produtos e sistemas.

Esta metodologia de avaliação se tornou tão importante e aceita dentro da gestão ambiental que teve sua normatização redigida pela *International Organization for Standardization* - ISO (Organização Internacional para Padronização). A norma internacional, ISO 14040, padronizou a Avaliação do Ciclo de vida em 2006. A série de normas ISO 14040 determina a estrutura, as diretrizes, os princípios e os requisitos que devem fazer parte de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida. A série ISO 14040 contempla:

- ISO 14040: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura (1997);

- ISO 14041: Avaliação do ciclo de vida – Definição de objetivos e âmbito e análise de inventário (1998);
- ISO 14042: Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida (2000);
- ISO 14043: Avaliação do ciclo de vida – Interpretação do ciclo de vida (2000).

Essas normas foram atualizadas e revisadas em 2006, resultando em duas normas:

- ISO 14040: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura (2006);
- ISO 14044: Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações (2006).

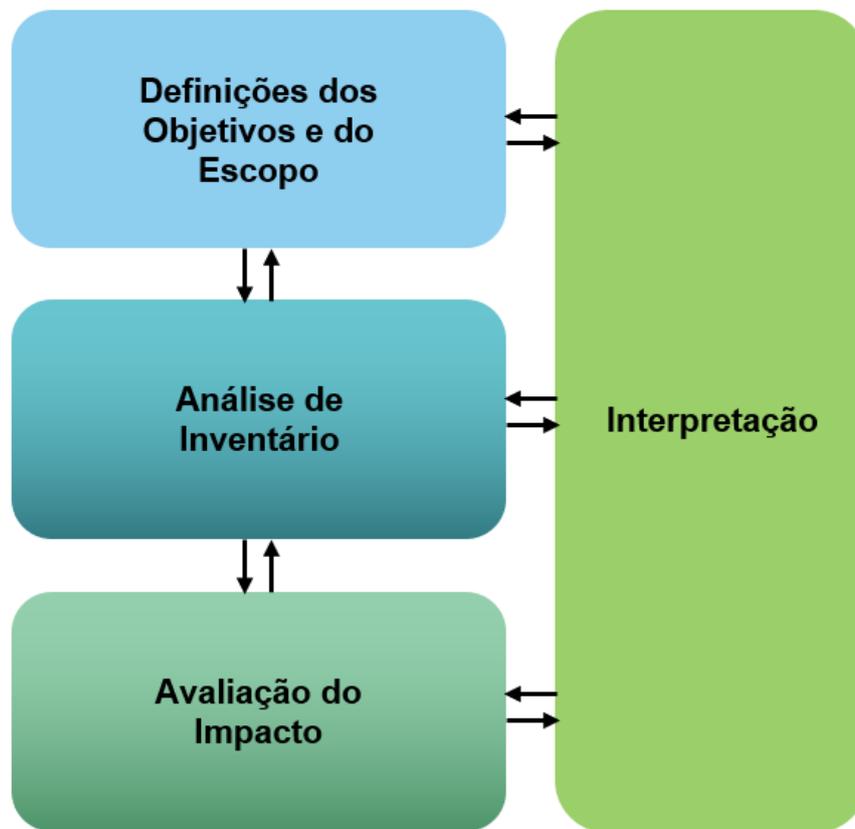
Em 2009, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) incorporou a normatização da ACV na realidade brasileira por meio da NBR ISO 14040, de 2014a (versão mais recente) - Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura e NBR ISO 14044 (2014b) - Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações.

A abrangência da ACV é um ponto forte, em termos de sua perspectiva de ciclo de vida e cobertura de questões ambientais, isso porque permite a comparação de impactos ambientais de sistemas de produtos que são compostos por centenas de processos, contabilizando milhares de usos de recursos e emissões que estão ocorrendo em diferentes lugares em diferentes momentos. Em contrapartida, a abrangência também é, ao mesmo tempo, uma limitação, pois requer simplificações e generalizações na modelagem do sistema de produtos e os resultados de uma ACV podem não refletir os impactos ambientais reais. Portanto, por essas razões é mais interessante dizer que a ACV calcula os potenciais impactos de um produto ou processo (Hauschild, Rosenbaum & Olsen, 2018).

3.4.1. Passo a Passo da ACV

A Avaliação do Ciclo de Vida obedece a um determinado protocolo, estabelecido em norma internacional, que deve ser seguido minuciosamente. Um estudo de ACV é dividido em 4 (quatro) fases, conforme a NBR ISO 14040 (2014a) (Figura 3).

Figura 3 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida, conforme a NBR ISO 14040.



Fonte: adaptado da NBR ISO 14040 (2014)

A primeira etapa é a Definição do Objetivo e Escopo. Esta etapa antecede todas as outras, pois é nesse momento em que determina a motivação do estudo, quais os objetivos, metas e pretensões de resultados, define-se como será o funcionamento completo da análise e quais dados e informações serão necessários para avaliação de impactos. Seye (2003) enfatiza que a definição do objetivo do estudo deve constituir uma clara declaração da razão que preside a realização do estudo de análise de ciclo de vida e da futura utilização dos resultados produzidos, assim também como apresentar detalhes suficientes para assegurar que o alcance e a profundidade da análise sejam compatíveis com o objetivo estabelecido. Em outras palavras, a definição deve ser feita em termos: temporais (tempo de vida do produto; horizonte dos processos e impactos); de extensão espacial (local, nacional, regional continental e global) e das técnicas e nível de sofisticação do estudo em relação aos objetivos.

Ainda, nesta fase, é definido a Unidade Funcional (UF) e as Fronteiras do Sistema. A Unidade Funcional especifica as funções que as alternativas de bem (ou serviço) na ACV devem fornecer. O inventário da ACV resulta em uma compilação das entradas

ambientais (recursos naturais) e das saídas (emissões) de todos os processos do ciclo de vida do produto expressos por unidade funcional (Finnveden & Potting, 2014). No que diz respeito a Fronteira do Sistema, entende-se ser a delimitação física ou subjetiva onde se deseja fazer as aplicações da avaliação, seja um limite físico de entradas e saídas de um determinado processo, seja restrições de dados ou até mesmo público-alvo da pesquisa.

A segunda fase é a de Análise de Inventário, que trata da reunião de todas as informações necessárias e suficientes para o desenvolvimento do estudo e cumprimento do objetivo do estudo definido na fase anterior. Nesta etapa, os dados devem estar relacionados à unidade funcional definida na definição do objetivo e escopo (Muralikrishna & Manickam, 2017). É nesta fase que demanda maior tempo e recursos, pois deve-se buscar os dados na literatura, banco de dados eletrônicos, órgãos públicos e privados, entrevistas com especialistas da área, dados de coleta em campo, entre outros, sendo necessário, ainda, observar as características de precisão, consistência, completude e representatividade dos dados.

A terceira fase é chamada de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV). Após a reunião de todos os dados disponíveis e essenciais para a ACV, é estabelecido a forma como esses dados serão tratados para gerar os potenciais impactos relativos à atividade. Hauschild, Rosenbaum & Olsen (2018) reiteram que essa fase da AICV visa avaliar a magnitude da contribuição de cada fluxo elementar para um determinado impacto no meio ambiente. Os autores ainda esclarecem que essa etapa é amplamente automatizada com uso de ferramentas capaz de processar todos os dados e revertê-los em categorias de impactos, através dos fatores de caracterização que são multiplicados pelos dados de entrada e saída do sistema. Nessa fase, também é escolhida a método da AICV utilizada para processamento dos dados, essa escolha pode depender de alguns fatores, como por exemplo o objetivo da pesquisa e o local em que será desenvolvida.

Existem vários métodos de AICV desenvolvidos e bem consolidados. Sendo os mais reconhecidos e utilizados o CML, Eco-indicador 99, EDIP 2003, IMPACT 2002+, ReCiPe (Piekariski *et al.*, 2012). Porém, esses métodos desenvolvidos consideram impactos ambientais globais e/ou relativos a regiões específicas onde foram desenvolvidos, como Canadá, Europa, Japão e Estados Unidos. Sendo assim, estes métodos não refletem necessariamente a situação de países como o Brasil, o qual ainda

não possui métodos de AICV direcionados em específico para as características ambientais do país (Silva, 2010 *apud* Piekarski *et al.*, 2012). Os impactos ambientais resultantes se dividem em impactos de *midpoint* (impactos intermediários) e impactos de *endpoint* (impactos finais). Os impactos de *midpoint* são agrupados e categorizados de acordo com seu dano causado as áreas de proteção (*endpoint*), essas áreas de proteção englobam os danos à saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos.

Uma metodologia bastante utilizada no Brasil e no mundo é o ReCiPe, além do CML e Ecoindicador 99. O método ReCiPe é uma continuação dos métodos Ecoindicador 99 e CML que integra e harmoniza as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura comum e consistente (Jourdain *et al.*, 2019; Mendes, Bueno & Ometto, 2016). Segundo Huijbregts *et al.* (2017), a atualização da metodologia ReCiPe em 2016 forneceu fatores de caracterização mais representativos em uma escala global, além do aprimoramento de métodos aplicados para modelar fatores de *midpoint* e *endpoint*. As categorias de impacto de *midpoint* do método ReCiPe são: Acidificação terrestre, Depleção da camada de ozônio, Depleção de água, Depleção de combustíveis fósseis, Depleção de recursos minerais, Ecotoxicidade em água doce, Ecotoxicidade marinha, Ecotoxicidade terrestre, Eutrofização de água doce, Eutrofização marinha, Formação de material particulado, Formação de oxidantes fotoquímicos, Mudanças climáticas, Ocupação de solo agrícola, Ocupação de solo urbano, Radiação ionizante, Toxicidade humana e Transformação de solo natural. E as áreas de proteção de *endpoint* são: danos à disponibilidade de recursos, danos à diversidade dos ecossistemas, e danos à saúde humana.

Por fim, a quarta fase é a etapa de interpretações dos resultados. Nessa fase, os resultados da ACV são examinados levando em conta o objetivo definido na primeira etapa da ACV (Santos, Carvalho & Barbosa-Póvoa, 2022). Segundo Hauschild, Rosenbaum & Olsen (2018) a etapa de interpretação é a fase da ACV onde os resultados das outras fases são considerados em conjunto e analisados à luz das incertezas dos dados aplicados e as suposições que foram feitas e documentadas ao longo do estudo. Os autores afirmam que o resultado da interpretação deve ser conclusões ou recomendações que respeitem as intenções da definição do objetivo e as restrições que é imposto no estudo através da definição do âmbito e levem em consideração a adequação da unidade funcional e dos limites do sistema. A interpretação deve apresentar as conclusões da ACV

de forma compreensível que auxilie os usuários do estudo a avaliar a sua robustez e potenciais fraquezas.

3.5. Avaliação do Ciclo de Vida em Estações de Tratamento de Esgotos

No âmbito da gestão de águas residuais, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) funciona como uma metodologia capaz de mensurar a geração de impactos ambientais potenciais causados pelo processo de tratamento de esgoto, diagnosticar onde estão as prováveis falhas do sistema e indicar as oportunidades de melhorias em todos os estágios para um tratamento sanitário eficiente e sustentável. Isso contrasta com o motivo convencional para qual as estações de tratamento de águas residuais são construídas, no qual geralmente se concentram apenas em atender aos padrões de descarga em corpos hídricos.

A ACV pode conceber inúmeras abordagens diferentes em Estações de Tratamento de Efluentes, desde uma análise de impactos ambientais gerados pelo tratamento, até a comparação do desempenho de tecnologias diferentes. Amaral, Rietow & Aisse (2021) trabalharam com os dois impactos ambientais gerados por uma estação de tratamento de efluentes composta por um UASB seguido de filtros biológicos que utiliza aterro sanitário e agricultura como alternativas de disposição de lodo. Os autores observaram que as mudanças climáticas, acidificação terrestre e toxicidade humana foram os impactos mais notáveis decorrentes do tratamento e destacam que uso de lodo na agricultura obteve maior potencial de impacto ambiental em comparação ao uso em aterros sanitários.

Já Mayer, Bhandari & Gath (2021) estudaram especificamente diferentes abordagens tecnológicas para tratar o lodo de esgoto. Os autores compararam a digestão anaeróbia do lodo com sua distribuição à incineração centralizada, à carbonização hidrotérmica descentralizada seguida por incineração centralizada e à pirólise descentralizada, e verificaram que a digestão anaeróbia do lodo, seguida da sua distribuição, resultou nos menores impactos ambientais na maioria das categorias, mas apresenta um elevado potencial para contaminar gravemente os solos agrícolas, e, contanto que tanto a ecotoxicidade como a toxicidade humana não estão comprometidas, esta via de tratamento foi considerada preferencial. Os outros tratamentos foram considerados igualmente preferenciais, com exceção da pirólise descentralizada que em

geral apresentou impactos ambientais semelhantes ou maiores em todas as categorias de impacto.

Em seu estudo, Resende *et al.* (2015) avaliaram os potenciais impactos ambientais de dois sistemas de tratamento de esgoto: lodos ativados convencional (LAC) e UASB seguido de lodos ativados (UASB + LAC). Eles observaram que dentre as dez categorias de impacto ambiental avaliadas, o sistema LAC apresentou pior desempenho ambiental do que o sistema UASB + LAC em oito delas, e que a eletricidade requerida para a aeração desses sistemas teve uma grande influência para as categorias de impacto de acidificação e ecotoxicidade marinha.

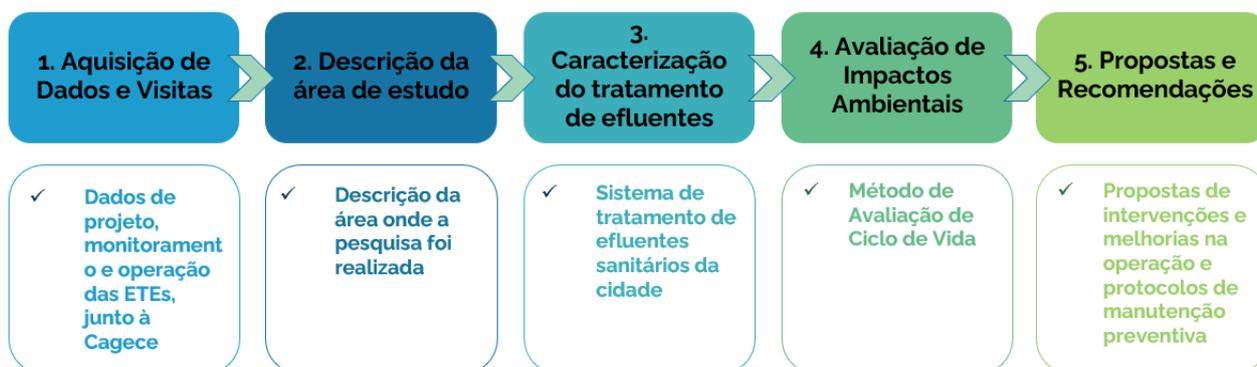
A abordagem de Foglia *et al.* (2021) foca na investigação de impactos ambientais e econômicos da estação de tratamento de efluentes estudada e na recuperação de água para utilização na agricultura em Milão, Itália. Para isso, os autores aplicaram a ACV em métodos alternativos de desinfecção e propuseram a substituição de lodos ativados pelo UASB seguido de um biorreator de membrana anaeróbica como tratamento terciário. A ACV demonstrou claramente que a reutilização de água recuperada gera mais benefícios ao ambiente do que a simples descarga em corpo receptor. Outra conclusão verificada pelos autores foi a ausência de diferenças significativas entre a desinfecção por ácido peracético ou UV. Além de que a alternativa proposta pelo UASB seguido do biorreator oferece mais benefícios ambientais quando comparados aos demais cenários propostos nas categorias de impactos de mudanças climáticas, esgotamento de combustíveis fósseis, esgotamento de recursos minerais e ecotoxicidade terrestre, porém essa configuração oferece maior impacto de eutrofização de água doce.

Diante dos estudos abordados acima é possível compreender o leque de oportunidades que a ACV pode oferecer ao contexto de tratamento de águas residuárias. No entanto, vale salientar que a ACV não é um tomador de decisões por si só, mas uma ferramenta para fornecer informações para as partes interessadas considerarem em conjunto com outras informações complementares, além disso, a ACV não pode prever com precisão o desempenho ambiental dos sistemas de águas residuais. Portanto, deve ficar claro para os tomadores de decisão que avaliação de impactos é papel da Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) e não da ACV, podendo a ACV ser considerada parte da etapa de AIA (Corominas *et al.*, 2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa seguiu as etapas metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Etapas Metodológicas da pesquisa.



Fonte: A autora (2024)

A primeira etapa do trabalho envolveu a aquisição dos dados de projeto, monitoramento e operação das ETEs, junto à Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece, bem como a realização de visitas técnicas nas estações de tratamento de esgotos da cidade. Na segunda etapa, foi realizada a caracterização da área de estudo, abordando tanto as principais características da cidade, onde a pesquisa foi conduzida, quanto a situação atual do sistema de esgotamento sanitário. Essa descrição forneceu uma melhor compreensão das condições locais, permitindo conhecer os desafios e as peculiaridades do município.

A terceira etapa consistiu em uma caracterização do sistema de tratamento de efluentes sanitários, destacando suas principais características, funcionamento e eficiência do tratamento do efluente. Na quarta etapa, foi realizada a avaliação dos impactos ambientais mediante a aplicação da ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A estrutura da ACV baseou-se em procedimentos definidos em Norma Brasileira ABNT NBR ISO 14.040: 2009 que detalha os requisitos para a condução de uma Avaliação do Ciclo de Vida. As etapas 1, 2 e 3, que antecedem a Avaliação do Ciclo de Vida, fundamentaram um melhor entendimento dos impactos ambientais causados.

Adicionalmente, com base nas avaliações realizadas ao longo do estudo, a quinta etapa envolveu a indicação de melhorias operacionais e ajustes nos protocolos de manutenção, visando a otimização dos processos. Essas recomendações foram elaboradas

com foco em uma gestão sustentável, buscando não apenas o cumprimento da legislação, mas também a minimização de impactos ambientais gerados pelas ETEs.

4.1. Aquisição de dados

As informações utilizadas para fundamentar o presente estudo foram fornecidas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece, que é responsável pelo monitoramento e operação das Estações de Tratamento de Esgotos em Juazeiro do Norte. Os dados solicitados à Cagece foram informações a respeito de:

- Projeto;
- Operação; e
- Monitoramento.

Esses dados foram adquiridos por meio de solicitações através do portal de transparência do Governo do Estado do Ceará, entrevistas com o núcleo gestor e visitas técnicas supervisionadas às Estações de Tratamento de Esgotos da cidade.

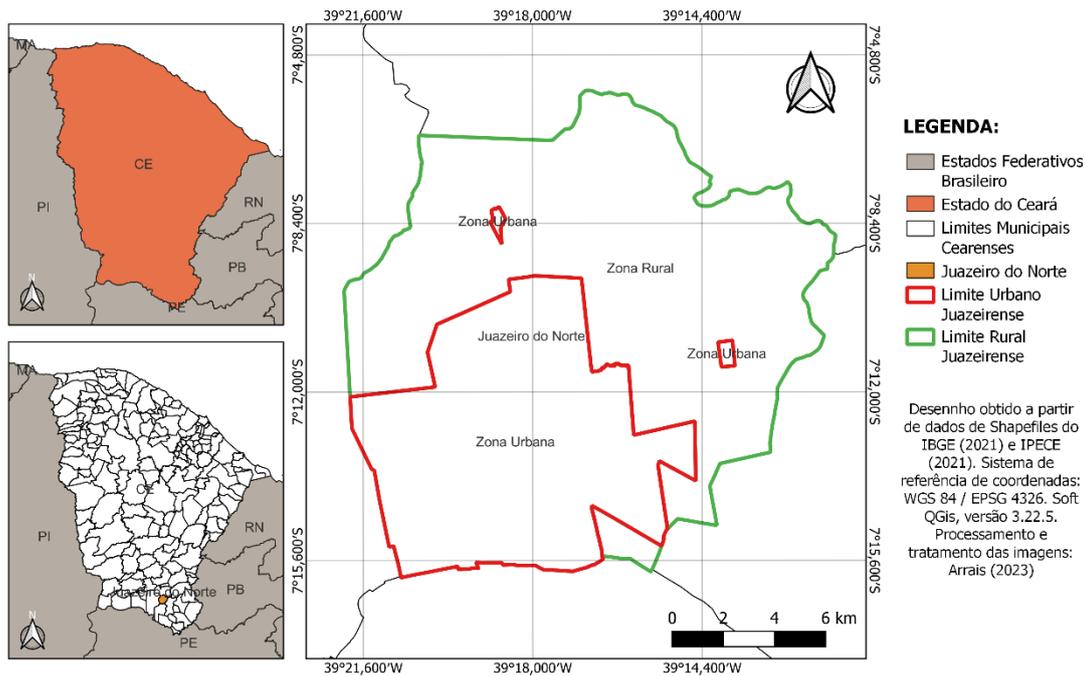
4.1.1. Tratamento estatístico dos dados

Os dados brutos foram submetidos à estatística descritiva, médias, medianas, variâncias e distribuições. Para realização dessa etapa, a ferramenta utilizada foi o *software* Excel do Pacote Microsoft Office.

4.2. Descrição da área de estudo

O presente estudo foi realizado na região urbana de Juazeiro do Norte, município brasileiro do Estado do Ceará, localizado na Região Metropolitana do Cariri, no sul do estado, numa posição estratégica, nas coordenadas geográficas 7°13'44.79"S e 39°18'44.85"O, distante aproximadamente 490 km da capital, Fortaleza. A Figura 5 apresenta a localização geográfica da área de estudo, bem como destaca a divisão territorial da área urbana e área rural do município.

Figura 5 - Localização geográfica da área de estudo.



Fonte: A autora (2023)

Segundo o Censo 2022 (IBGE, 2022), o município de Juazeiro do Norte possui atualmente uma população de 286.120 pessoas vivendo num espaço de apenas 258,788 km², no qual se traduz em uma alta densidade demográfica. Os habitantes são distribuídos em 1.105,62hab/km², em 42 bairros e alguns sítios. Essa densidade demográfica enquadra Juazeiro do Norte na lista dos 100 municípios brasileiros com maior concentração de pessoas por quilômetros quadrados, ocupando a posição 99°. No estado do Ceará, esse município ocupa a terceira posição, perdendo apenas para a capital, Fortaleza, e o município de Caucaia.

No que diz respeito ao saneamento básico da cidade de Juazeiro do Norte, a mesma é abastecida integralmente por água de poços, com cobertura de aproximadamente 98%. Em contrapartida o sistema de esgotamento da cidade abrange uma pequena parcela da população de 35,5% segundo o Cagece, companhia responsável pela operação e monitoramento do abastecimento de água e esgotamento sanitário. A grande maioria da população dispõe seus efluentes em fossas sépticas e sumidouros ou não tem nenhum tipo de tratamento.

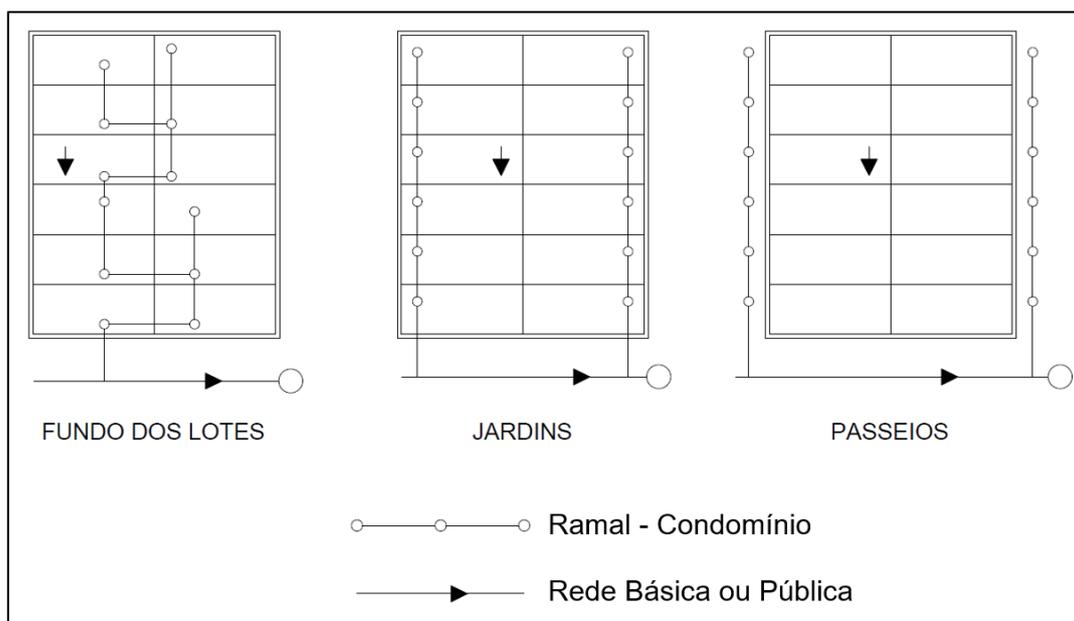
Segundo a Cagece, atualmente são 16 (dezesesseis) bairros juazeirenses contemplados pela rede coletora de esgotos, do total de 42 (quarenta e dois), são eles: Mutirão, Triângulo, Lagoa Seca, João Cabral, Romeirão, Pirajá, Santa Tereza,

Franciscanos, Pio XII, Vila Fátima, São Miguel, Socorro, Salesianos, Centro, Vila Três Marias e Leandro Bezerra. Na realidade, apenas parte desses esgotos é coletada, embora a rede coletora tenha capacidade para recebê-los. Isso ocorre por resistência da população.

Além da coleta de esgoto nos bairros citados acima, o esgotamento sanitário ainda contempla os condomínios do Projeto Minha Casa Minha Vida do governo federal. São 6 conjuntos de casas existentes na cidade: MCMV Leandro Bezerra, MCMV Tenente Coelho, MCMV Manoel Santana, MCMV São Sebastião, MCMV Padre Cicero 2 e MCMV Padre Cicero 3. Esses projetos são obrigatoriamente concebidos com a coleta de esgoto, porém somente o MCMV Tenente Coelho possui ETE própria, os efluentes dos demais conjuntos são direcionados para outra estação de tratamento. Ao todo, a cidade de Juazeiro do Norte possui 26.446 ligações ativas distribuídas em 16 (dezesseis) bairros e nos conjuntos habitacionais.

O sistema de coleta de esgotos implantado na cidade de Juazeiro do Norte é do tipo convencional e condominial. A Figura 6 apresenta os sistemas condominiais utilizados na cidade do Juazeiro do Norte.

Figura 6 - Sistemas condominiais utilizados na cidade do Juazeiro do Norte.



Fonte: A autora (2023)

O Quadro 2 elenca o tipo de sistema existente em cada bairro, bem como o material da tubulação.

Quadro 1 - Tipo de sistema de coleta de esgoto em cada bairro atendido.

Tipo de sistema em cada bairro		
Bairro	Tipo de sistema	Material
Mutirão	Condominial	PVC Ocre
Triângulo	Condominial	PVC Ocre
Lagoa Seca	Convencional	PVC Ocre
João Cabral	Condominial	PVC Ocre
Romeirão	Condominial	PVC Ocre
Pirajá	Condominial	PVC Ocre
Santa Tereza	Condominial	PVC Ocre
Franciscanos	Condominial	PVC Ocre
Pio XII	Condominial e Interceptor	PVC Ocre, Concreto e DeFofó
Vila Fátima	Condominial	PVC Ocre e Fofó
São Miguel	Convencional e Interceptor	PVC Ocre
Socorro	Convencional e Interceptor	PVC Ocre e Concreto
Salesianos	Convencional	PVC Ocre
Centro	Convencional	PVC Ocre
Vila Três Marias	Condominial	PVC Ocre
Leandro Bezerra	Condominial	DeFofó
MCMV Leandro Bezerra	Convencional	PVC Ocre
MCMV Tenente Coelho	Convencional	PVC Ocre
MCMV Manoel Santana	Convencional	PVC Ocre
MCMV São Sebastião	Convencional	PVC Ocre
MCMV Padre Cícero 2	Convencional	PVC Ocre
MCMV Padre Cícero 3	Convencional	PVC Ocre

Fonte: CAGECE (2022)

4.2.1. Tratamento de efluentes sanitários em Juazeiro do Norte – CE

O tratamento de efluentes da cidade de Juazeiro do Norte é composto por soluções individuais e coletivas. As residências da maioria dos bairros ainda destinam seus efluentes em fossas sépticas e sumidouros, uma pequena parcela é coletada e direcionada às Estações de Tratamento de Esgotos. Ao todo, Juazeiro do Norte possui 4 (quatro) ETEs: ETE Malvas, ETE Tenente Coelho, ETE Três Marias e ETE Prourb. O tratamento aplicado em cada ETE, a localização das mesmas e do emissário são apresentados no Quadro 3.

Quadro 2 - Tratamento aplicado em cada ETE, localização das mesmas e do emissário.

Estação	Bairro	Tecnologia	Localização do emissário
ETE Malvas	Juvêncio Santana	Tratamento Preliminar > Lagoa Anaeróbia >	Rio Batateiras

		Lagoa Facultativa > Lagoa de Maturação > Emissário	
ETE Três Marias	Vila Três Marias	Tratamento Preliminar > Reator UASB > Cloração > Emissário	Rio Batateiras
ETE Tenente Coelho	Aeroporto	Tratamento Preliminar > Reator UASB > Filtro Submerso Aerado com Decantador Externo > Decantador Convencional > Cloração > Emissário	Riacho Timbaúbas
ETE Prourb	Triângulo	Decanto Digestor > Filtro Anaeróbio > Cloração > Emissário	Galeria de Águas Pluviais

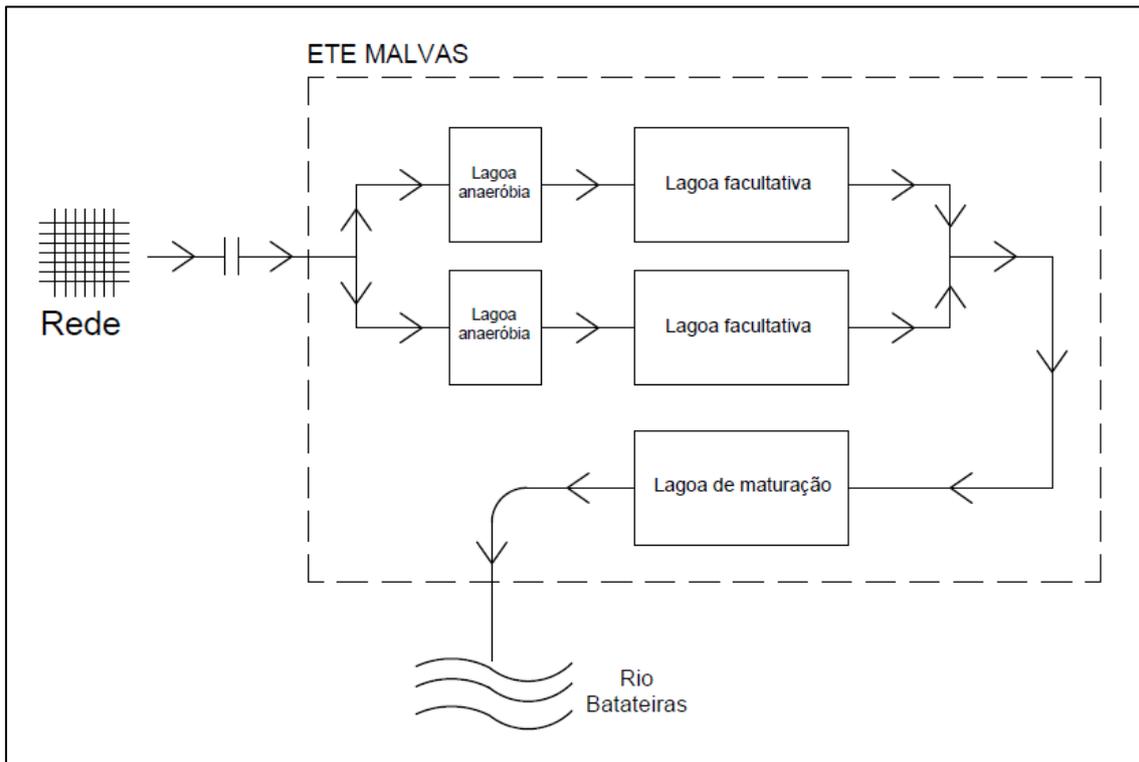
Fonte: adaptado Cagece (2023)

4.2.1.1. ETE Malvas

A ETE Malvas é responsável por tratar a maior parte do esgoto coletado e está localizada no Bairro Juvêncio Santana. Segundo a Cagece, essa estação recebe aproximadamente 80% dos 35,5% dos esgotos coletados da cidade e é composta por Lagoas de Estabilização. Foi projetada para receber uma vazão de 250 L/s, mas atualmente opera com Vazão Média de 120 L/s, ou seja, aproximadamente 50% do seu potencial máximo. No entanto, em visita feita à ETE, aproximadamente às 9:30 h foi observada uma vazão de 25,3L/s.

Esta ETE recebe efluentes de 9 (nove) Estações Elevatórias de Efluentes (EEE) distribuídas pela cidade e que possuem tratamento preliminar constituído por gradeamento, caixa de areia e calha Parshall. Os efluentes das EEEs são reunidos na entrada da ETE Malvas e em seguida bifurcados para duas lagoas anaeróbias que são seguidas por duas facultativas. Após estas últimas lagoas os efluentes são reunidos e direcionados a uma lagoa de maturação, e em seguida transportados por um emissário para desaguar no Rio Batateiras. A Figura 7 mostra a representação da ETE Malvas em croqui.

Figura 7 - Croqui da ETE Malvas do Município de Juazeiro do Norte - CE.



Fonte: adaptado Cagece (2023)

4.2.1.2. ETE Três Marias

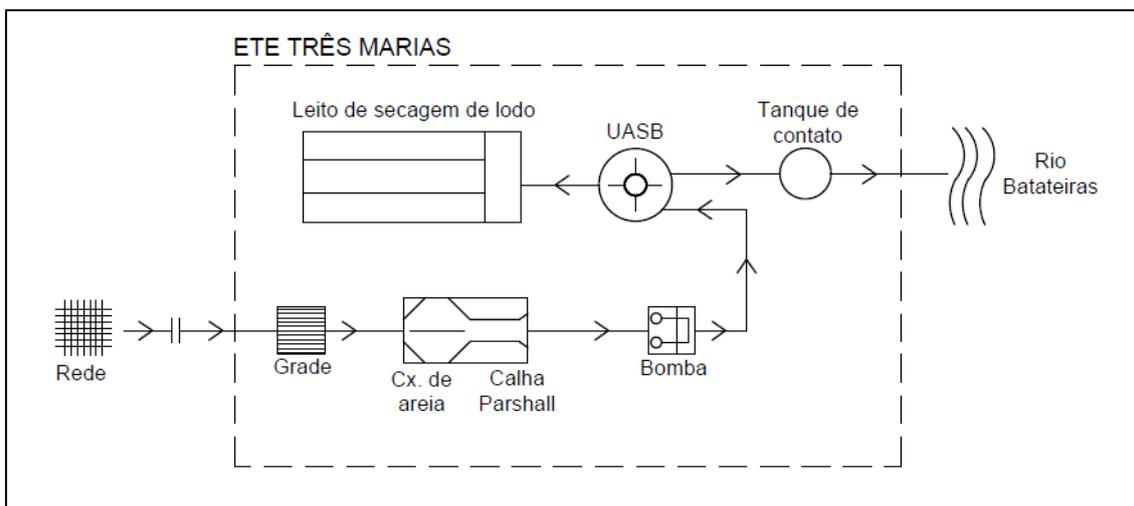
A ETE Três Marias fica bem próxima da ETE Malvas e foi construída com o intuito de contemplar as residências do Bairro Três Marias que por motivo da topografia, os efluentes teriam dificuldade de serem direcionados à ETE Malvas. A solução encontrada pelos técnicos da administração pública e da prestadora de serviços foi construir uma estação de tratamento de efluentes exclusiva para a comunidade.

Assim, o porte da ETE é pequeno e, atualmente, a estação possui aproximadamente 150 ligações ativas, de acordo com a Cagece. A Vazão Média afluyente é de 3,0 L/s e não há medição da vazão de saída da ETE. Em visita feita à estação foi verificado uma vazão afluyente de 3,2 L/s.

É constituída por tratamento preliminar com gradeamento, caixa de areia e calha Parshall, seguida por um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* - UASB). Após o Reator UASB, o efluente é descarregado em um tanque de contato para desinfecção com cloro, e transportado pelo emissário para desaguar no Rio Batateiras (Figura 8). O lodo gerado no reator UASB é desaguado em um leito de secagem e uma vez por semana removido e depositado em

espaço predestinado para tal fim na ETE Malvas. É importante ressaltar que não há nenhuma ação de reúso para lodo gerado na ETE Três Marias.

Figura 8 - Croqui da ETE Três Marias do município de Juazeiro do Norte - CE.



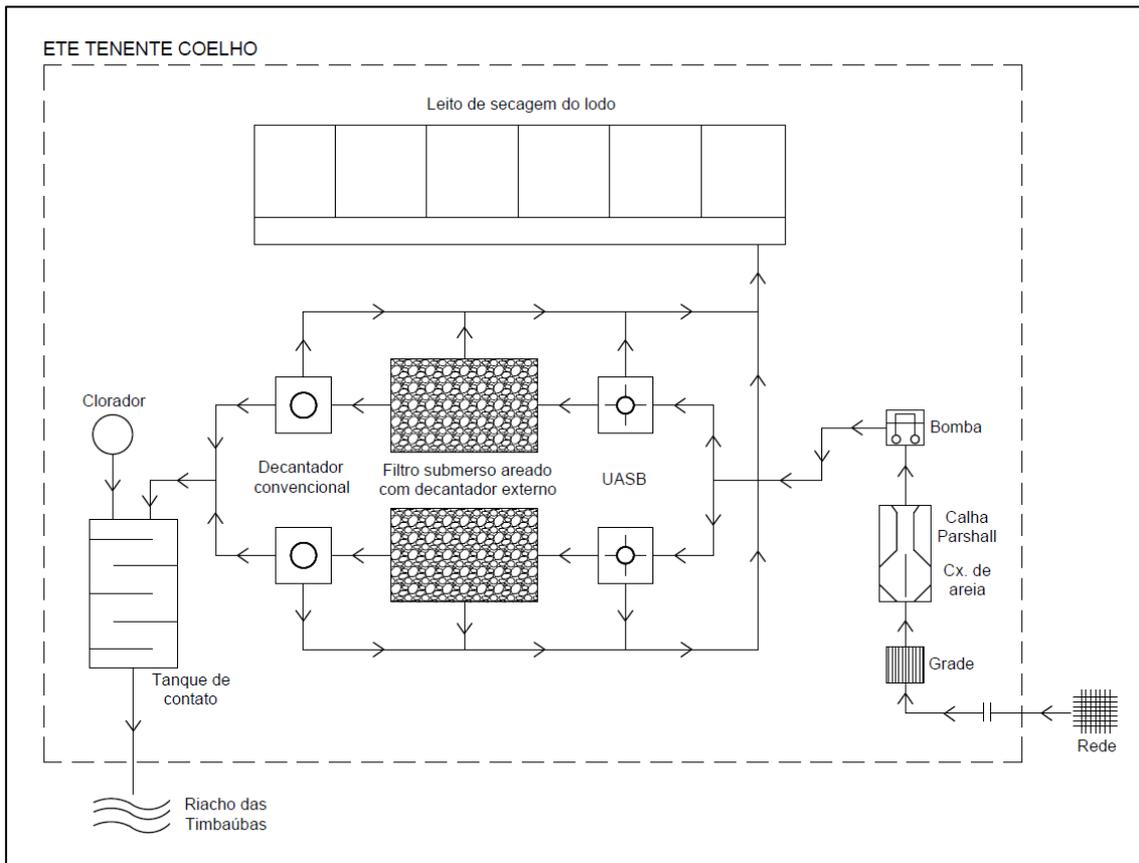
Fonte: adaptado Cagece (2023)

4.2.1.3. ETE Tenente Coelho

A ETE Tenente Coelho trata os esgotos do conjunto habitacional Minha Casa Minha Vida Tenente Coelho, localizado no Bairro Aeroporto em Juazeiro do Norte. Essa estação foi concebida junto com o projeto habitacional mencionado, pois a implantação da coleta e tratamento de esgoto para esse projeto é requisito obrigatório. Assim como no Bairro Três Marias, direcionar os esgotos para a ETE Malvas seria inviável por conta da topografia e custo-benefício, por isso optou-se por construir uma estação de tratamento de efluentes exclusiva para esses conjuntos habitacionais.

A ETE é pequena, possui 1274 ligações ativas e opera com uma vazão de 4,0 L/s. Em visita à estação, foi verificado uma vazão afluyente de 4,2 L/s. É composta por tratamento preliminar constituído de gradeamento, caixa de areia e calha Parshall, seguido de um Reator UASB, Filtro Submerso Aerado, Decantador Convencional e Tanque de Contato para cloração. Após o tratamento, o emissário leva o efluente ao ponto de lançamento final, no Riacho Timbaúbas, Figura 9. Os lodos gerados no UASB, Filtros e Decantadores, são encaminhados para o leito de secagem e 1 (uma) vez por semana é removido e depositado em espaço predestinado para tal fim na ETE Malvas. Também não há nenhuma iniciativa que reutilize o lodo gerado pela estação.

Figura 9 - Croqui da ETE Tenente Coelho do município de Juazeiro do Norte - CE.



Fonte: adaptado Cagece (2023)

4.2.1.4 ETE Prourb

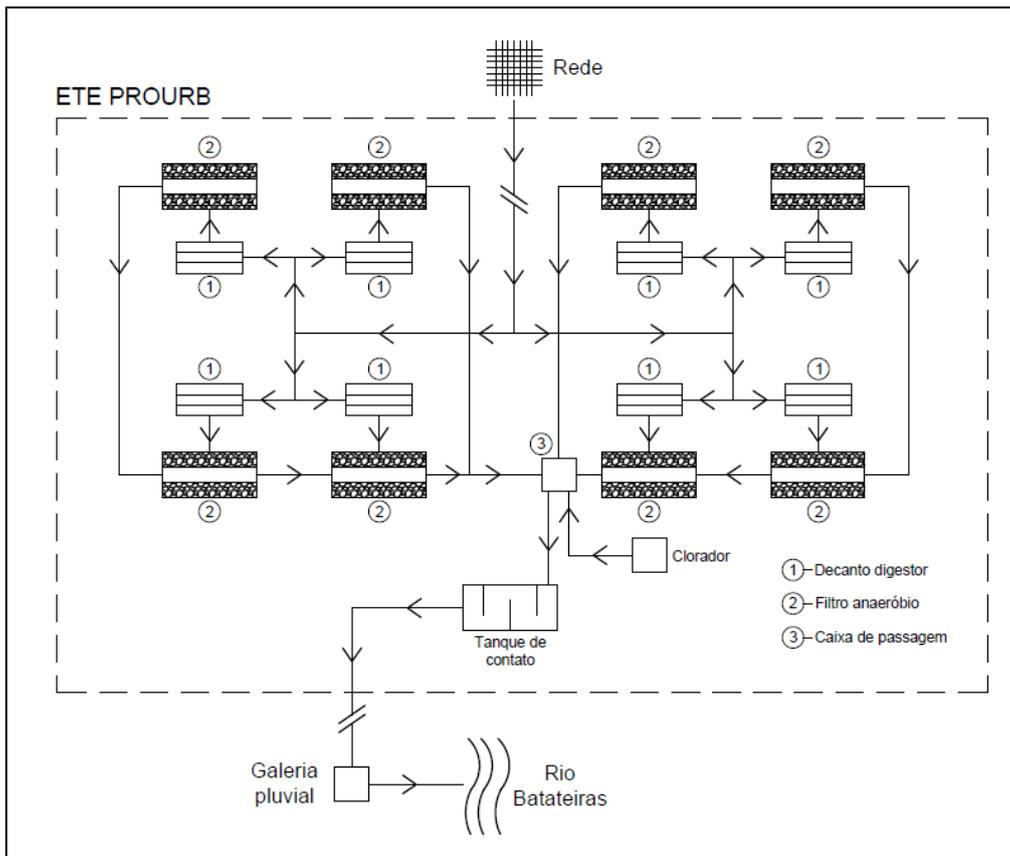
A ETE Prourb é um projeto da prefeitura em parceria com o governo estadual, que tinha o intuito de descentralizar o serviço e levar a coleta e tratamento de efluentes para a população. A prefeitura não conseguiu ter bom êxito na operação da estação, por isso a Cagece assumiu a operação e monitoramento da ETE, que está localizada no Bairro Triângulo.

Com uma estrutura pequena, a ETE Prourb contempla apenas 150 ligações ativas, aproximadamente, segundo a Cagece. O PDM (2022) assume 350 ligações ativas. No entanto, esse número é incerto, tendo em vista que a Cagece não tem acesso aos projetos dessa ETE. Outro ponto importante a ser citado, é que a estação não possui tratamento preliminar com medidor de vazão, por esse motivo não há como conhecer a vazão de entrada na ETE.

Ao chegar na ETE, o efluente tem sua vazão dividida em 8 partes e é conduzido a um conjunto de decanto-digestores seguidos de filtros anaeróbios. O efluente é unificado

novamente e segue para um tanque de contato no qual é adicionado cloro. Após o tratamento o efluente é conduzido pelo emissário ao seu ponto de lançamento, uma galeria de águas pluviais que deságua no Rio Salgadinho. Essa galeria é localizada na Avenida Pe. Cícero (Figura10). Devida à insuficiência de dados, a ETE Prourb não participou das análises propostas nesse trabalho.

Figura 10 - Croqui da ETE Prourb do município de Juazeiro do Norte - CE.

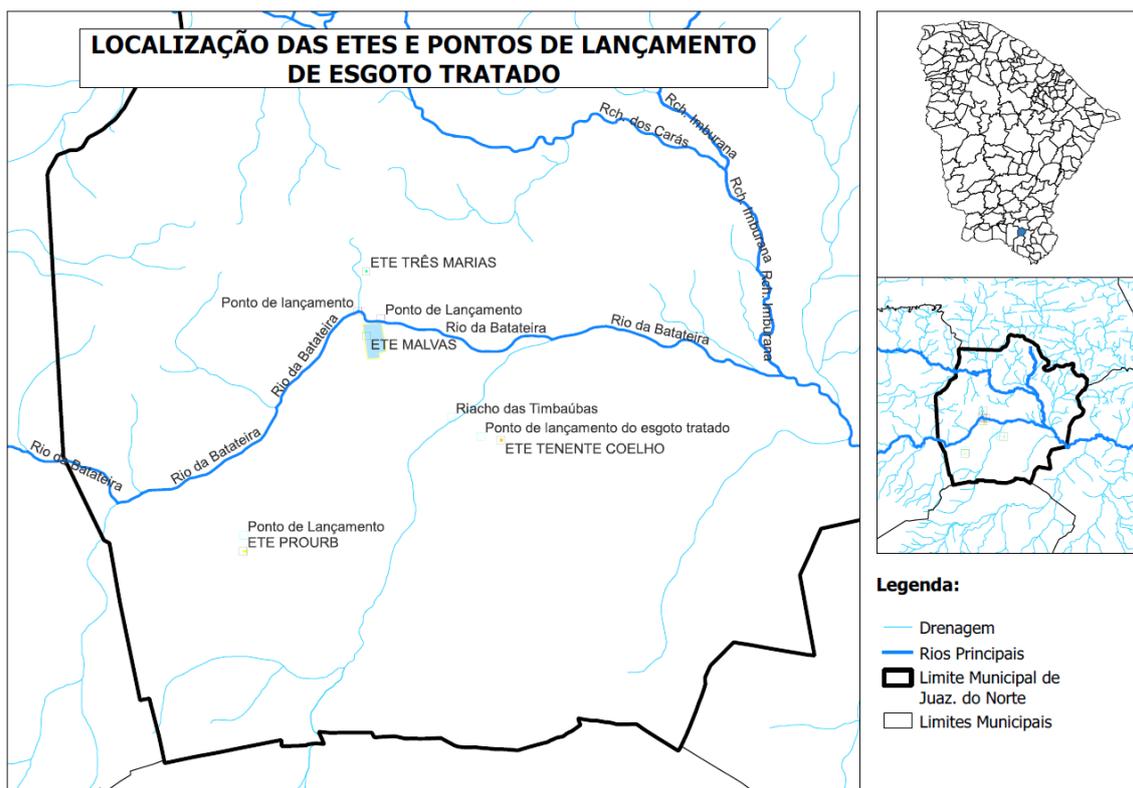


Fonte: adaptado Cagece (2023)

4.2.1.5 Vias de escoamento e Emissários

A cidade de Juazeiro do Norte é cortada por alguns rios e riachos, que deságuam no principal rio da região, o Rio Salgadinho. O rio que corta a cidade é o Rio Batateiras, havendo ainda o Riacho dos Macacos, Riacho dos Carás, Riacho Imburana e Riacho Timbaúbas, Figura 11.

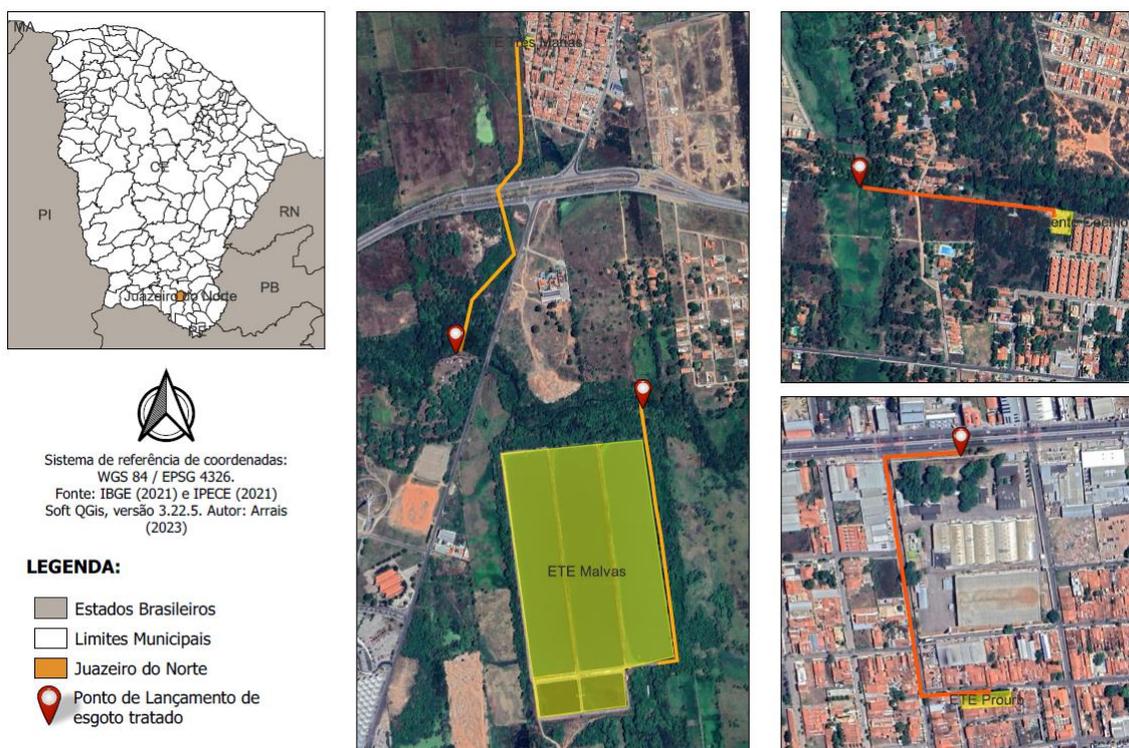
Figura 11 - Localização das ETEs e pontos de lançamento de esgoto tratado.



Fonte: A autora (2023)

É possível visualizar na Figura 11 que os efluentes tratados são lançados principalmente no Rio Batateiras e Riacho Timbaúba. O ponto de lançamento da ETE Malvas e ETE Três Marias é no Rio Batateiras, e a ETE Tenente Coelho destina seu esgoto tratado no Riacho das Timbaúbas. A ETE Prourb leva seu efluente tratado até uma galeria de águas pluviais que deságua no Rio Batateiras. A Figura 12 apresenta o ponto de destinação do efluente tratado de cada ETE mencionada.

Figura 12 – Imagens de satélite das Estações de Tratamento de Esgotos e localização dos pontos de lançamento.



Fonte: A autora (2023)

O Quadro 4 apresenta as características construtivas dos emissários que transportam os efluentes das ETEs para o corpo receptor.

Quadro 3 - Características construtivas dos emissários das ETEs.

Características dos emissários	Estações de Tratamento de Efluentes			
	ETE Malvas	ETE Três Marias	ETE Tenente Coelho	ETE Prourb
DN (mm)	500	150	250	150
Material da tubulação	FOFO	PVC Ocre	PVC Ocre	PVC Ocre
Ponto de Lançamento	Rio Batateiras	Rio Batateiras	Riacho das Timbaúbas	Galeria de águas pluviais e depois Rio Batateiras

Fonte: adaptado PDM (2022)

4.3 Caracterização do Sistema de Tratamento de efluentes

Essa caracterização compreendeu o desempenho operacional das ETEs e o enquadramento das mesmas aos padrões estabelecidos pelas legislações federal e estadual. Esse desempenho foi embasado nas concentrações dos afluentes e efluentes das estações. O Quadro 5 apresenta os indicadores utilizados na avaliação de desempenho de cada ETE.

Quadro 4 - Indicadores dos afluentes e efluentes das ETEs.

ETE Malvas	
Afluente	Efluente
<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) • Coliformes totais (NMP/100 mL) • E. Coli (NMP/100 mL) • pH • Temperatura (°C) 	<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) • Coliformes totais (NMP/100 mL) • E. Coli (NMP/100 mL) • pH • Temperatura (°C) • Materiais Flutuantes • Oxigênio Dissolvido (mg/L)
ETE Três Marias	
<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) • Cloro Residual (mg/L) • Coliformes totais (NMP/100 mL) • E. Coli (NMP/100 mL) • pH • Temperatura (°C) • Materiais Flutuantes
ETE Tenente Coelho	
<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> • DQO (mg/L) • Cloro Residual (mg/L) • Coliformes totais (NMP/100 mL) • E. Coli (NMP/100 mL) • pH • Temperatura (°C) • Materiais Flutuantes

Fonte: A autora (2024)

A Cagece não realiza a análise de todos os indicadores nos afluentes das ETEs Três Marias e Tenente Coelho, restringindo-se apenas ao indicador de DQO. No entanto, analisa vários indicadores nos efluentes, Quadro 5. Dessa forma, a análise de desempenho realizada neste trabalho se limitou ao indicador DQO. Uma análise mais completa foi

realizada com a ETE Malvas devido à um maior número de indicadores avaliados nos afluentes e efluentes.

Quanto ao atendimento à legislação, as concentrações dos indicadores dos esgotos tratados foram comparadas aos padrões descritos na Resolução CONAMA nº 430/2011 (federal) e Resolução COEMA nº 02/2017 (estadual). O Quadro 6 apresenta os limites estabelecidos pelas resoluções federal e estadual, para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Quadro 5 - Padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011.

Resolução CONAMA nº 430/2011 e Resolução COEMA nº 02/2017		
Indicador	Padrão de Lançamento	Legislação
pH	5 - 9	CONAMA e COEMA
Temperatura	Inferior a 40°C	CONAMA e COEMA
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff	CONAMA e COEMA
DBO ₅	Máximo de 120 mg/L ou eficiência de remoção mínima de 60% de DBO	CONAMA e COEMA
Substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas)	Até 100 mg/L	CONAMA e COEMA
Materiais flutuantes	Ausentes	CONAMA e COEMA
Sulfeto	Até 1 mg/L	COEMA
NMP de coliformes termotolerantes	Até 5000 NMP /100ml	COEMA
Sólidos suspensos totais	Até 150,0 mg/L para lagoas de estabilização; Até 100 mg/L, para as demais tecnologias.	COEMA

Fonte: adaptado BRASIL (2011)

A Resolução COEMA nº 02/2017 é uma legislação a nível estadual desenvolvida pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE), que

complementa a Resolução CONAMA nº 430/2011 com alguns indicadores a mais. Em seu artº 12, estabelece os padrões de lançamento para efluentes sanitários.

A Cagece faz a identificação da concentração de matéria orgânica apenas com análise de DQO, porém os padrões de lançamento assumem a DBO como padrão. Tendo em vista que não há limite máximo para o lançamento de DQO na legislação, fez-se necessário uma conversão de DQO para DBO. Rodrigues (2005), estudando a ETE Malvas, verificou a relação de 1,5 entre esses dois indicadores, conforme descrito na Equação 1.

$$DBO_{5(mg.L^{-1})} = DQO / 1,5_{(mg.L^{-1})} \quad \text{Equação 01}$$

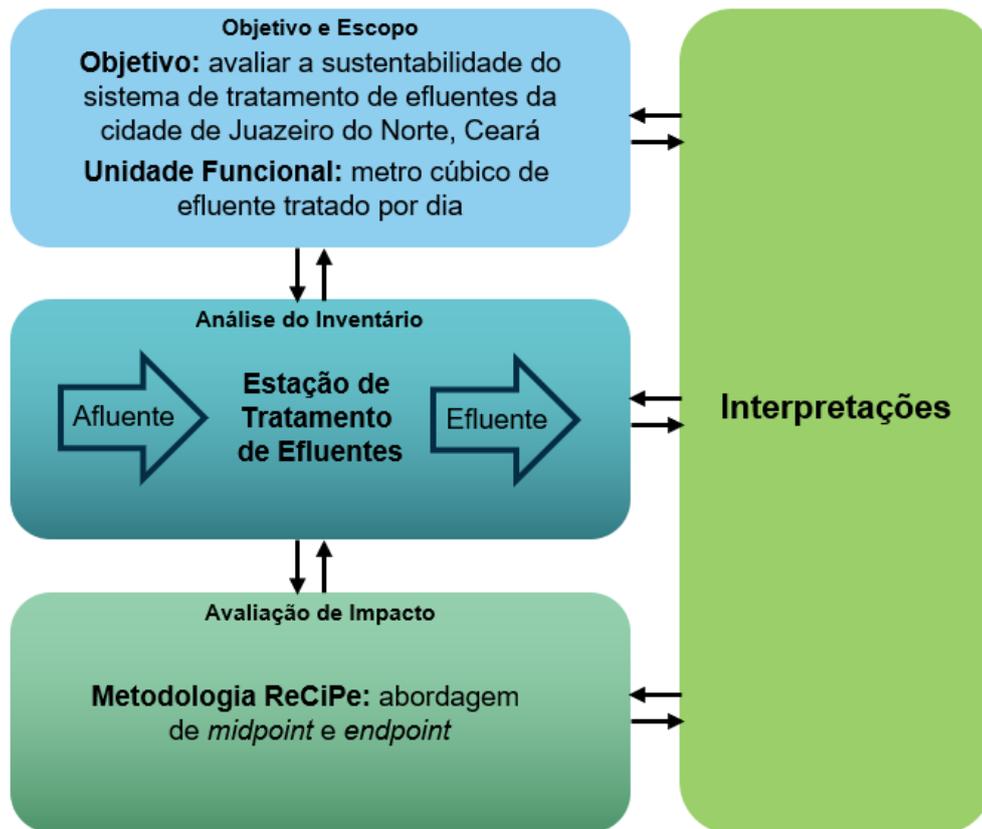
Para as ETEs Três Marias e Tenente Coelho, foi utilizada a mesma relação descrita pela Equação 1. Apesar do estudo desenvolvido por Rodrigues (2005) ter sido especificamente na ETE Malvas, foi conveniente utilizar a mesma relação considerando que são estações que tratam efluentes da mesma localidade.

Foi realizado o teste de variância (ANOVA) para comparar às eficiências de remoção de matéria orgânica encontradas nas ETEs. Com a ANOVA é possível testar as diferenças entre duas ou mais médias, visando identificar se existe uma diferença significativa entre os grupos que estão sendo comparados. Também, foi feito o Teste de Tukey, que pôde identificar onde estão as diferenças significativas, ou seja, indica quais grupos se diferenciam dos demais, completando a interpretação dada pela ANOVA.

4.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A aplicação da ACV nesta pesquisa auxiliou a identificação dos potenciais impactos ambientais gerados pelas Estações de Tratamento de Esgotos da cidade de Juazeiro do Norte. Ressalta-se que a ACV foi aplicada em 3 (três) estações: ETE Malvas, ETE Três Marias e ETE Tenente Coelho. A Figura 13 apresenta a estrutura e abordagem geral da metodologia empregada neste estudo.

Figura 13 - Estrutura da ACV do presente estudo.



Fonte: A autora (2023)

Os procedimentos metodológicos da ACV seguiram as recomendações estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnica através das ABNT NBR 14040 (2014a) - Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura e ABNT NBR ISO 14044 (2014b) - Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações, que tem um procedimento padrão como mostrados na Figura 13.

4.4.1 Definição de objetivos e escopo

A fase da definição de objetivos e escopo está alinhada ao objetivo geral da pesquisa, que consiste em avaliar a sustentabilidade do sistema de tratamento de efluentes da cidade de Juazeiro do Norte, Ceará. Nesta etapa também é definida a Função do Sistema, Unidade Funcional e Fronteira do Sistema.

- **Função do Sistema:** a função do sistema é receber todo o efluente coletado da rede de esgotamento sanitário e tratá-lo, a fim de melhorar sua qualidade para então ser direcionado ao corpo receptor.

- Unidade Funcional: a unidade funcional definida para este estudo foi o metro cúbico de efluente tratado por dia.
- Fronteira do Sistema: a fronteira do sistema define o limite em que o estudo foi aplicado, neste caso a fronteira do sistema é definida pelo limite físico do tratamento do esgoto.

4.4.2 Levantamento do Inventário

Nesta etapa da ACV foram definidos os fluxos de entrada e saída. Os dados utilizados na etapa de inventário foram de vazão, Demanda Química de Oxigênio (DQO), consumo de energia, consumo de cloro e emissões de metano.

As vazões de entrada das ETEs foram fornecidas pela Cagece através de uma solicitação online. embora durante as visitas técnicas, as vazões tenham sido coletadas. Foi preferido trabalhar com os dados oficiais oferecidos pela companhia de monitoramento. A DQO foi calculada com base no monitoramento mensal conduzido também pela Cagece. Após o tratamento dos dados, foram utilizadas as médias da DQO de entrada e saída das ETEs, dadas em mg.L^{-1} , e posteriormente transformada em kg.m^3 .

O consumo de energia foi calculado baseado nas informações fornecidas pela Cagece sobre a potência das bombas submersas que são utilizadas para transportar o efluente bruto do tratamento preliminar ao reator UASB. Foi considerado o tempo de funcionamento de 24h. Somente as ETEs Três Marias e Tenente Coelho utilizam energia em alguma etapa do tratamento.

Na etapa de desinfecção, o agente químico utilizado é o Hipoclorito de Cálcio com 65% de cloro ativo. Conforme a companhia, na ETE Três Marias e Tenente Coelho são utilizados aproximadamente 9kg e 13kg por dia, respectivamente. Para determinar o consumo de cloro por m^3 (unidade funcional definida na ACV), a quantidade de cloro utilizada na ACV foi estimada considerando o volume da ETE durante o período de um dia. Já no fluxo de saída, usou-se a concentração de cloro residual encontrada a partir das análises de monitoramento do efluente tratado.

No que diz respeito às emissões de metano, foi utilizada a equação de conversão que faz uma estimativa das emissões a partir da DQO, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019). O IPCC estima a emissão de 0,25 kg de CH_4 para cada kg de DQO. Além disso, após o cálculo pede-se a aplicação de um fator de correção que varia de 0,8 a 1,0 para sistemas de tratamento de águas residuais do tipo reator

anaeróbico (UASB). Nesse estudo, foi usado o valor mediano de 0,9, conforme a recomendação do relatório do IPCC.

Os dados do inventário foram adicionados no *software* OpenLCA versão 2.0.2, a partir dele foi possível processar os dados dos fluxos de entrada e saída das ETEs. O programa é bastante difundido, principalmente no meio acadêmico, por ser uma ferramenta gratuita. Além disso, foi utilizado o banco de dados da Ecoinvent® 3.7, uma biblioteca de inventários associados a uma gama de produtos e processos. O Quadro 8 especifica os fluxos da Ecoinvent usados para cada fluxo de entrada e saída das estações. Quadro 6 - Fluxos da Ecoinvent® 3.7 utilizados na ACV para cada fluxo do inventário.

Fluxos	Fluxos da Ecoinvent	Unidade
DQO	COD, <i>Chemical oxygen demand</i>	kg
Metano	<i>Methane, non-fossil</i>	kg
Energia	<i>electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U – BR – Northern grid</i>	kWh
Cloro	<i>Chlorine</i>	kg
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	kg

Fonte: A autora (2023)

4.4.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) sintetiza os dados em informações úteis sobre os potenciais impactos ambientais relacionados à operação das ETEs. Para isso, foi utilizado o Método ReCiPe, nas abordagens de *midpoint*, que são os impactos em nível intermediário, e de *endpoint*, que são danos finais relacionados às áreas de proteção. O método ReCiPe é comumente utilizado nas ACVs por abordar tanto os impactos intermediários quanto os danos finais relacionados ao produto ou processo estudado.

4.5 Propostas e recomendações de melhorias

Além das análises realizadas, foram desenvolvidas propostas e recomendações para melhorias nas ETEs. Essas propostas não se limitam apenas ao atendimento da legislação, mas buscam promover uma evolução contínua nas práticas operacionais e de monitoramento das unidades, visando agregar valor às operações por meio de estratégias

que potencializem a eficiência dos processos, mas também minimizem impactos ambientais. Essas iniciativas destacam a importância de uma gestão sustentável, garantindo que as ETEs funcionem de maneira otimizada e alinhada com os princípios da sustentabilidade a longo prazo. Tal abordagem visa transformar as ETEs em agentes ativos na preservação dos recursos hídricos, promovendo práticas conscientes que ultrapassem os requisitos mínimos da legislação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do Tratamento de Efluentes

Os resultados obtidos nesta etapa apresentam uma caracterização dos efluentes brutos e tratados das ETEs estudadas, possibilitando uma análise da sua qualidade em relação aos padrões ambientais. A caracterização foi feita a partir dos indicadores físico-químicos e biológicos do tratamento, com o objetivo de avaliar a eficiência do sistema e identificar possíveis variáveis que influenciam o desempenho do processo. A análise inclui dados de DQO, coliformes totais, E. coli, temperatura, pH, oxigênio dissolvido, materiais flutuantes e cloro residual, proporcionando uma visão ampla sobre a qualidade do efluente final e sua adequação para disposição em corpos hídricos, conforme a legislação. Para facilitar a compreensão, a caracterização dos efluentes foi organizada em dois aspectos principais: eficiência do tratamento e atendimento às exigências legais.

5.1.1 *Eficiência de tratamento*

5.1.1.1 *ETE Malvas*

A ETE Malvas, como já mencionado, é a maior estação de tratamento e recebe quase todo o esgoto coletado da cidade, cerca de 80% dos esgotos coletados são tratados nessa estação e é composta por um sistema de Lagoas de estabilização. A estatística descritiva do monitoramento mensal da ETE Malvas realizado pela Cagece, nos anos de 2020, 2021 e 2022 apontam os seguintes resultados de esgoto bruto e tratado (Tabela 1).

Tabela 1 - Estatística descritiva dos indicadores do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.

ETE Malvas – Efluente Bruto						
Indicador	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Desvio padrão	n
DQO (mg/L)	820	2380	212	686	686	34
Coliformes totais (NMP/100 mL)	4,32E+08	2,40E+09	2,38E+07	1,42E+08	6,30E+08	34
E. Coli (NMP/100 mL)	1,38E+08	1,10E+09	1,09E+07	4,27E+07	2,41E+08	34
pH	7,49	8,12	7,04	7,51	0,217	34
Temperatura (°C)	30,44	35	24	30	2,18	34
ETE Malvas – Efluente Tratado						
DQO (mg/L)	294	570	62	276	96	34
Coliformes totais (NMP/100 mL)	4,97E+06	2,40E+07	2,40E+05	3,99E+06	4,54E+06	34
E. Coli (NMP/100 mL)	6,98E+03	4,35E+04	1,60E+01	3,64E+03	8,91E+03	27
pH	8,05	8,8	7	8,2	0,53	34
Temperatura (°C)	28,42	33	25	28,25	1,90	34
Materiais Flutuantes	Ausentes					
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	6,12	13,8	0,6	6,0	3,4	32

Fonte: Adaptado de Cagece (2023)

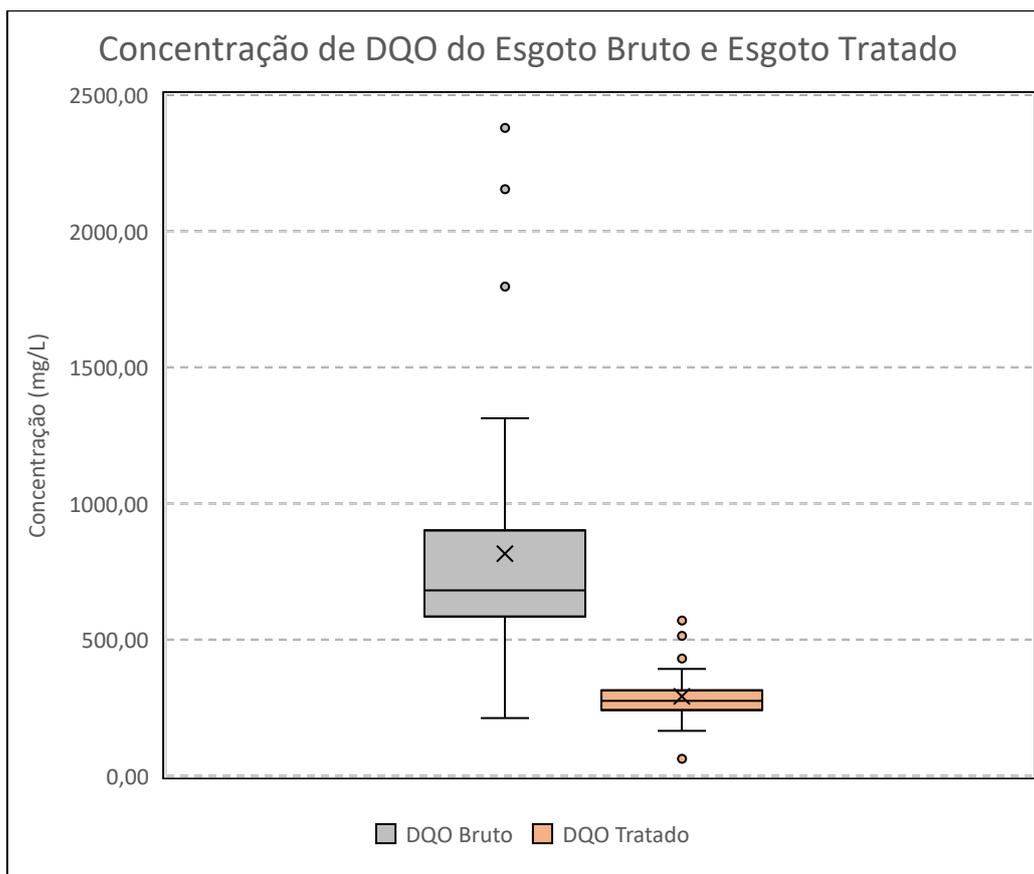
- DQO

A remoção de DQO é um dos principais indicadores de desempenho de ETEs, ajudando a assegurar a eficácia no tratamento de esgoto e a conformidade com padrões ambientais. A Figura 14 apresenta graficamente os dados de DQO de esgoto bruto e esgoto tratado. É possível observar que DQO do esgoto bruto tem grande variabilidade, com intervalos de 212 mg/L a 2.380mg/L, apresentando uma média de 820 mg/L.

Os outliers identificados no gráfico box plot (Figura 14), acima do limite superior no esgoto bruto, indicam valores atípicos que podem estar associados a erros na coleta de dados, medições incorretas ou entrada de dados de maneira errada, assim também como

representar casos extremos dentro da variabilidade natural dos dados, sem representar erro, principalmente considerando que o estudo é conduzido em um município com características populacionais atípicas, devido a flutuações na população causadas por grandes romarias durante todo o ano e universitários que residem na cidade em períodos de aulas. Portanto, devido à sua baixa frequência e por se tratarem de dados ambientais que possuem alta variabilidade, optou-se por manter os dados na análise.

Figura 14 – Concentração de DQO de efluente bruto e efluente tratado da ETE Malvas.



Fonte: A autora (2024)

Conforme ilustrado na Figura 14, observa-se que a DQO do esgoto tratado, no sistema, foi reduzida para uma média de 294 mg/L. No esgoto tratado, os resultados também apresentaram alta dispersão, variando entre 62 mg/L e 570 mg/L. Sendo assim, a eficiência da remoção de DQO atingiu 56,17% entre o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2022. No entanto, essa eficiência é inferior à esperada para esse tipo de tratamento, que normalmente oscila entre 70-83% (Von Sperling, 2007)

No estudo de Achag, Mouhanni e Bendou (2021), por exemplo, no qual os autores investigaram formas de aprimorar o desempenho de uma lagoa de estabilização composta por lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas em uma região de clima árido no

Marrocos, no qual foi sugerida a adição de uma lagoa de maturação como tratamento terciário ao sistema existente. Os autores simularam os indicadores após a nova configuração, e obtiveram uma remoção de DQO de 84,5%.

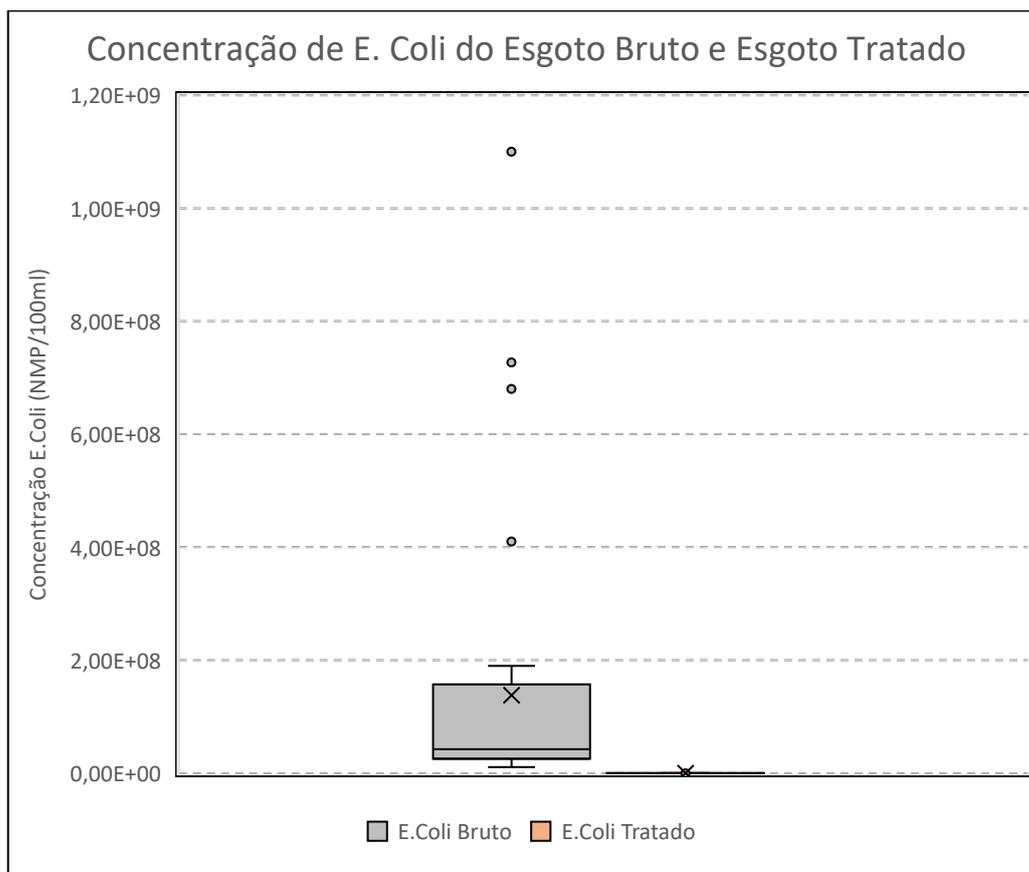
De modo semelhante, o estudo realizado por Hernandez-Paniagua *et al.* (2013) em Aguascalientes, México, teve como um de seus objetivos avaliar o desempenho de uma estação de tratamento composta por lagoas semelhantes às deste estudo, registrando uma eficiência de remoção de DQO de $74\pm 3\%$. Mesmo em condições climáticas mais frias, como no estudo conduzido por Phuntsho *et al.* (2016) no Butão, o sistema de lagoas de estabilização obteve uma remoção de DQO entre 83% e 95%.

- *Escherichia coli* (*E. coli*)

A *Escherichia coli* (*E. coli*) é um subgrupo específico dos coliformes fecais, sendo um dos indicadores mais comumente utilizados para a presença de contaminação fecal na água, pois é a principal espécie de coliformes termotolerantes (Pequeno *et al.*, 2024). Diferentemente dos parâmetros de Coliformes Totais que não são úteis como indicadores de contaminação fecal por incluir tanto espécies fecais como não fecais (Silva *et al.*, 2019). Portanto, optou-se por utilizar a *E. Coli* na análise de poluição fecal, já que sua presença é um sinal mais preciso de contaminação fecal recente.

A Figura 15 mostra a distribuição do indicador *E. Coli* no afluente e efluente da ETE Malvas.

Figura 15 - Concentração de *E. Coli* do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.



Fonte: A autora (2024)

O indicador *E. coli* para o esgoto bruto foi na ordem de $1,4E+08$ em média, faixa essa, um pouco acima da referida por Metcalf e Eddy (2016), que especificam uma faixa de $10^5 - 10^7$ NMP/100mL para *E. coli* em esgotos domésticos. Todavia, o resultado corrobora com outros estudos realizados como no caso de Räder *et al.* (2023), que analisa a remoção de coliformes totais e *E. coli* em esgotos domésticos em Novo Hamburgo, no Rio Grande do Sul, o efluente bruto estudado pelos autores apresentou faixa de $10^7 - 10^8$ NMP/100mL para *E. coli*.

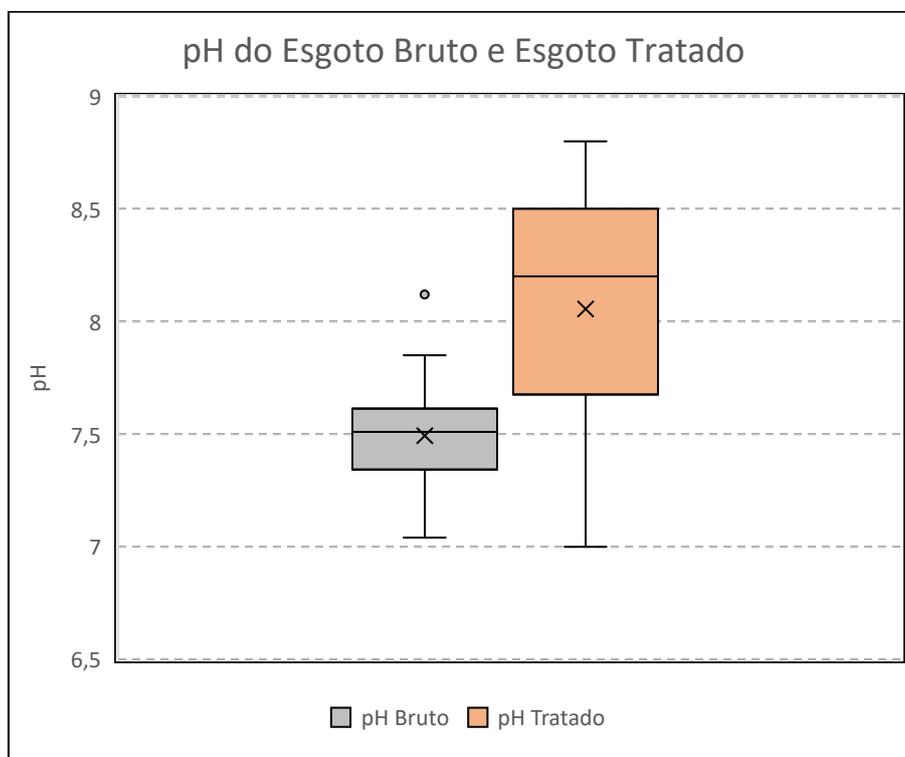
O indicador de *E. coli* no esgoto tratado foi na ordem de 10^3 , correspondendo a uma eficiência de 99,98% na eliminação de contaminantes fecais (Figura15), um resultado esperado para esse tipo de tratamento. Em análises realizadas por Lopes *et al.* (2022) em lagoas de estabilização semelhantes às deste trabalho, foi observada uma remoção superior a 99% em duas estações de tratamento localizadas em Frei Martinho, Paraíba, e São Fernando, Rio Grande do Norte.

- pH

O pH é um indicador fundamental no monitoramento de efluentes em lagoas de estabilização, influenciando diretamente a eficiência do tratamento, conforme apontam Von Sperling (2007), Metcalf & Eddy (2016) e Van Haandel & Santos (2021). Segundo Von Sperling (2007), o pH controla a atividade microbológica e a decomposição da matéria orgânica, sendo crucial para manter o equilíbrio entre microrganismos aeróbios e anaeróbios. Metcalf & Eddy (2016) e Van Haandel & Santos (2021) acrescentam que o pH também interfere na remoção de nutrientes, como amônia e fósforo, além de influenciar a proliferação de algas, que são essenciais para a oxigenação do sistema através da fotossíntese. Valores inadequados de pH podem prejudicar o desempenho da lagoa, comprometendo a eficiência na remoção de poluentes e a qualidade do efluente tratado.

A Figura 16 apresenta o comportamento do pH afluente e efluente do esgoto da ETE Malvas.

Figura 16 - pH do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.



Fonte: A autora (2024)

Conforme mostrado na Figura 16, o indicador pH variou entre 7,04 e 8,14 no esgoto bruto, mantendo uma média de 7,5. E para o esgoto tratado, essa variação ocorreu na faixa de 7,0 – 8,8, mantendo uma média de 8,05.

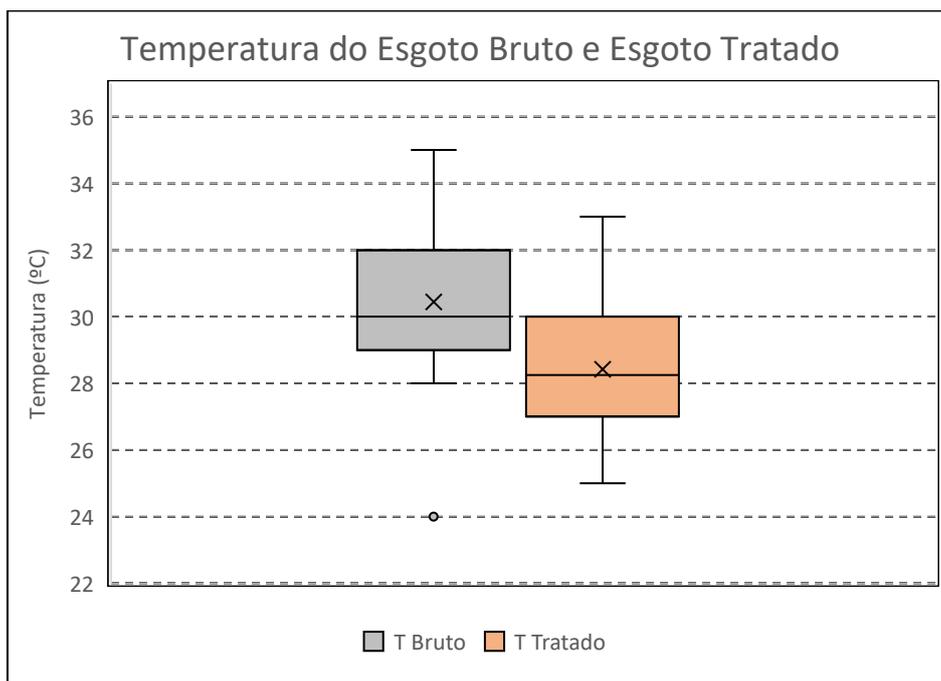
Von Sperling (2007) destaca que um pH ligeiramente básico, como 8,05, é frequentemente encontrado em sistemas de lagoas de estabilização devido à atividade fotossintética das algas, que consomem dióxido de carbono e elevam o pH. Adicionalmente, o estudo de D'Alessandro et al. (2015), que analisou a influência da sazonalidade na eficiência das lagoas de estabilização da ETE Trindade em Goiás, encontrou um pH médio de $7,7 \pm 0,2$. Esses resultados são consistentes com os observados na ETE Malvas, indicando que níveis de pH semelhantes são comuns e esperados em sistemas de lagoas de estabilização.

- Temperatura

A temperatura influencia diretamente o desempenho das lagoas de estabilização, afetando a atividade microbiana e a eficiência do tratamento. Em temperaturas elevadas, o metabolismo dos microrganismos é acelerado, aumentando a remoção de poluentes e favorecendo a fotossíntese das algas, que produzem oxigênio essencial para a oxidação da matéria orgânica. Em climas frios, a eficiência do tratamento diminui devido à menor atividade microbiana, prolongando o tempo de depuração dos efluentes (Von Sperling, 2007; Jordão e Pessôa, 2014; Metcalf & Eddy, 2016).

A Figura 17 ilustra a diferença de temperatura entre o efluente bruto e efluente tratado da ETE Malvas.

Figura 17 - Temperatura do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Malvas.



Fonte: A autora (2024)

Conforme observado na Figura 17, houve uma leve diminuição da temperatura durante o tratamento. A temperatura média do esgoto bruto foi de 30,4°C, enquanto o esgoto tratado apresentou uma média de 28,4°C. Segundo Von Sperling (2007), em lagoas de estabilização, o comportamento da temperatura pode variar, mas o mais comum é que a temperatura aumente ao longo do dia devido à radiação solar, especialmente nas camadas mais superficiais da lagoa. No entanto, há situações em que a temperatura pode diminuir, como à noite, devido à perda de calor por radiação, ou em climas mais frios.

O estudo de Ho *et al.* (2018) examinou o impacto das condições meteorológicas no desempenho de lagoas de estabilização em alta altitude no Equador, mostrando que o aumento da altitude, associado à redução da temperatura, pode diminuir a taxa de crescimento dos microrganismos. De forma complementar, Liu, Hall & Champagne (2020) investigaram o papel das algas na eliminação de patógenos em lagoas de estabilização, revelando que as algas em temperaturas mais altas (> 20°C) são mais eficazes na remoção de patógenos, quando comparadas a ambientes de baixas temperaturas.

A redução da temperatura no efluente da ETE Malvas pode ter explicação por um início leve de eutrofização (proliferação de algas), evidenciado pelo oxigênio dissolvido de 6,12 mg/L, um pouco acima do usual. Essa proliferação cria uma cobertura vegetal

que reduz a penetração da luz solar, diminuindo a absorção de calor pelo sistema. Com menos radiação solar alcançando as camadas inferiores, a temperatura da lagoa tende a cair, o que afeta diretamente o desempenho da lagoa, especialmente na remoção de patógenos.

5.1.1.2 ETE Três Marias

Os dados apresentados na Tabela 2 correspondem à estatística descritiva do monitoramento mensal do esgoto bruto e tratado a ETE Três Marias, referentes aos anos de 2020, 2021 e 2022. Conforme mencionado anteriormente, essa estação de tratamento inclui uma etapa preliminar, seguida por um reator UASB e desinfecção.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos indicadores do efluente bruto e efluente tratado da ETE Três Marias.

ETE Três Marias – Efluente Bruto						
Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Desvio padrão	n
DQO (mg/L)	568	1329	112	511	280	38
ETE Três Marias – Efluente Tratado						
DQO (mg/L)	214	1380	20	170	226	39
Cloro Residual (mg/L)	2,01	3,0	0,0	2,0	0,83	36
Coliformes totais (NMP/100 mL)	1,82E+06	2,4E+07	1,0E+00	2,08E+02	6,15E+06	36
E. Coli (NMP/100 mL)	3,47E+02	2,6E+03	1,0E+00	1,15E+01	6,80E+02	30
pH	7,41	8,2	6,3	7,6	0,49	36
Temperatura (°C)	29,85	32	28	29,5	1,47	12
Materiais Flutuantes	Ausentes					

Fonte: Adaptado de Cagece (2023)

Na ETE Três Marias, o único indicador monitorado tanto no efluente bruto quanto no tratado foi a DQO, enquanto os demais indicadores foram analisados apenas no efluente tratado.

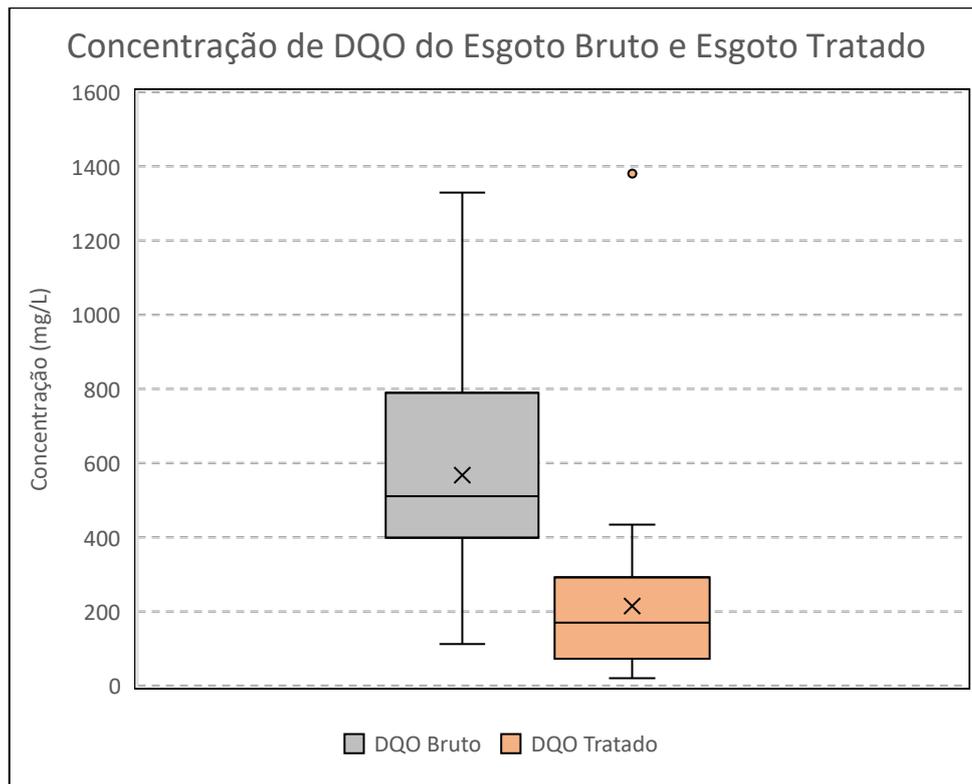
- DQO

No reator UASB, caso da ETE Três Marias, a DQO é reduzida pela ação de microrganismos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica. Após essa etapa, o

processo de desinfecção visa eliminar patógenos remanescentes, garantindo que o efluente final esteja dentro dos padrões de qualidade exigidos antes do descarte ou reuso.

O indicador DQO na ETE Três Marias se apresentou como mostrado na Figura 18, variando entre 112mg.L⁻¹ a 1.329 mg.L⁻¹ no esgoto bruto, apresentando uma média de 568 mg.L⁻¹. E ao final do tratamento foi reduzido para 214 mg.L⁻¹, em média.

Figura 18 - Concentração de DQO do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Três Marias.



Fonte: A autora (2024)

Tabela 3 - Eficiências de remoção de matéria orgânica da ETE Três Marias nos anos de 2020, 2021 e 2022.

Remoção de matéria orgânica – ETE Três Marias

Ano	Mês	Efluente Bruto (mg/L)	Efluente tratado (mg/L)	Eficiência
2020	Jan	468,55	353,89	24,47
	Fev	576,44	433,78	24,75
	Mar	986,53	165,62	83,21
	Abr	682,02	183,11	73,15
	Mai	480,92	292,46	39,19
	Jun	400,35	259,74	35,12
	Jul	1329,20	237,83	82,11
	Ago	504,62	343,33	31,96
	Ago	875,24	308,59	64,74
	Set	469,68	289,80	38,30
	Out	393,34	220,46	43,95
	Nov	253,73	388,12	-52,97
	Dez	155,82	411,40	-164,02
Dez	168,48	219,12	-30,06	
2021	Jan	123,09	291,47	-136,79
	Fev	354,93	730,94	-105,94
	Mar	871,18	318,19	63,48
	Abr	588,93	109,76	81,36
	Mai	601,58	122,56	79,63
	Jun	899,63	57,13	93,65
	Jul	549,21	169,80	69,08
	Ago	1117,80	49,76	95,55
	Set	297,59	25,93	91,29
	Out	401,33	50,32	87,46
	Nov	294,39	263,82	10,38
	Dez	817,56	105,36	87,11
2022	Jan	517,29	100,39	80,59
	Fev	111,71	61,70	44,77
	Mar	740,33	102,18	86,20
	Abr	406,97	299,82	26,33
	Mai	406,38	29,07	92,85
	Jun	833,54	71,78	91,39
	Jul	597,62	20,00	96,65
	Ago	455,45	89,67	80,31
	Set	842,60	146,68	82,59
	Out	780,46	72,13	90,76
	Nov	487,53	180,18	63,04
	Dez	732,08	50,42	93,11

Fonte: Adaptado de Cagece (2023)

Na ETE Três Marias, a eficiência média verificada foi de 45,75%. A Tabela 3 mostra que na maioria das análises realizadas no ano de 2020 e no início de 2021, as eficiências em geral, foram baixas, além de terem apresentado valores negativos, com a DQO do esgoto tratado superior à DQO do esgoto bruto. Isso pode estar indicando condições precárias de operação ou amostragem e/ou análises mal conduzidas.

Do segundo bimestre de 2021 em diante e o ano de 2022, o tratamento passou a ocorrer de forma mais eficaz, atingindo 96,65% de eficiência no mês de julho de 2022. Esse foi o mês com maior percentual de remoção, com concentrações de entrada e saída de 597,62 mg/L e 20,00 ml/L, respectivamente. Segundo Von Sperling (2007), a remoção de matéria orgânica comum para esse tipo de reator deve oscilar entre 55 e 70%. Embora o efluente tratado por essa tecnologia geralmente não cumpra com a maioria dos padrões de descarga (Sikosana *et al.*, 2019).

Em estudo realizado por Ramos *et al.* (2023), que analisou o desempenho de ETES utilizando reatores UASB no Estado de Minas Gerais, Brasil, a maioria das estações apresentou baixa eficiência, como a ETE de Ipatinga, que registrou remoções médias de 56% e 46% para DBO₅ e DQO, respectivamente. No estudo realizado por Salazar-Larrota *et al.* (2018), que monitorou um reator UASB ao longo de 9 anos, os autores também identificaram baixas eficiências no tratamento de esgoto. A remoção de DQO apresentou uma média de 52%, valor que ficou abaixo das expectativas previstas no projeto do sistema e não atendeu aos limites regulatórios exigidos para o tratamento de efluentes.

5.1.1.3 ETE Tenente Coelho

A Tabela 4 apresenta os resultados dos indicadores analisados mensalmente no esgoto bruto e tratado da ETE Tenente Coelho nos anos de 2020, 2021 e 2022. Conforme mencionado, essa estação de tratamento é composta por tratamento preliminar, seguido por um Reator UASB, Filtro Submerso Aerado (FSA) com Decantador Externo, Decantador Convencional, e, por fim, o processo de desinfecção.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos indicadores do efluente bruto e efluente tratado da ETE Tenente Coelho.

ETE Tenente Coelho – Efluente Bruto

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Desvio Padrão	n
DQO (mg/L ⁻¹)	1019	1414	494	1052	237	36
ETE Tenente Coelho – Efluente Tratado						
DQO (mg/L ⁻¹)	193	370	89	188	66	38
Cloro Residual (mg/L ⁻¹)	2,07	3,0	0,0	2,0	0,71	34
Coliformes totais (NMP/100 mL)	4,00E+05	9,8E+06	1,0E+00	1,0E+00	1,72E+06	35
E. Coli (NMP/100 mL)	1,66E+01	1,7E+02	1,0E+00	1,0E+00	4,4E+01	27
pH	7,57	8,0	7,1	7,6	0,22	34
Temperatura (°C)	29,23	32	26	29,9	1,73	13
Materiais Flutuantes	Ausentes					

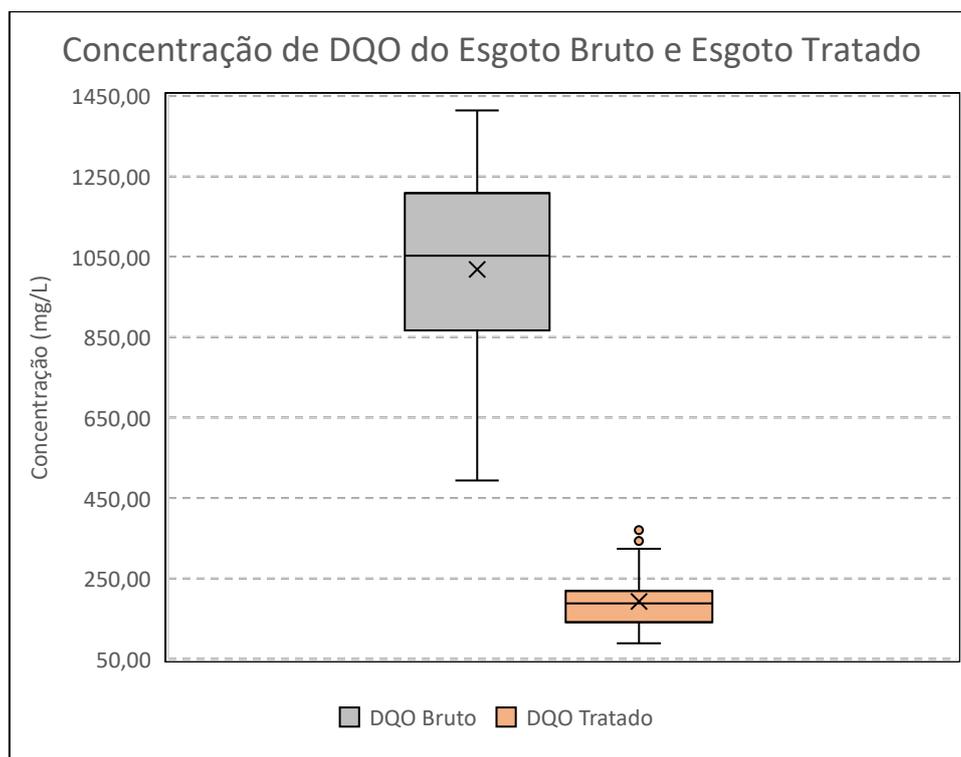
Fonte: Adaptado de Cagece (2023)

Assim como na ETE Três Marias, na ETE Tenente Coelho, a DQO é o único indicador em comum do esgoto bruto e tratado. Dessa forma, somente a eficiência de remoção da DQO foi estimada.

- DQO

O indicador DQO na ETE Tenente Coelho se apresentou bastante variável como mostrado na Figura 19, oscilando entre 494 mg.L⁻¹ a 1414 mg.L⁻¹ no esgoto bruto, apresentando uma média de 1.019 mg.L⁻¹. E ao final do tratamento, a DQO foi reduzida para 193 mg.L⁻¹, em média.

Figura 19 - Concentração de DQO do esgoto bruto e esgoto tratado da ETE Tenente Coelho.



Fonte: A autora (2024)

Tabela 5 - Eficiências de remoção de matéria orgânica da ETE Tenente Coelho nos anos de 2020, 2021 e 2022.

Remoção de matéria orgânica – ETE Tenente Coelho				
Ano	Mês	Efluente Bruto (mg/L)	Efluente tratado (mg/L)	Eficiência
2020	Jan	1119,60	111,85	90,01
	Fev	1052,50	157,25	85,06
	Mar	908,48	193,90	78,66
	Abr	494,08	138,45	71,98
	Mai	1262,90	209,86	83,38
	Jun	1059,00	343,36	67,58
	Jul	1401,10	200,80	85,67
	Ago	954,99	142,35	85,09
	Set	1274,80	95,21	92,53
	Out	1173,00	127,21	89,16
	Nov	1144,00	113,85	90,05
	Dez	692,16	141,70	79,53
2021	Jan	1119,60	-	
	Fev	1052,50	285,60	72,87
	Mar	908,48	196,85	78,33
	Abr	494,08	188,38	61,87

	Mai	1262,90	208,67	83,48
	Jun	1059,00	247,67	76,61
	Jul	1401,10	183,50	86,90
	Ago	954,99	272,80	71,43
	Set	1274,80	88,80	93,03
	Out	1173,00	158,20	86,51
	Nov	1144,00	262,34	77,07
	Dez	692,16	281,55	59,32
2022	Jan	844,85	323,73	61,68
	Fev	754,62	135,52	82,04
	Mar	1247,31	185,52	85,13
	Abr	1413,99	211,72	85,03
	Mai	907,69	190,43	79,02
	Jun	762,34	218,91	71,28
	Jul	855,48	171,45	79,96
	Ago	1219,66	141,93	88,36
	Set	823,60	179,93	78,15
	Out	936,64	221,00	76,41
	Nov	931,83	93,74	89,94
	Dez	902,94	216,54	76,02

Fonte: Adaptado de Cagece (2023)

A média aritmética da eficiência de remoção da matéria orgânica foi de 79,97%, permanecendo acima de 70% durante a maior parte do período de monitoramento (Tabela 5). Apenas nos meses de junho/2020, abril/2021, dezembro/2021 e janeiro/2022 as eficiências ficaram abaixo de 70%. Outros estudos também relatam eficiências altas de remoção de DQO para esse tipo de tratamento.

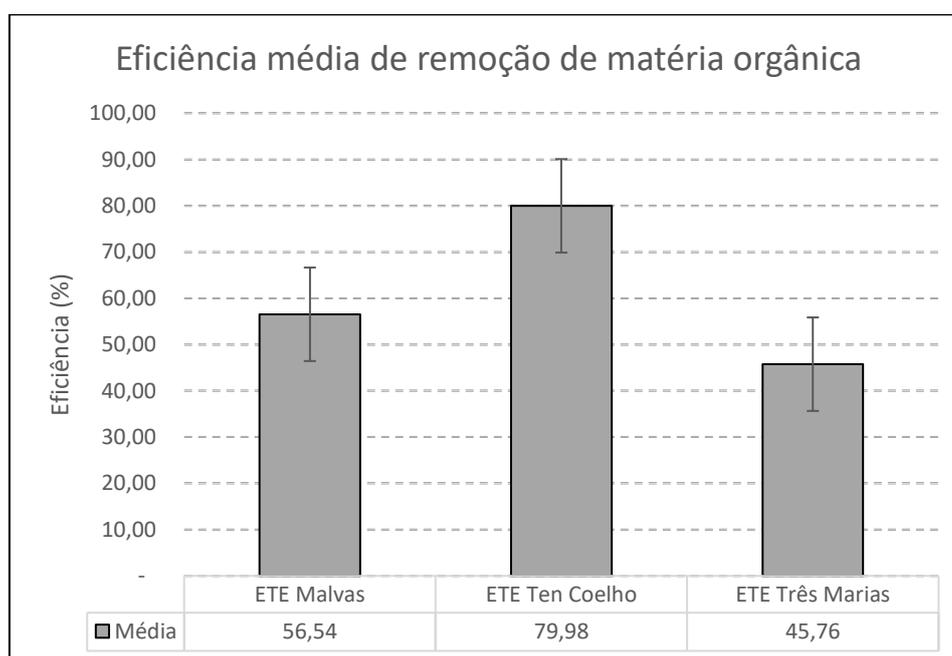
De acordo com os estudos realizado por Ponce, Rollemberg & Oliveira (2019), que investigaram 3 (três) estações de tratamento diferentes localizadas no Ceará, mas com o tipo de tratamento semelhante ao realizado na ETE Tenente Coelho, os autores chegaram à conclusão que a estação composta por reator UASB + FSA apresentou os melhores resultados em relação ao indicador de DQO, sendo observados valores superiores a 80%.

No estudo conduzido por Ribeiro & Silva (2018), foram observados valores médios de remoção de DBO₅ e DQO de 91% e 85%, respectivamente, durante o acompanhamento operacional de uma ETE com reator UASB seguido de filtro aerado submerso (FAS), localizada em São Paulo, Brasil.

5.1.1.4 ETE Malvas x ETE Três Marias x ETE Tenente Coelho

Para comparação das eficiências de remoção de matéria orgânica entre as ETEs, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA é uma ferramenta eficaz para comparar a eficiência operacional com base em indicadores como DQO e DBO₅, avaliando se as variações observadas são devidas ao processo de tratamento ou a fatores externos, como condições operacionais ou ambientais. A Figura 20 mostra a média de eficiência para cada estação de tratamento.

Figura 20 - Eficiência média de remoção de matéria orgânica.



Fonte: A autora (2024)

Como mostrado na Figura 20, a ETE Tenente Coelho se destacou no que diz respeito à remoção de matéria orgânica, com quase 80% de eficiência. Em contrapartida, a ETE Malvas e a ETE Três Marias obtiveram baixas remoções, com 56,54% e 45,76%, respectivamente, valores inferiores aos comumente encontrados para o tratamento com lagoas de estabilização e reatores UASB.

As eficiências mencionadas acima foram submetidas ao teste ANOVA que permitiu verificar se há diferenças estatisticamente significativas entre as médias de eficiência das ETEs. A Tabela 6 expõe os resultados da ANOVA.

Tabela 6 - Teste de variância (ANOVA) aplicado às eficiências de remoção de matéria orgânica das ETEs estudadas.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	22082,21	2	11041,11	6,624759	0,001952	3,082852
Dentro dos grupos	174997,5	105	1666,643			
Total	197079,7	107				

Fonte: A autora (2024)

O nível de significância considerado no teste foi de 5%. Conforme a Tabela 6, pode-se inferir que existe diferença significativa entre as eficiências das estações, verificada pelo fator F encontrado em destaque, 6,62, ser maior que o F crítico. A conclusão é reforçada pelo valor-P de 0,001952 ($< 0,05$).

Sabendo que há diferença significativa entre as eficiências das estações, foi realizado o Teste de Tukey. Esse teste de comparações múltiplas é utilizado quando a ANOVA indica a existência de diferenças significativas entre os grupos, mas não especifica quais grupos diferem entre si. Esse procedimento é crucial para identificar quais estações estão performando de maneira superior ou inferior. Os resultados do Teste de Tukey estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Teste de Tukey aplicado às eficiências de remoção de matéria orgânica das ETEs estudadas.

Teste de Tukey ($p < 0,05$)			
Estações de Tratamento	ETE Malvas	ETE Ten. Coelho	ETE Três Marias
ETE Malvas		0,047182	0,499763
ETE Ten. Coelho	0,047182		0,001608
ETE Três Marias	0,499763	0,001608	

Fonte: A autora (2024)

A Tabela 7 indica uma diferença significativa entre as ETEs Malvas e Tenente Coelho, com um valor p de 0,047182 ($< 0,05$), bem como entre as ETEs Três Marias e Tenente Coelho, que apresentaram uma diferença ainda mais expressiva, com um valor p de 0,001608. Esses resultados sugerem que a ETE Tenente Coelho possui um desempenho superior em termos de remoção de matéria orgânica em comparação com as demais estações analisadas. Esse desempenho pode ser atribuído a uma combinação de fatores, como a eficiência operacional mais elevada, uma gestão de processos mais otimizada, ou condições ambientais mais favoráveis para o tratamento. Além disso, o

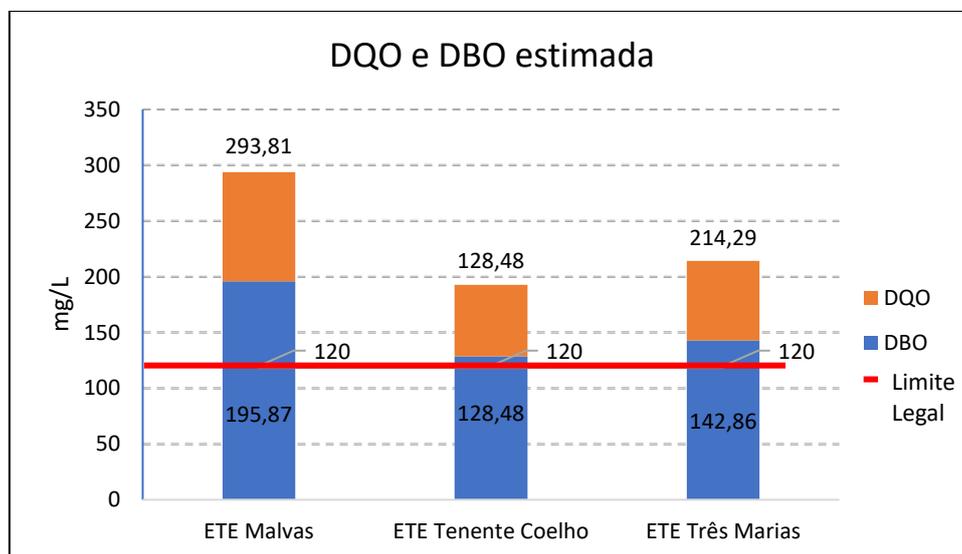
resultado destaca que a tecnologia de tratamento empregada na ETE Tenente Coelho é mais eficaz, especialmente devido à etapa complementar de remoção de matéria orgânica, o Filtro Submerso Aerado (FSA), que parece aumentar o desempenho do reator principal, o UASB. O FSA atua como uma etapa de polimento, removendo a matéria orgânica residual que o reator UASB não consegue eliminar completamente, o que resulta em uma maior eficiência na remoção de DQO. Esse fato evidencia a importância de adicionar etapas complementares ao processo de tratamento, o que pode ser um fator decisivo para um desempenho superior dessa estação. Assim, o uso combinado de diferentes tecnologias de tratamento pode ser uma solução mais robusta e eficaz para estações que enfrentam desafios na remoção eficiente de matéria orgânica.

5.1.2 Atendimento às exigências legais

5.1.2.1 Matéria Orgânica

A Figura 21 mostra a DQO e DBO (estimada) do efluente tratado de cada estação de tratamento, bem como o limite imposto pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e COEMA nº 02/2017, de até 120 mg.L⁻¹.

Figura 21 - Atendimento à legislação do efluente tratado das ETEs quanto ao indicador de DBO.



Fonte: A autora (2024)

Os padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Resolução COEMA nº 02/2017, no que diz respeito à matéria orgânica, são expressos em termos de DBO₅ ($\leq 120 \text{ mg.L}^{-1}$). Assim, o indicador DQO foi convertido em DBO₅, conforme a Equação 1 dada por Rodrigues (2005), para avaliar a conformidade

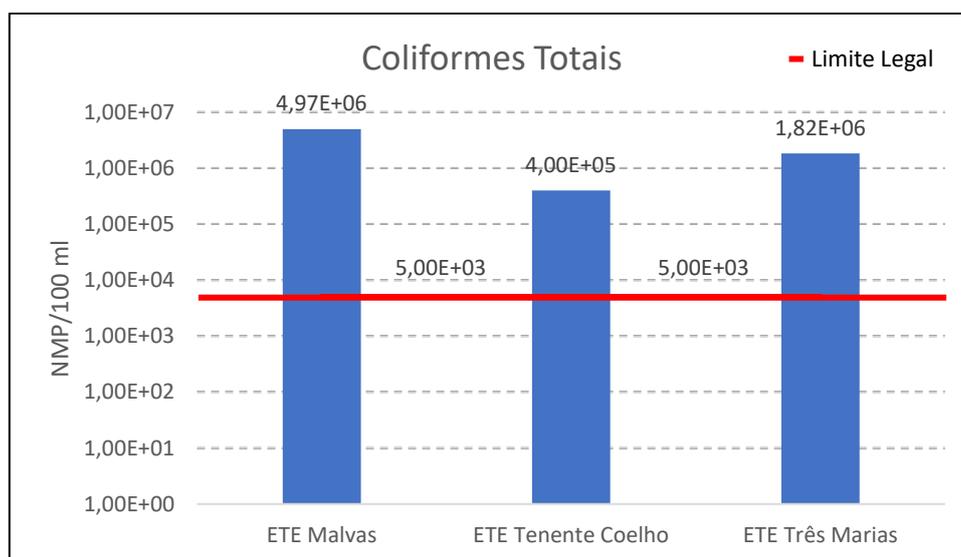
do efluente tratado com a legislação vigente. Na ETE Malvas, a DBO estimada do esgoto tratado foi de 196 mg.L^{-1} , excedendo o limite legal (indicado pela linha vermelha destacada no gráfico). A eficiência de remoção de DBO alcançou 64,18%, considerando essa eficiência, o efluente satisfaz a condição alternativa da legislação de pelo menos 60% de remoção.

A DBO estimada do efluente final da ETE Três Marias também não reduziu o suficiente para enquadrar o efluente dentro do limite legal, a eficiência de remoção de DBO foi de 62,27%. Mesmo com alta eficiência de remoção, a DBO estimada do efluente final da ETE Tenente Coelho ainda ficou acima do permitido pela legislação, embora tenha alcançado uma eficiência de remoção de 81,09%.

5.1.2.2 Coliformes Termotolerantes

O padrão das legislações citadas para remoção de microrganismos é dado em termos de Coliformes Termotolerantes, porém a Cagece realiza apenas análises de Coliformes Totais, presumindo a remoção eficiente de coliformes totais garantiria o enquadramento do efluente no padrão de coliformes termotolerantes. A Figura 22 mostra a redução de Coliformes Totais nos efluentes finais das ETEs.

Figura 22 - Atendimento à legislação do esgoto tratado das ETEs quanto ao indicador de Coliformes Termotolerantes.



Fonte: A autora (2024)

Conforme mencionado anteriormente, o enquadramento do efluente final das ETEs em relação aos coliformes totais garantiria, por consequência, a conformidade em relação aos coliformes termotolerantes, uma vez que estes são um subgrupo dos

coliformes totais. No entanto, nenhuma das estações foi capaz de reduzir os coliformes totais a níveis abaixo dos padrões estabelecidos pela legislação para coliformes termotolerantes. Portanto, não é possível afirmar com precisão que o efluente final das ETEs atendeu aos requisitos legais estaduais, já que o padrão para lançamento em corpo hídrico estabelecido pela Resolução COEMA 02/2017 é de 5,0E+03 NMP/100ml, em termos de coliformes termotolerantes.

5.1.2.3 Temperatura e pH

O atendimento aos padrões de legislação referentes à temperatura e pH do efluente final é crucial para garantir a proteção dos corpos hídricos receptores e preservar a qualidade ambiental, podendo influenciar negativamente o ecossistema aquático, afetando fauna e flora aquáticas (Hamdhani, Epehimer & Bogan, 2020; Ogunfowokan *et al.*, 2005). Portanto, a conformidade com os limites estabelecidos pela legislação visa minimizar impactos ambientais e assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos. A Figura 23 expõe os valores de Temperatura e pH encontrados para cada estação de tratamento.

Figura 23 - Atendimento à legislação do esgoto tratado das ETEs quanto aos indicadores de pH e Temperatura.



Fonte: A autora (2024)

Para assegurar que o efluente não cause impactos negativos no corpo receptor, a legislação federal e estadual estabelece limites de pH entre 5 e 9 (destacados pelas linhas vermelhas). Observa-se que, em todas as estações analisadas, os efluentes permaneceram dentro desse intervalo regulamentar. De forma análoga, as três estações estudadas apresentaram temperaturas inferiores ao limite máximo de 40 °C, conforme exigido em lei, se enquadrando também nesse indicador.

5.1.2.4 Materiais Flutuantes

A ausência de materiais flutuantes como óleos, resíduos sólidos e outros detritos é uma exigência importante imposta pela legislação para proteger os corpos d'água e garantir a qualidade do ambiente aquático. A presença destes pode bloquear a luz solar e

dificultar o desenvolvimento do corpo hídrico, além disso pode prejudicar o desempenho das estações de tratamento de esgoto e por isso geralmente esses materiais são retirados nas primeiras etapas de tratamento.

De acordo com as análises realizadas pela Cagece, não foram detectados materiais flutuantes nos efluentes tratados das três estações avaliadas. Isso assegura que o efluente final esteja em conformidade com as normas ambientais e apto para descarte no corpo receptor.

5.2 Avaliação do ciclo de vida

5.2.1 Inventário do ciclo de vida

Conforme Hauschild, Rosenbaum & Olsen (2018), a fase de inventário do ciclo de vida é uma das etapas mais importantes e decisivas da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), pois envolve a coleta detalhada de dados sobre todos os fluxos de materiais e energia associados ao ciclo de vida de um produto ou processo. A precisão e a abrangência dos dados coletados são cruciais para garantir que a análise subsequente seja confiável e representativa, e por ser uma etapa meticulosa e abrangente, o inventário é frequentemente a fase mais demorada do ciclo de vida. Dessa forma, o sucesso da ACV depende diretamente da qualidade dos dados obtidos nessa fase.

Neste estudo, os dados utilizados para o inventário foram fornecidos pela Cagece. Foram utilizados os fluxos de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Metano, Cloro e Energia para o efluente bruto, e Demanda Química de Oxigênio (DQO), Metano e Cloro Residual para o efluente tratado. Após o tratamento dos dados, esses foram inseridos no *software* OpenLCA. Segundo Ciroth *et al.* (2019), o programa simplifica a fase de inventário, onde são reunidos dados de entradas e saídas. Ele permite criar redes de processos ligando diferentes atividades e usa bases de dados reconhecidas globalmente, garantindo uma análise confiável e detalhada dos impactos ambientais.

Os dados de entrada foram organizados de maneira que permitiram uma avaliação da redução dos impactos ambientais proporcionada pelo tratamento do efluente.

A metodologia empregada para essa avaliação foi a ReCiPe, que converte os dados do inventário em impactos intermediários e finais, chamados de impactos de *midpoint* e *endpoint*, respectivamente. A Tabela 8 apresenta os dados do inventário utilizados na ACV das estações de tratamento.

Tabela 8 - Inventário utilizado na ACV das ETES.

Efluente Bruto				
Fluxos	Unidade	ETE Malvas	ETE Três Marias	ETE Tenente Coelho
DQO	kg	8504,25	83,39	352,07
Metano	kg	425,21	16,68	70,41
Cloro	kg		4,78	12,25
Energia	kwh		31,36	39,16
Efluente Tratado				
DQO	kg	3046,22	31,47	66,60
Metano	kg	152,31	6,29	13,32
Cloro Residual	kg		0,30	0,72

Fonte: A autora (2024)

5.2.2 AICV das Estações de Tratamento: midpoint

Após a inserção dos dados no *OpenLCA*, o software gerou uma série de resultados quantitativos, indicando as potenciais contribuições das estações nas diferentes categorias de impacto ambiental. Esses resultados estão organizados na Tabela 9, proporcionando uma visão mais detalhada sobre os efeitos ambientais associados a cada sistema analisado.

Tabela 9 – Potenciais impactos dos efluentes das ETES.

Categorias de impacto	Unidade	ETE Malvas		ETE Três Marias		ETE Tenente Coelho	
		Ef. Bruto	Ef. Tratado	Ef. Bruto	Ef. Tratado	Ef. Bruto	Ef. Tratado
Mudanças climáticas	kg CO ₂ -Eq	9.460,92	3.388,90	371,13	139,95	1566,62	296,37
Formação de oxidante fotoquímico	kg NMVOC	4,31	1,54	0,17	0,06	0,71	0,13
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB-Eq	-	-	90,80	5,61	232,76	13,59
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB-Eq	-	-	813,26	50,22	2084,62	121,69
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB-Eq	-	-	14,76	0,91	37,83	2,21
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	-	-	1,75	0,11	4,50	0,26

Fonte: A autora (2024)

Na ACV da ETE Malvas, foram acusadas apenas duas categorias de impactos: Mudanças climáticas e Formação de oxidante fotoquímico. Enquanto nas outras estações

foram identificadas as seguintes categorias de impactos: Mudanças climáticas, Formação de oxidante fotoquímico, Ecotoxicidade em água doce, Toxicidade humana, Ecotoxicidade marinha e Ecotoxicidade terrestre. É conhecido que as estações de tratamento de esgoto também causam outros impactos ambientais, como a eutrofização, devido à presença de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, no efluente final. No entanto, neste estudo, a ausência de impactos relacionados a essa questão se deve à falta de dados, pois a empresa responsável pelo monitoramento não realiza a medição desses parâmetros.

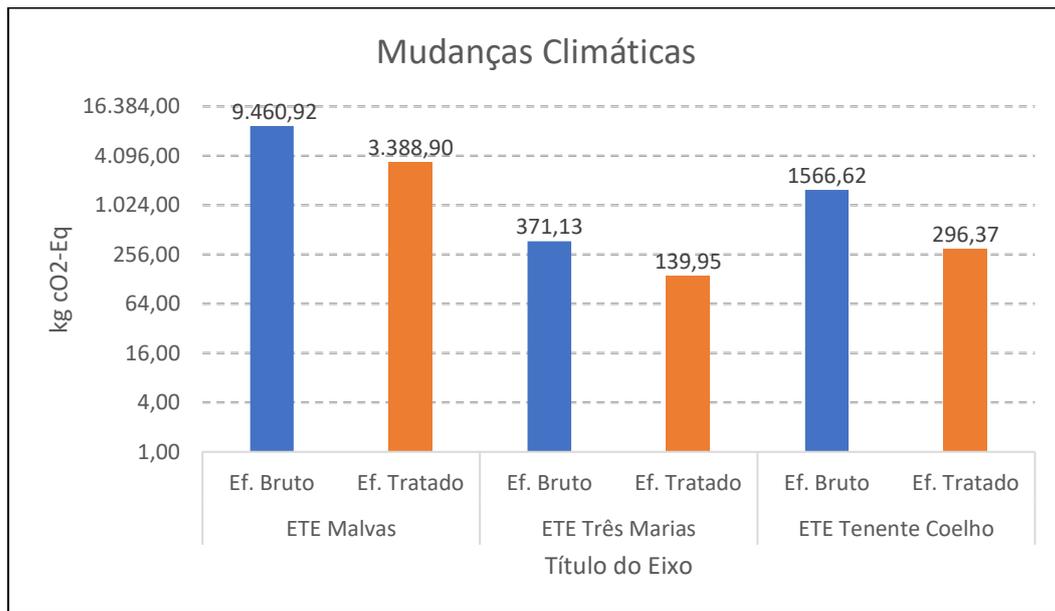
5.2.2.1 Mudanças Climáticas

A categoria de impactos de mudanças climáticas foi indicada nas 3 (três) estações estudadas e obteve um valor expressivo na ETE Malvas, devido ao volume maior de esgoto que ela trata., devido à geração de metano no esgoto bruto, durante o transporte pela rede de esgoto especialmente quando se trata de redes longas que percorrem parte da cidade até chegar à estação, fazendo com que a matéria orgânica seja decomposta por microrganismos anaeróbios ali mesmo.

O tratamento empregado na ETE Malvas também é responsável pela geração de metano, principalmente nas lagoas anaeróbias e facultativas, que criam condições ideais para que microrganismos anaeróbios degradem a matéria orgânica presente no esgoto. A ETE Três Marias e ETE Tenente Coelho também contribuem para emissões de GEE devido ao seu tratamento possuir UASB, reator que realiza somente digestão anaeróbia da matéria orgânica. Barros, Barbosa & Mendonça (2024), assim como Lopes *et al.* (2020), chegaram à conclusão, em seus respectivos estudos, de que as emissões mais significativas de metano estavam associadas principalmente às estações de tratamento de esgoto que utilizavam reatores anaeróbios como parte de seu processo.

A Figura 24 ilustra a redução da categoria de impacto de mudanças climáticas proporcionada pelo tratamento dos efluentes.

Figura 24 - Impacto de Mudanças Climáticas das ETEs estudadas.



Fonte: A autora (2024)

Com base na Figura 24, observou-se uma maior redução do impacto na ETE Tenente Coelho, ou seja, o tratamento empregado foi capaz de reduzir 81% das emissões que contribuem para o impacto de Mudanças Climáticas após o tratamento do efluente. Nas ETEs Malvas e Três Marias, as reduções foram de 64% e 62%, respectivamente. Portanto, vale ressaltar a importância do tratamento de efluentes, pois ao garantir que o esgoto seja adequadamente tratado e descartado de forma segura, minimiza-se a geração de impactos ambientais negativos, desempenhando papel fundamental na promoção da sustentabilidade.

Segundo Tsai *et al.* (2023), as emissões brutas de gases de efeito estufa do Brasil foram de 2,3 bilhões de toneladas de CO₂-Eq em 2022, apresentando uma redução de 8% em relação ao ano anterior. Essa redução foi proporcionada pelas mudanças no uso da terra; pela redução de geração de energia em termelétricas, por causa da abundância de chuvas e a entrada de energias renováveis; pelo setor de processos industriais, decorrente da diminuição da produção de cimentos; e pela redução da geração de resíduos, causada sobretudo pela redução da população evidenciada no último censo. Os autores ainda acrescentam que o setor de agropecuária contribuiu com o aumento das emissões, devido ao aumento da produção bovina.

Apesar dessas estimativas positivas, não se pode ignorar que o Brasil continua sendo o quinto maior emissor de metano no mundo, responsável por 5,5% das emissões

globais desse gás (Alencar *et al.*, 2022). Esse dado ressalta o tamanho do desafio ambiental enfrentado pelo país. A Contribuição Nacionalmente Determinada brasileira, atualizada em 2023, estabeleceu que o Brasil deve reduzir as suas emissões em 48% até 2025 e 53% até 2030, em relação às emissões de 2005, e reiterou seu compromisso de alcançar emissões líquidas neutras até 2050 (BRASIL, 2023).

Assim, alinhadas às metas brasileiras de redução dos impactos negativos gerados ao clima, as estações de tratamento de esgoto têm desempenhado um papel importante na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, contribuindo de forma positiva para a melhoria das condições ambientais e para o cumprimento dos compromissos estabelecidos pelo país.

Vale salientar que a emissão direta de gases depende de condições locais, portanto o uso de parâmetros genéricos ou de regiões distintas na ACV do estudo aumenta a incerteza na tomada de decisão, ou seja, a falta de representatividade de dados para países em desenvolvimento representa barreiras para a disseminação da ACV nessas regiões (Lopes *et al.*, 2020; Araujo, Medeiros & Cohim, 2022).

5.2.2.2 Formação de Oxidantes Fotoquímicos

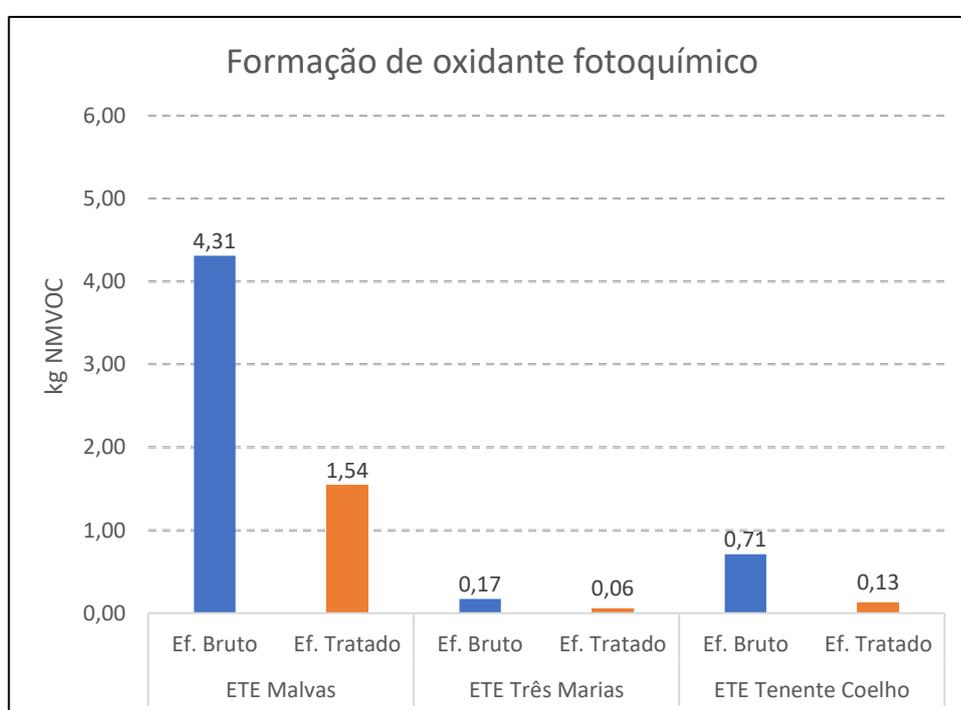
A segunda categoria de impacto em comum às 3 (três) estações de tratamento foi a Formação de Oxidantes Fotoquímicos. Conforme, Odabasi, Organ & Cetin (2005), esse impacto está relacionado à formação de ozônio troposférico, que pode ser gerado a partir de reações químicas entre óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs) na presença de luz solar. Esse fenômeno também é conhecido como "smog fotoquímico".

O tratamento anaeróbio, em si, pode ser uma importante fonte de emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) e gases como o metano (CH₄). Durante a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, diversos compostos voláteis, como álcoois, ácidos graxos voláteis e hidrocarbonetos, são liberados como subprodutos da digestão anaeróbia (Chernicharo *et al.*, 2010). Além disso, o GEE óxido nitroso (N₂O) é comumente encontrado nos processos de nitrificação e nitrificação-desnitrificação do tratamento centralizado de águas residuais aeróbias (Plouviez & Guieysse, 2020), como é o caso das lagoas de maturação, que podem haver condições propícias para a formação do poluente.

Neste estudo, o gás metano foi a substância que contribuiu para a geração desse impacto, devido à digestão da matéria orgânica por microrganismos anaeróbios no esgoto bruto e tratado. Alencar *et al.* (2022) enfatizam que o metano contribui para a formação de ozônio troposférico (O₃), que, como ele, é um gás de efeito estufa de curta duração, mas poderoso. O chamado ozônio de superfície também é um poluente do ar com efeitos prejudiciais para a saúde humana, os ecossistemas e a agricultura.

A Figura 25 apresenta os resultados referentes à Formação de Oxidantes Fotoquímicos, e a redução do impacto ao longo do tratamento.

Figura 25 - Impacto de Formação de Oxidante Fotoquímico das ETEs estudadas.



Fonte: A autora (2024)

De imediato, observa-se que a ETE Malvas apresentou maior emissão de poluentes precursores de ozônio troposférico, resultado do maior volume de esgoto tratado na estação, reduzindo o impacto em aproximadamente 64% após o tratamento. Em contrapartida, as ETEs Três Marias e Tenente Coelho, apresentaram menores emissões, devido ao seu porte menor, com reduções de 64% e 81%, respectivamente. Pensando em maior efetividade de redução do impacto, a ETE Tenente Coelho se apresentou mais eficiente em comparação às outras, por seu tratamento apresentar um nível maior de complexidade.

O risco à saúde humana é uma consequência real dessas substâncias emitidas para a atmosfera. Zhang, Wei & Yan (2019) investigaram os potenciais riscos de carcinogênese humana resultantes da emissão de poluentes atmosféricos provenientes de uma estação de tratamento de esgoto, destacando a preocupação com os efeitos adversos dessas emissões. Os autores analisaram uma ETE em Guangdong, na China e constataram que os valores encontrados de benzeno estavam acima do nível aceitável de risco à saúde pública recomendados pela USEPA (sigla em inglês para Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), de 1×10^{-6} . O valor do risco total encontrado pelos autores foi de $3,26 \times 10^{-3}$.

5.2.2.3 Toxicidade humana

Outra categoria de impacto indicada na ACV foi a de Toxicidade Humana. Esse impacto mede os potenciais efeitos adversos à saúde humana causados pela exposição a substâncias tóxicas emitidas ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo (Mendes, Bueno & Ometto, 2016). Nas estações estudadas neste trabalho, apenas as ETEs Três Marias e Tenente Coelho apresentaram esse impacto. O motivo é o uso do Cloro na última etapa de desinfecção do efluente. Dessa forma, o cloro foi o fluxo que contribuiu para o aparecimento desse impacto.

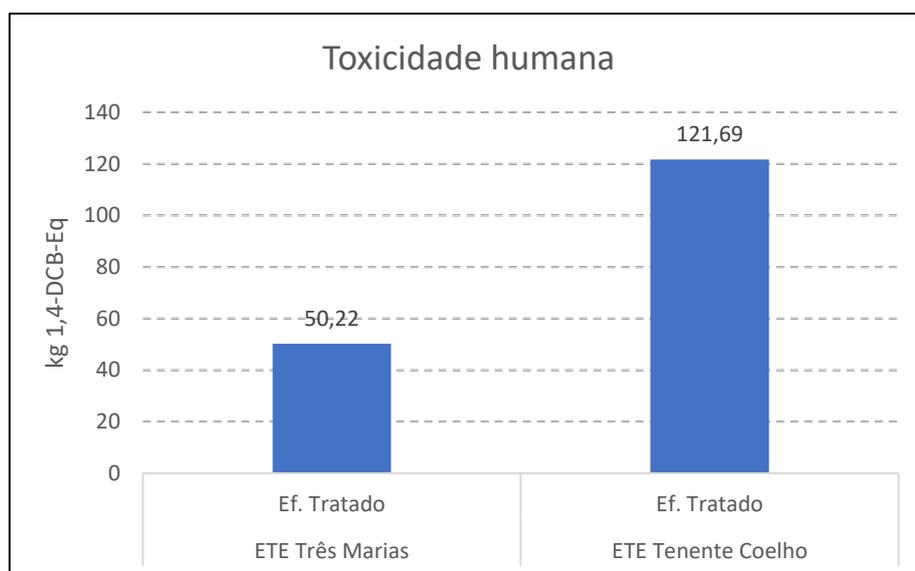
Sabe-se que o cloro é amplamente reconhecido como um agente de baixo custo e alta eficácia na redução de microrganismos patogênicos em esgotos, sendo comumente utilizado em processos de desinfecção de estações de tratamento de efluentes. Sua capacidade de eliminar bactérias, vírus e outros patógenos o torna essencial para garantir que o efluente tratado esteja em conformidade com os padrões sanitários e ambientais. No entanto, o uso do cloro também apresenta desafios e riscos significativos. Quando entra em contato com a matéria orgânica presente no esgoto, o cloro pode reagir e formar compostos secundários, como os trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs), que são substâncias com potencial carcinogênico e tóxico para a saúde humana (WHO, 2011).

Evans, Campbell & Naidenko (2020) calcularam que cerca de 6.800 casos de câncer de bexiga por ano e 828 mil casos ao longo da vida podem estar associados à presença de subprodutos de desinfecção nos EUA. Os autores concluíram que o risco à saúde devido à presença de subprodutos da desinfecção é relevante e que os riscos

cumulativos de acordo com estudos epidemiológicos e toxicológicos são significativamente maiores do que o risco considerado aceitável pela USEPA.

A Figura 26 mostra o resultado da ACV nas ETEs Três Marias e Tenente Coelho para o impacto de Toxicidade humana.

Figura 26 - Impacto de Toxicidade humana das ETEs Três Marias e Tenente Coelho.



Fonte: A autora (2024)

O impacto de Toxicidade Humana foi atribuído à adição de cloro na etapa de desinfecção do efluente. Por esse motivo, a análise desse impacto foi restrita ao efluente tratado, já que comparar o efluente bruto com o tratado seria irrelevante, uma vez que o esgoto bruto não contém cloro, ou seja, o impacto observado não existiria sem o processo de desinfecção, reforçando a importância dessa etapa como a principal responsável pela geração de substâncias tóxicas no contexto analisado.

Portanto, conclui-se que o impacto geral foi negativo devido à adição de cloro. A ETE Tenente Coelho apresentou o maior impacto, com 121,69 kg 1,4-DCB-Eq, em comparação à ETE Três Marias, que registrou 50,22 kg 1,4-DCB-Eq. Esse resultado pode ser atribuído ao maior volume de efluente tratado pela ETE Tenente Coelho. Dessa forma, a ETE Tenente Coelho gerou um impacto ambiental mais significativo, aumentando as emissões de subprodutos e, conseqüentemente, os riscos à saúde humana.

Por outro lado, a etapa de desinfecção não deve ser negligenciada, apesar dos impactos negativos que pode gerar. Este processo é fundamental para a eliminação de

organismos patogênicos, contribuindo diretamente para a segurança sanitária. Sua ausência, além de comprometer a qualidade do efluente, poderia levar a um certo aumento de outros impactos ambientais. De forma geral, quanto maior o grau de tratamento, maiores são os impactos ambientais associados ao ciclo de vida. Isto evidencia a carga de impactos ambientais negativos à custa de uma melhor qualidade do efluente final visando à proteção dos cursos d'água (Lopes *et al.*, 2017).

5.2.2.4 Ecotoxicidade em água doce, marinha e terrestre

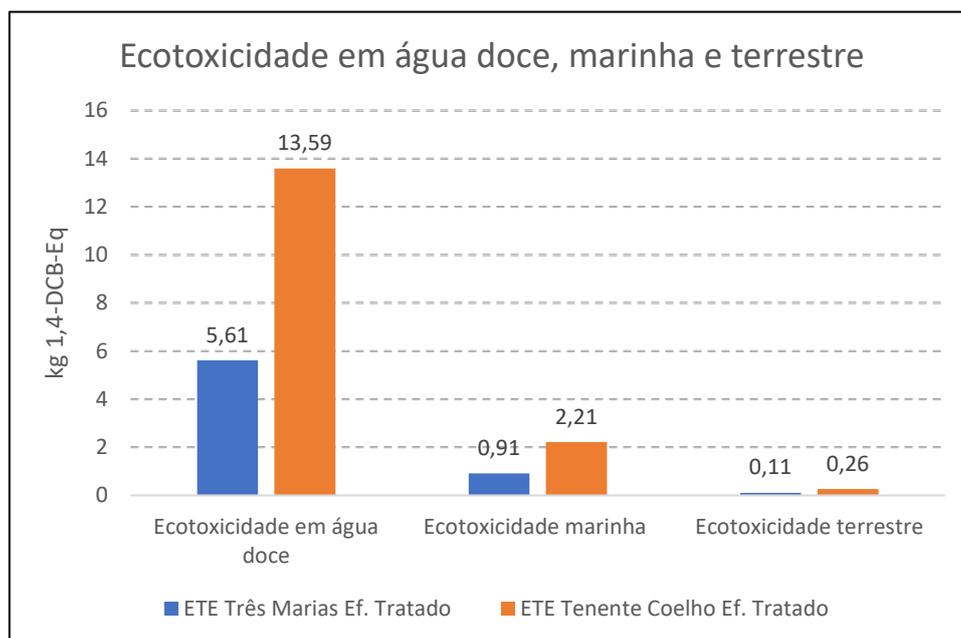
A ecotoxicidade diz respeito aos efeitos nocivos de substâncias químicas sobre ecossistemas. De certa forma, a ecotoxicidade nos ecossistemas tem relação com o impacto de Toxicidade humana pelo desequilíbrio causado no ambiente que afeta também a saúde humana. As emissões de contaminantes no ar, no solo e principalmente nas águas estão relacionadas aos processos naturais e, principalmente, às atividades humanas. Uma vez no ambiente, os contaminantes podem estar sujeitos a uma combinação de processos que podem afetar o seu destino e comportamento (Costa *et al.*, 2008).

Newman (2003), explica que a ecotoxicidade em águas doces e marinha diz respeito ao potencial de um produto ou processo de causar danos aos organismos aquáticos em ambientes de água doce, como rios e lagos e a organismos marinhos, afetando a saúde dos ecossistemas aquáticos em geral. Por seu turno, a ecotoxicidade terrestre mede o impacto de poluentes nos organismos e ecossistemas terrestres, como solo e vegetação, afetando a fertilidade do solo, a redução da biodiversidade e a alteração dos processos ecológicos (Jourdain *et al.*, 2020).

A exemplo disso, o trabalho realizado por Rocha, Puchale & Barcarolli (2022) verificou a toxicidade da progesterona sintética, hormônio muito utilizado principalmente pelas mulheres como método contraceptivo, como um agente tóxico em relação aos biomarcadores nos peixes e puderam concluir que o contaminante foi capaz de provocar alterações comportamentais e bioquímicas na espécie testada.

A Figura 27 apresenta o resultado da ACV para os impactos de Ecotoxicidade em água doce, marinha e terrestre nas ETEs Três Marias e Tenente Coelho.

Figura 27 - Impacto de Ecotoxicidade em água doce, marinha e terrestre das ETEs Três Marias e Tenente Coelho.



Fonte: A autora (2024)

A principal contribuição para o surgimento desses impactos foi o cloro adicionado na etapa de desinfecção. Portanto, somente as ETEs Três Marias e Tenente Coelho obtiveram essa categoria de impacto. De forma semelhante ao impacto de toxicidade humana, a análise dos resultados obtidos da ACV para os impactos citados se limitou ao efluente tratado, visto que o cloro é adicionado ao final do tratamento nessas estações.

Assim, pode-se observar que o potencial degradador da ETE Tenente Coelho foi superior ao da ETE Três Marias em todas as categorias de impactos citadas. É possível notar que o impacto é mais severo nos ecossistemas aquáticos de água doce, visto que o efluente é lançado diretamente nos corpos hídricos próximos à estação. O impacto relacionado ao ambiente terrestre apresentou valores baixos, pelo fato de o poluente não ser lançado diretamente no solo, mas sim na água.

5.2.3 AICV da Estações de Tratamento: Endpoint

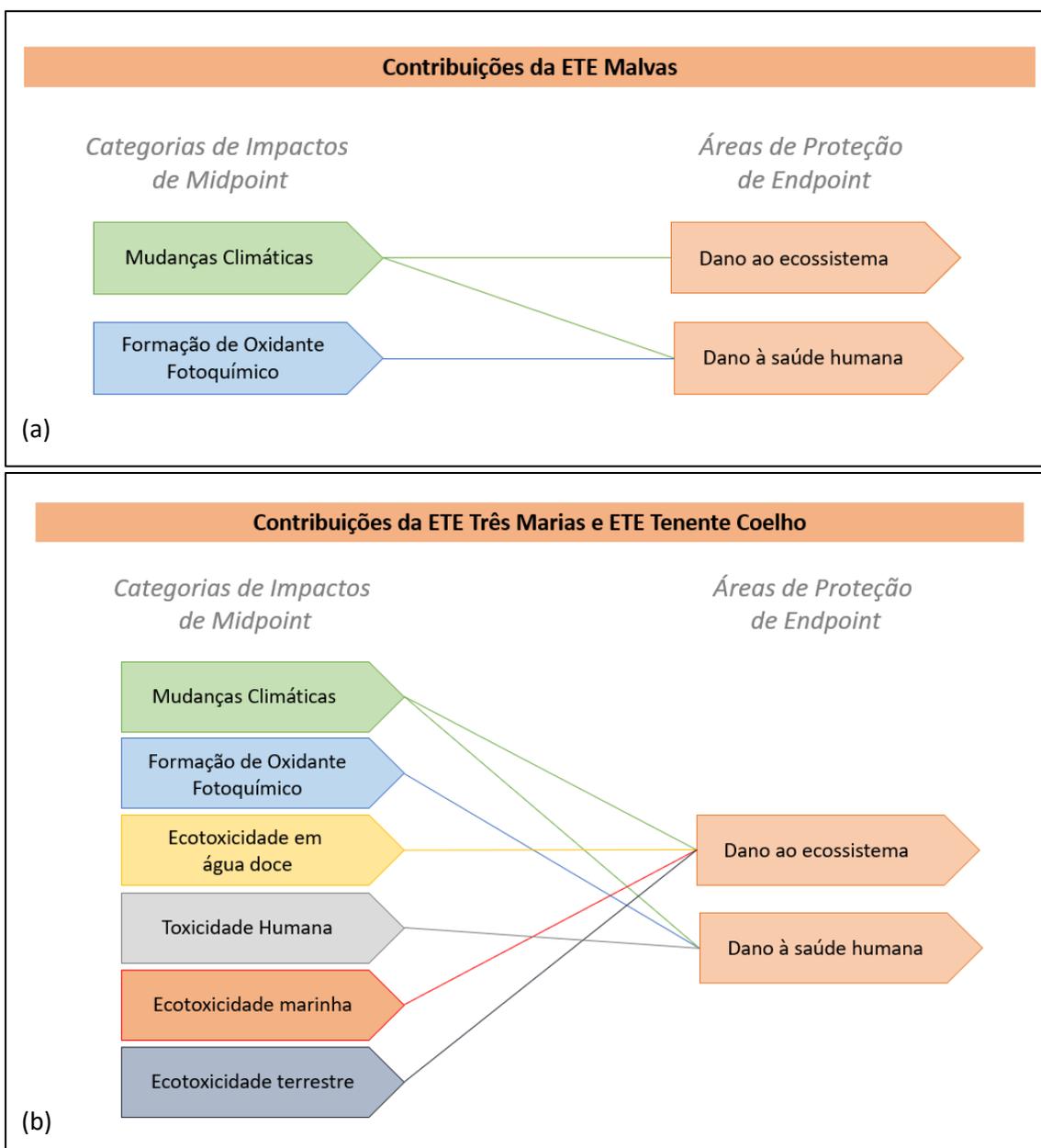
Segundo Piekarski *et al.*, (2012), Mendes, Bueno & Ometto (2016) e Huijbregts *et al.*, (2017), a abordagem de *endpoint*, na avaliação de impacto, é uma etapa fundamental, pois ela traduz os impactos ambientais intermediários em danos diretos a áreas de proteção, como a saúde humana, a qualidade dos ecossistemas e a disponibilidade de recursos naturais. Ao invés de apenas focar nos impactos potencialmente causados por

emissões e consumos, a abordagem de *endpoint* permite uma análise mais tangível dos danos finais, facilitando a interpretação dos resultados e sua relevância para a sociedade e o meio ambiente. Assim, é possível visualizar com mais clareza as consequências a longo prazo das atividades avaliadas.

Os resultados obtidos pela abordagem de *endpoint* são expressos em termos de danos globais causados às três áreas de proteção principais: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade de recursos naturais. Cada categoria de impacto de *midpoint* é associada a um dano específico em uma dessas áreas, e as contribuições são quantificadas, gerando uma pontuação final para cada área de proteção. Salienta-se, ainda, que uma mesma categoria de impacto pode afetar mais de uma área de proteção.

A Figura 28 indica as áreas de proteção afetadas pelos impactos ambientais atribuídos em cada estação de tratamento.

Figura 28 - Áreas de proteção de *endpoint* afetadas pelos impactos intermediários.



Fonte: A autora (2024)

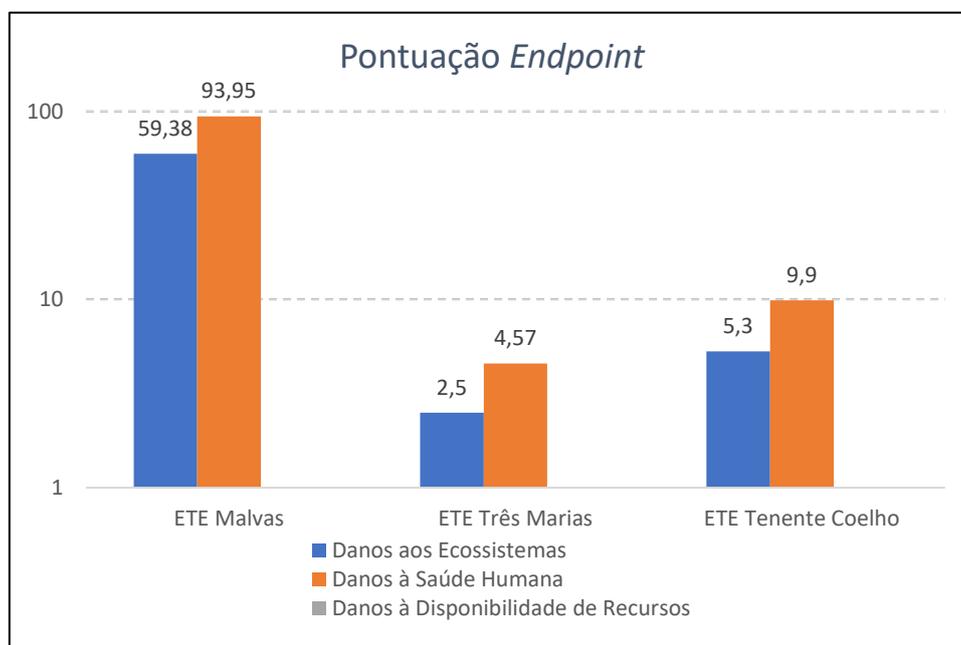
Com base na AICV com abordagem de *endpoint* é possível identificar quais áreas de proteção as ETEs mais afetaram. De acordo com a Figura 28a, a ETE Malvas, que apresentou apenas duas categorias de impactos, ocasionou danos ao ecossistema e à saúde humana, sendo que o impacto de Mudanças climáticas lesou as duas áreas de proteção indicadas, enquanto que o impacto de Formação de Oxidante Fotoquímico afetou a saúde humana.

No caso das ETEs Três Marias e Tenente Coelho (Figura 28b), pode-se concluir que os principais danos ao ecossistema foram provocados pelos impactos relacionados a

Mudanças Climáticas, Ecotoxicidade em água doce, Ecotoxicidade marinha e Ecotoxicidade terrestre. Quanto aos danos à saúde humana, os principais contribuintes foram os impactos de Mudanças Climáticas, Formação de Oxidantes Fotoquímicos e Toxicidade Humana. Esses resultados destacam a influência de múltiplos fatores ambientais e reforçam a importância de controlar esses impactos para minimizar os danos causados tanto ao ecossistema quanto à saúde pública.

O gráfico mostrado na Figura 29 apresenta os resultados da AICV após a abordagem de *endpoint* no efluente tratado das três estações de tratamento estudadas.

Figura 29 - Resultado da AICV após a abordagem de *endpoint* no efluente tratado das ETEs estudadas.



Fonte: A autora (2024)

Conforme apresentado na Figura 29, os danos à saúde humana foram os mais expressivos nas três estações de tratamento de esgoto estudadas. Esse resultado é comum em avaliações de ciclo de vida (ACV) quando há emissões de substâncias tóxicas e poluentes do ar, como compostos orgânicos voláteis e produtos da cloração, que afetam diretamente a saúde humana. Os danos ao ecossistema também se mostraram relevantes, principalmente devido à ecotoxicidade, mas em menor magnitude em relação aos danos à saúde. A ausência de pontuação em "disponibilidade de recursos" indica que a atenção dos gestores deve focar em decisões e ações que reduzam a emissão de poluentes atmosféricos e a contaminação de corpos d'água.

A avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) na abordagem de *endpoint*, conforme mostra a Figura 29, ainda demonstra que a ETE Malvas se destaca como a mais impactante, em termos de danos à Saúde Humana e à Qualidade dos Ecossistemas. A alta pontuação, atribuída a essas áreas de proteção, está relacionada à maior emissão de poluentes ou à operação de processos menos eficientes, o que sugere a necessidade de melhorias nas etapas de tratamento. Em contraste, as ETEs Três Marias e Tenente Coelho apresentaram contribuições muito inferiores. A disparidade entre as estações revela a importância de considerar a eficiência das tecnologias empregadas e o porte das ETEs no planejamento de melhorias para reduzir danos ambientais.

5.3 Propostas e Recomendações

A gestão sustentável em estações de tratamento de esgoto é um tema relevante no que diz respeito à preservação ambiental e saúde pública. Com o aumento das pressões sobre os recursos naturais e as mudanças climáticas, é cada vez mais importante que essas estações implementem tecnologias mais eficientes e sustentáveis alinhadas às diretrizes das agendas ambientais globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esse comprometimento requer não apenas o tratamento adequado dos efluentes, mas também a diminuição de emissões de gases de efeito estufa, o reuso da água tratada, e a gestão eficiente de resíduos gerados, promovendo assim a redução dos impactos ambientais e contribuindo para um futuro mais sustentável.

A partir das análises realizadas, aliadas aos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida e às observações feitas durante as visitas técnicas às estações, foram pensadas propostas de melhorias operacionais estratégicas e manutenção. Essas recomendações visam contribuir com o processo decisório dos gestores, visando a melhoria contínua das estações de tratamento de esgoto em Juazeiro do Norte. A seguir, as propostas estão elencadas, juntamente às suas justificativas:

- Proceder com análises de DBO no Laboratório Regional nas mesmas amostras que se realiza a análise de DQO. As resoluções federais e estaduais são bem específicas quanto a esse indicador, e somente é possível enquadrar o efluente a partir do parâmetro de DBO.
- Realizar coletas e análises de amostras intermediárias, ou seja, entre as operações unitárias da estação, permitindo uma avaliação mais precisa do desempenho

operacional de cada processo e, conseqüentemente, uma análise mais detalhada e abrangente da eficiência global da ETE. Essas análises podem ser realizadas numa frequência menor. Recomenda-se que sejam feitas pelo menos a cada 3 (três) meses.

- Implementar análises dos nutrientes fósforo e nitrogênio. O monitoramento desses elementos nos efluentes tratados é fundamental, embora a legislação não determine padrões de lançamento, todavia quando encontradas concentrações excessivas podem provocar eutrofização nos corpos receptores trazendo inúmeros problemas ao ecossistema aquático. Dessa forma, o conhecimento das concentrações de nutrientes nos efluentes tratados pode contribuir para prever problemas nos corpos receptores.
- Implementar análises realizadas pelo Laboratório Regional de: materiais sedimentáveis, óleos e graxas, sulfeto e sólidos suspensos totais como especifica a legislação estadual.
- Para aprimorar a gestão e interpretação dos dados das ETEs, é interessante acrescentar aos relatórios e planilhas detalhes das condições de coleta, como eventos regionais atípicos (as romarias), períodos chuvosos, vazões de entrada e saída, possíveis problemas observados durante a coleta etc. O Diário de Coleta fornecerá uma compreensão mais clara dos fenômenos que possam ter causado variações no sistema, permitindo correlacionar essas alterações com fatores externos e contribuir para a tomada de decisões mais assertivas.
- A disponibilidade facilitada de dados e relatórios a respeito do Saneamento municipal e das Estações de Tratamento traria uma melhor transparência de informações, garantindo o cumprimento do princípio da publicidade dos atos administrativos.
- Criar um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) baseado na NBR ISO 14001, atualmente ausente nas ETEs e na empresa, visando integrar práticas sustentáveis e o cumprimento das normas ambientais, além de otimizar o controle de impactos ambientais associados às operações. Alguns programas podem fazer parte do SGA, a saber: Plano de Controle e Redução de Insumos; Programa de Treinamento Periódico para os operadores, técnicos e analistas, garantindo atualização contínua de competências e boas práticas, independentemente de

situações emergenciais ou demandas específicas; Plano de Preparação e Atendimento a Emergências; Plano de Controle Operacional, entre outros.

- Analisar alternativas ao uso do cloro para a desinfecção de efluentes, visto que o uso do composto químico pode trazer inúmeros prejuízos aos corpos aquáticos e à saúde humana. Uma indicação possível é o uso de radiação ultravioleta. Jamalinezhad *et al.* (2021) e Millek *et al.* (2021) avaliaram em seus estudos a radiação ultravioleta como alternativa para a desinfecção de efluente e chegaram a resultados promissores, em que houve eficiência de remoção de CT e *E. coli* acima de 99% nos dois estudos, aplicando uma exposição moderada à radiação. No que diz respeito aos custos econômicos relacionados a essa tecnologia, o estudo conduzido por Follmer *et al.* (2019) propôs a construção de um fotorreator UV de baixo custo com peças encontradas em diversos estabelecimentos comerciais, e os resultados obtidos pelos autores foram animadores pois, após a exposição do efluente à radiação por 15 (quinze) minutos, a quantidade de microrganismos no efluente praticamente equiparou-se à quantidade encontrada na água potável fornecida pela companhia de abastecimento, ressaltando o potencial de utilização dessa tecnologia no processo de desinfecção.
- Para garantir uma gestão sustentável das estações, é interessante que haja a recuperação dos recursos líquidos, sólidos e gasosos gerados. Um estudo de viabilidade do uso do lodo gerado nas ETEs Três Marias e Tenente Coelho pode ser desenvolvido em parcerias com as universidades da região que contemplam a área de estudo, bem como estudo mais aprofundado sobre os potenciais reusos dos efluentes.
 - No caso do lodo gerado nas estações, a destinação final geralmente é feita em aterros sanitários, que não é o caso das ETEs estudadas. Porém existem outras possibilidades consideradas viáveis para o aproveitamento de lodo como sua aplicação como insumo agrícola, fertilizante, produção de energia ou mesmo na construção civil como Urban, Isaac & Morita (2019) afirmaram em seu estudo que contemplou os principais potenciais de reaproveitamento do lodo de ETEs. Os autores acrescentam que a escolha da opção para a destinação do lodo depende das características locais, culturais, históricas, geográficas, legais, políticas e econômicas da área de aplicação.

- Tratando-se do reuso de efluentes, há vários usos possíveis. Moura *et al.* (2020) reúnem os principais tipos de usos de efluentes de ETEs, como agricultura, irrigação de gramados e parques, limpeza urbana, sistemas de combate e proteção contra incêndios, construção civil, manutenção de zonas úmidas e até mesmo como água potável. No contexto das estações estudadas neste trabalho a irrigação paisagística, limpeza geral, combate a incêndio e descargas de vasos sanitários podem ser alternativas para uso do efluente tratado e consequente redução dos custos econômicos associados à utilização de água potável para esses fins.
- A fim de mitigar os impactos dos gases de efeito estufa, é fundamental a adoção de tecnologias que permitam a captura e recuperação do biogás gerado durante o tratamento anaeróbio. O metano recuperado pode ser armazenado e utilizado como fonte de energia na própria estação, diminuindo a dependência de energia elétrica da rede e promovendo uma economia para a empresa.

6 CONCLUSÕES

A partir das observações e análises realizadas neste trabalho, é possível compreender melhor a real situação das condições do esgotamento sanitário da cidade de Juazeiro do Norte, Ceará, já que o estudo contemplou as três estações de tratamento de esgoto mais representativas do município.

A ETE Malvas é a estação mais representativa da cidade de Juazeiro do Norte, devido ao tamanho e por receber cerca de 80% do volume de esgoto coletado da cidade, enquanto as outras ETEs são descentralizadas e atendem apenas uma pequena comunidade. A ETE Malvas apresentou baixa eficiência de remoção de matéria orgânica, obtendo uma eficiência de apenas 56,17% de remoção de DQO. A DQO e DBO no efluente final foram de 294 mg.L⁻¹ e 196 mg.L⁻¹ respectivamente, não obedecendo aos padrões da legislação. Os outros indicadores analisados se comportaram dentro da normalidade, a *E. coli* foi de 6,98E+03 NMP/100 mL, pH de 8,05, temperatura de 28,42°C e ausência de materiais flutuantes, contudo somente o pH e a Temperatura atenderam a legislação.

Na ETE Três Marias, a remoção de matéria orgânica também foi baixa, apontando uma média de 45,75% de remoção de DQO. O efluente tratado apresentou 214mg.L⁻¹ de DQO, 3,47E+02 NMP/100 mL de *E. coli*, 7,41 de pH e 29,85 °C de temperatura. Já a ETE Tenente Coelho foi estação que mais se destacou dentre as três ETEs estudadas, quanto ao desempenho operacional segundo a comparação feita entre elas pelo teste de variância e teste de Tukey. A média de remoção de matéria orgânica foi de 79,97%, apresentando 193 mg.L⁻¹ de DQO no esgoto tratado. Os demais indicadores se comportaram da seguinte forma: 1,66E+01 NMP/100 mL de *E. coli*, 7,57 de pH e 29,23 °C de temperatura.

A Avaliação do Ciclo de Vida identificou os principais impactos de *midpoint* decorrentes do tratamento de esgotos de Juazeiro do Norte, destacando os impactos de Mudanças Climáticas e Formação de Oxidante Fotoquímico que se manifestaram em todas as três estações. O impacto de toxicidade humana apresentou valores expressivos tanto na ETE Três Marias quanto na ETE Tenente Coelho, devido ao uso do cloro na etapa de desinfecção. A esse insumo também são atribuídos os impactos de Ecotoxicidade em água doce, marinha e terrestre verificados na ACV.

Na abordagem de *endpoint*, as categorias de impactos de *midpoint* foram associadas aos Danos ao Ecossistema e à Saúde Humana. A ETE Malvas se mostrou mais relevante nos impactos gerados a essas áreas de proteção, devido ao volume tratado ser maior. Além disso, os resultados para essa análise concluíram que a Saúde Humana é a área de proteção que mais sofre com os impactos gerados por essas estações de tratamento, principalmente devido às mudanças climáticas, à formação de oxidante fotoquímico e à toxicidade de produtos químicos nos seres humanos.

As propostas e recomendações elaboradas ao final deste estudo objetivam contribuir para a construção de uma gestão fundamentada nos princípios de sustentabilidade, fornecendo aos gestores um norte para a tomada de decisões assertivas, ampliando o foco para além do cumprimento da legislação, em que as estações de tratamento não apenas operem de forma eficiente, mas também promovam benefícios tangíveis ao meio ambiente. Dentre essas propostas destacam-se a realização de análises de DBO₅, nutrientes, materiais sedimentáveis, óleos e graxas, sulfeto e sólidos suspensos totais pelo Laboratório Regional, a criação de um Sistema de Gestão Ambiental e a recuperação e reuso dos recursos gerados pelas ETEs como o lodo, a água tratada e o biogás.

Os resultados obtidos neste estudo reforçam a relevância da avaliação do ciclo de vida como ferramenta essencial para identificar e quantificar os impactos ambientais associados às estações de tratamento de esgoto. Entretanto, outros estudos podem ser desenvolvidos nesse âmbito, que aprofundem a análise, incorporando parâmetros adicionais, como o de nutrientes por exemplo, além de uma avaliação individual em cada operação unitária da estação. A continuidade dessas investigações não apenas fortalecerá o conhecimento científico sobre os impactos ambientais das ETEs, mas também contribuirá para a formulação de políticas públicas e tecnologias inovadoras que promovam uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos e do saneamento.

7 REFERÊNCIAS

ACHAG, B.; MOUHANNI, H.; BENDOU, A. Improving the performance of waste stabilization ponds in an arid climate. **Journal of Water and Climate Change**. v. 12, n. 8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.218>.

ALENCAR, A.; ZIMBRES, B.; SILVA, C.; TSAI, D.; SILVA, F.B.; QUINTANA, G. de O.; GRACES, I.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.Z.; CARVALHO, K.; POTENZA, R.F.; AZEVEDO, T. **Desafios e oportunidades para redução das emissões de metano no Brasil**. SEEG, 2022.

AMARAL, K.G.C. do; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Evaluation of the environmental life cycle of an STP that employs a low-rate trickling filter as post-treatment of a UASB reactor and different sludge-management alternatives. **Revista Ambiente e Água**. v. 16, n. 3, e2648. Taubaté. 2021. DOI: 10.4136/ambi-agua.2648.

ARAÚJO, M. C.; MEDEIROS, D. L.; COHIM, E. Desempenho energético e pegada de carbono de um sistema de esgotamento sanitário centralizado no nordeste brasileiro. **Eng Sanit Ambient**. v. 27, n.1, p. 205–221, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200325>.

ARRUDA, J.S.S. Manutenção do Sistema de Esgoto Condominial: avaliação da sustentabilidade técnico-econômica. **Artigo Científico (graduação)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, 2018.

BARROS, E. A. DE; BARBOSA, T. A.; MENDONÇA, L. C. Estimativa de créditos de carbono nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) da Grande Aracaju/Sergipe. **Revista Cereus**. v. 16, n. 1, p. 74–90, 2024. DOI: 10.18605/2175-7275/cereus.v16n1p74-90.

BRASIL. Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/14026.htm#:~:text=%E2%80%9CDisp%C3%B5e%20sobre%20a%20cria%C3%A7%C3%A3o%20da,para%20a%20regula%C3%A7%C3%A3o%20dos%20servi%C3%A7os>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BRASIL. **Relações exteriores. Brasil na COP28: liderança climática e expectativas para futuro sustentável.** Brasília. 2023. Disponível em: <<https://www.infonormas.com.br/2022/07/19/como-referenciar-site-do-governo-normas-abnt/>>. Acessado em: 11/09/2024.

Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece. **Plano de Investimentos e Metas do Contrato de Programa do Município de Juazeiro do Norte – CE: Anexo 1.** 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. STUETZ, R.M.; SOUZA, C.L.; MELO, G.C.B. de. Alternativas para o controle de emissões odorantes em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico. **Eng Sanit Ambient.** v. 15, N. 3, p. 229-236. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000300005>.

CIROTH, A.; DI NOI, C.; LOHSE, T.; SROCKA, M. openLCA 1.10: Comprehensive User Manual. **GreenDelta.** 2019.

COLTRO, L. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas: **CETEA/ITAL.** 75 p. 2007.

COROMINAS, L., BYRNE, D., GUEST, J. S., HOSPIDO, A., ROUX, P., SHAW, A., & SHORT, M. D. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. **Water Research.** v. 184, 116058. 2020. DOI:10.1016/j.watres.2020.116058.

COSTA, C. R.; OLIVI, P.; BOTTA, C.M.R.; ESPINDOLA, E. L.G. A toxicidade em Ambientes Aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química nova.** v. 31, n. 7, p. 1820–1830, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700038>.

COSTA, I. G. de; PEIRNBON, F.; SOARES, E. C. A efetivação do direito ao saneamento básico no brasil: do PLANASA ao PLANASB. **Meritum,** Belo Horizonte, Vol. 13, n. 2, p. 335-358, 2018. DOI: <https://doi.org/10.46560/meritum.v13i2.6185>.

D’ALESSANDRO, E.B., SAAVEDRA, N.K., SANTIAGO, M.F., D’ALESSANDRO, N.C.O. Influência da sazonalidade em lagoas de estabilização. **Ingeniería del Agua,** v. 19, n.4, 2015. DOI:10.4995/ia.2015.3418.

EVANS, S.; CAMPBELL, C.; NAIDENKO, O. V. Analysis of Cumulative Cancer Risk Associated with Disinfection Byproducts in United States Drinking Water. *International*

Journal of Environmental **Research Public Health**. v. 17, 2149. 2020, DOI:10.3390/ijerph17062149.

FERREIRA, J. G; GOMES, M. F. B.; DANTAS, M. W de A. Desafios e controvérsias do novo marco legal do saneamento básico no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.7, p. 65449-65468, 2021. DOI:10.34117/bjdv7n7-019.

FINNVEDEN, G.; POTTING, J. **Life Cycle Assessment. 74 Encyclopedia of Toxicology**, v. 3. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00627-8>.

FOGLIA, A.; ANDREOLA, C.; COPILLETTA, G.; RADINI, S.; AKYOL, Ç.; EUSEBI, A.L.; STANCHEV, P.; KATSOU, E.; FATONE, F.; Comparative life cycle environmental and economic assessment of anaerobic membrane bioreactor and disinfection for reclaimed water reuse in agricultural irrigation: A case study in Italy. **Journal of Cleaner Production**. v. 293, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126201>.

FOLLMER, D.L.S.; BISOGNIN, R.P.; SOUZA, E.L. DE; VASCONCELOS, M. de C.; GUERRA, D; SILVA, D.M. da. Construção e eficiência de um fotorreator de radiação ultravioleta de baixo custo para desinfecção de água. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis. v. 8, n. 4, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e42019165-181>.

FREIRE, R. C.; SARAIVA, M. de A.; SILVA, E.M.F.; LIMA, P.V.P. Avaliação de sustentabilidade para estações de tratamento de esgoto: uma revisão bibliométrica. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**. v. 61, p. 161–182, 2023. DOI: 10.5380/dma.v61i0.80307.

HAMDHANI, H.; EPPEHIMER, D.E.; BOGAN, M.T. Release of treated effluent into streams: A global review of ecological impacts with a consideration of its potential use for environmental flows. **Freshwater Biology** v. 65:1657–1670. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/fwb.13519>.

HAUSCHILD, M. Z., ROSENBAUM, R. K., OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Springer, 2018.

HERNANDEZ-PANIAGUA, I.Y.; RAMIREZ-VARGAS,R.; RAMOS-GOMEZ, M.S.; DENDOOVEN, L.; AVELAR-GONZALEZ, F.J.; THALASSO, F. Greenhouse gas emissions from stabilization ponds in subtropical climate. **Environmental Technology**, v. 35, n. 6, p. 727-734, 2013. DOI: 10.1080/09593330.2013.848910.

HO, L.T.; PHAM, D.T.; VAN ECHELPOEL, W.; ALVARADO, A.; ESPINOZA-PALACIOS, J.R.; AREVALO-DURAZNO, M.B.; GOETHALS, R.L.M. Exploring the influence of meteorological conditions on the performance of a waste stabilization pond at high altitude with structural equation modeling. **Water Science & Technology**, v. 78, 2018. DOI: 10.2166/wst.2018.254.

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z.J.N.; ELSHOUT, P.M.F.; STAM, G.; VERONES, F.; & VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 138–147, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

IAQUINTO, B.O. A sustentabilidade e suas dimensões. **Revista da ESMESC**. v. 25, n. 31, p. 157-178, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/revistadaesmesc.v25i31.p157>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2019.

JAMALINEZHADA, M.; HASSANIA, A.H.; BORGHEIB, M.; AMINC, M.M. Performance evaluation of ultraviolet radiation and ozone disinfection for municipal secondary effluent reuse (Case study in Isfahan North wastewater treatment plant). **Desalination and Water Treatment**. v. 223. 2021. DOI: 10.5004/dwt.2021.27061.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7a ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

JOURDAINE, M, LOUBET, P., TREBUCQ, S., SONNEMANN, G. A detailed quantitative comparison of the life cycle assessment of bottled wines using an original harmonization procedure. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, 119472, 2020. 119472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119472>.

JUAZEIRO DO NORTE. Prefeitura Municipal de Juazeiro do Norte – CE. **Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte. Etapa 2: Diagnóstico – Leituras Técnicas e Comunitárias da Cidade**. Juazeiro do Norte, 2022.

LIU, L.; HALL, G.; CHAMPAGNE, P. The role of algae in the removal and inactivation of pathogenic indicator organisms in wastewater stabilization pond systems. **Algal Research**. v. 46, 101777, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101777>.

LEONETI, A.B.; PRADO, E.L. do; OLIVEIRA, S.V.W.B. de. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**. Rio de Janeiro. v. 45 (2):331-48, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-76122011000200003>.

LOPES, T. A. de S.; KIPERSTOK, A.; ZANTA, V.M.; QUEIROZ, L.M. Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos. **Revista DAE**. v. 65, p. 47–55, 2017. DOI:10.4322/dae.2017.005.

LOPES, T. A. S.; QUEIROZ, L.M.; TORRES, E.A; KIPERSTOK, A. Low complexity wastewater treatment process in developing countries: A LCA approach to evaluate environmental gains. **Science of the Total Environment**, v. 720, p. 137593, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137593>.

LOPES, W. da S.; MAYER, M.C; BARBOSA, R. de A.; LIRA, E.C.de; CAVALCANTE, M.T.; ARAÚJO, J. S. Sistemas de lagoas de estabilização como uma alternativa de oferta de água para produção agrícola em regiões semiáridas. **Revista do Instituto Nacional do Semiárido – REVINSA**. v. 1, n. 2, 2022.

MACHINENI, L. Review on biological wastewater treatment and resources recovery: attached and suspended growth systems. **Water Science & Technology**. v. 80, n.11, 2020. DOI: 10.2166/wst.2020.034.

MANNINA, G.; REBOUÇAS, T.F.; COSENZA, A.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; GIBERT, K. Decision support systems (DSS) for wastewater treatment plants – A review of the state of the art. **Bioresource Technology**. v. 290, 121814, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121814.

MAYER, F.; BHANDARI, R.; STEFAN, A. G. Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany. **Journal of Environmental Management**. v. 290. 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112557.

MEENA, R.A.; KANNAH, R.Y.; SINDHU, J.; RAGAVI, J.; KUMAR, G.; GUNASEKARAN, M.; BANU, J.R. Trends and resource recovery in biological

wastewater treatment system. **Bioresource Technology Reports**. v. 7, 100235, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100235>.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**. v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>.

METCALF, L.; EDDY H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MEZZOMO, V. **Estudo comparativo entre os sistemas condominial e convencional do tipo separador absoluto de coleta de esgoto sanitário**. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre. 2019.

MILLEK, K.M.; SOUZA, J.B. de; VIDAL, C.M. de S. Radiação ultravioleta como alternativa tecnológica para desinfecção de efluente de indústria de papel. **Acta Ambiental Catarinense – Unochapecó**. v. 18, n. 1, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.24021/raac.v18i1.5840>.

MOURA, P.G.; ARANHA, F.N.; HANDAM, N.B.; MARTIN, L.E.; SALLES, M.J.; CARVAJAL, E.; JARDIM, R.; SOTERO-MARTINS, A. Água de reuso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 25, n. 6. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180201>.

MURALIKRISHNA, I.V.; MANICKAM, V. Chapter Five - Life Cycle Assessment. **Environmental Management**. p. 57-75, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>.

NASCIMENTO, A. S. do. A urbanização planetária neoliberal e o discurso da resiliência e da urbanização sustentável: uma reflexão crítica em torno da “nova agenda urbana global”. **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**. v. 3, n. 2, p. 318-335, 2021. DOI: [10.15446/rcdg.v30n2.88748](https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n2.88748).

NBR ISO 14040: **Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Brasil, 2014. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

NBR ISO 14044: **Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações**. Brasil, 2014. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

NEWMAN, M. C. **Fundamentals of Ecotoxicology: The Science of Pollution**. 4th ed. CRC Press. Boca Raton, FL. 2015.

NÓBREGA, F. A. R. da., VIEIRA FILHO, D. de S.; SILVA, F. B. da; VERAS, R. L. O. de M. Infraestrutura urbana: infraestrutura e o Crescimento populacional no Brasil. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n.16, p. 19-25, mar. 2013.

ODABASI, M.; ONGAN, O.; CETIN, E. Quantitative analysis of volatile organic compounds (VOCs) in atmospheric particles. **Atmospheric Environment**. v. 39, p. 3763–3770, 2005. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.02.048.

OGUNFOWOKAN, A.O.; OKOH, E.K.; ADENUGA, A.A.; ASUBIOJO, O.O. An Assessment of the Impact of Point Source Pollution from a University Sewage Treatment Oxidation Pond on a Receiving Stream-A Preliminary Study. **Journal of Applied Sciences**. v. 5, n. 1, p. 36-43, 2005. DOI: 10.3923/jas.2005.36.43.

PAFFRATH, S.F. **Utilização do sistema condominial como alternativa de esgotamento: histórico, fundamentos e comparação com um sistema convencional**. Monografia (graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil. Curitiba. 2013.

PEQUENO, L.A.B.; CAROLINO, M.P.; CARVALHO, M.N.; EL-DEIR, S.G. O paradoxo da Escherichia coli como bioindicador. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. v. 09. n. 02. p. 114-121. 2024. DOI: 10.24221/jeap.9.2.2024.5755.114-121.

PHUNTSHO, S.; SHON, H.K.; VIGNESWARAN, S.; NGO, H.H.; KANDASAMY, J.; DORJI, P. Performance of Waste Stabilization Ponds: Experience from Cold Climatic Conditions of Bhutan. **Journal of Water Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 1-16, 2016. DOI: 10.11912/jws.2016.6.1.1-16.

PIEKARSKI, C. M; LUZ, L.M. da; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A.C. de. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: especificidades brasileiras life cycle impact

assessment methods : a discussion of methods adoption in brazilian specificities. **Revista Gestão Industrial**. v. 8, n. 3, p. 222–240, 2012. Doi: 10.3895/S1808-04482012000300011.

PLOUVIEZ, M.; GUIEYSSE, B. Nitrous oxide emissions during microalgae-based wastewater treatment: current state of the art and implication for greenhouse gases budgeting. **Water Science & Technology**. v. 82, n. 6, p. 1–6, 2020. DOI: 10.2166/wst.2020.304.

PONCE, F. DE A. M.; ROLLEMBERG, S. L. DE S.; OLIVEIRA, A. G. DE. Aplicação da análise de confiabilidade para avaliação de estações de tratamento de esgoto no estado do Ceará. **Revista Tecnologia**. v. 40 n. 2. p 1–17, 2019. DOI: 10.5020/23180730.2019.8971.

RÄDER, A.S.; GOMES, L.P.; LOPES, E.S.; LACERDA, A.B. Remoção natural de coliformes em esgoto doméstico por meio de lodos ativados – Um estudo de caso. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 9, n.1, p. 1522-1530, 2023. DOI:10.34117/bjdv9n1-105.

RAMOS, M. D.; GOMES, T. M.; AQUINO, S. F. de; AGUIAR, A. Sewage treatment in cities of the state of Minas Gerais, Brazil, that use the UASB reactor as the only biological treatment: A case study. **Journal of Water Process Engineering**. v. 56, 104509, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104509>.

RESENDE, J. D., RODRIGUES, P.F, M.A, PACCA, S. A., NOLASCO, M. A. Avaliação do Ciclo de Vida de Sistemas de Tratamento de Esgoto por Lodos Ativados Convencional e Reator UASB seguido de Lodos Ativados. 5th International Workshop. **Advances in Cleaner Production – Academic Work**. São Paulo. Brazil. 2015.

RIBEIRO, J. C.; SILVA, G. H. R. Acompanhamento operacional e avaliação de uma estação compacta de tratamento de esgoto sanitário: reator UASB seguido de filtro aerado submerso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n.1, p. 27–31, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018164458>.

ROCHA, C. S, PUCHALE, R. Z., BARCAROLLI, I. F. Avaliação Toxicológica da Progesterona em biomarcadores de Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). **Revista**

Brasileira de Meio Ambiente, v.10, n.2, p.26-40. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7320633>.

RODRIGUES, F. P. **Utilização da técnica da biorremediação em sistemas de esgotamento sanitário. Aplicação na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE), 2005.

SAIANI, C. C. S.; TONETO JÚNIOR, R. Evolução do acesso a serviços de saneamento básico no Brasil. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 79-106, abr. 2010.

SALAZAR-LARROTA, L., URIBE-GARCÍA, L., GÓMEZ-TORRES, L., and ZAFRA-MEJÍA, C., Analysis of the efficiency of UASB reactors in a municipal wastewater treatment plant. **DYNA**, v. 86, n. 209, p. 319-326, 2019. DOI: 10.15446/dyna.v86n209.70332.

SALES, V. S. Saneamento básico no Brasil: entre o público e o privado. **Revista de Políticas Públicas**, v. 26, n. 1, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18764/2178-2865.v26n1p409-424>.

SANTOS, A.; CARVALHO, A.; BARBOSA-PÓVOA, A. A methodology for integrating the characterization factors uncertainty into life cycle assessments. **Sustainable Production and Consumption**, v. 33, p. 1018–1030, 2022. DOI: 10.1016/j.spc.2022.08.018.

SEYE, O. **Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo Produtivo de Cerâmica Estrutural Tendo Como Insumo energético Capim Elefante (*Pennisetum Purpureum Schaum*).** Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica Campinas, SP: [s.n.], 2003.

SILVA, C.M.R.B. da; LEÃO, S.G. Sustentabilidade: desafios da realidade para uma (re)pensar na educação. **Revista Educação Pública**. v. 20. n. 24. 2020. DOI: 10-18264/REP.

SILVA, C.R. DA; SANCHES, M.S.; MILHIM, B.H.G. DE A.; ROCHA, S.P.D. DA; PELAYO, J.S. Avaliação da presença e quantificação de coliformes totais e *Escherichia coli* em amostras de água destinada ao consumo humano proveniente de poços artesianos.

Semina: Ciências Biológicas e da Saúde. Londrina. v. 40, n. 2, p. 129-140. 2019. DOI: 10.5433/1679-0367.2019v40n2p129.

SILVA, J.A. Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 15, 10940. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410940>.

SINGH, R., SAMAL, K., DASH, R.R., BHUNIA, P. Vermifiltration as a sustainable natural treatment technology for the treatment and reuse of wastewater: A review. **Journal of Environmental Management**. v. 247, p. 140–151, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.075>.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático de Serviços de Água e Esgoto. Ministério do Desenvolvimento Regional: Secretaria Nacional de Saneamento.** Dezembro de 2023.

SOARES, S.R.A.; BERNARDES, R.S.; CORDEIRO NETTO, O.M. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 18, p. 1713-1724, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2002000600026>.

TRATA BRASIL, Painel de Saneamento Brasil. **Evolução de Indicadores: Investimentos Totais 2022.** Disponível em: <
https://www.painelsaneamento.org.br/localidade/evolucao?id=230730&L%5Bi%5D=INV_TOT>. Acessado em: 20 abr. 2024.

TSAI, D.; POTENZA, R.; QUINTANA, G.; CARDOSO, A.M; SILVA, F.B.; GRACES, I.; COLUNA, I.; CARVALHO. K.; ZIMBRES, B.; SILVA, C.; SILVA-JUNIOR, C.H.L.; SOUZA, E.; SHIMBO, J.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; HERSCHMANN, S.; ARAÚJO, S. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil.** SEEG. 2023.

URBAN, R.C; ISAAC, R. de L.; MORITA, D.M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**. v. 67, n. 219, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.050>.

VALENTE, S. R. D. P. Direito e políticas públicas: uma visão jurídico-institucional sobre o caso do saneamento básico no Brasil. **Revista Estudos Institucionais**, v. 5, n. 3, p. 1064-1092, set./dez. 2019. DOI: 10.21783/rei.v5i3.440.

VAN HAANDEL, A.; SANTOS, S.L. dos; Variação do pH e remoção de nitrogênio em lagoas de polimento. **Revista DAE**. v. 69, n. 229. p. 52-69, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.019>.

NÓBREGA, F. A. R. da., VIEIRA FILHO, D. de S.; SILVA, F. B. da; VERAS, R. L. O. de M. Infraestrutura urbana: infraestrutura e o Crescimento populacional no Brasil. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n.16, p. 19-25, mar. 2013.

VON SPERLING, M. (2007). **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Lagoas de Estabilização** (Volume 3). Editora UFMG.

ZHANG, Y.; WEI, C.; YAN, B. Emission characteristics and associated health risk assessment of volatile organic compounds from a typical coking wastewater treatment plant. **Science of the Total Environment**, v. 693, p. 133417, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.223>.

WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**: 4th ed. Geneva. 2011. Disponível em: < https://reliefweb.int/report/world/guidelines-drinking-water-quality-fourth-edition?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIlaSc0NG-iAMVABatBh1J4QB-EAAYAiAAEgJ-lfD_BwE>. Acessado em: 12 set. 2024.