UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

THÂMARA RAFAELLA NEGREIROS CLEMENTE

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE EM LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NO SERTÃO PERNAMBUCANO

Caruaru
2024

THÂMARA RAFAELLA NEGREIROS CLEMENTE

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NO SERTÃO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientadora: D. Sc. Simone Machado Santos

Coorientadora: D. Sc. Kenia Kelly Barros da Silva

Caruaru

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Clemente, Thâmara Rafaella Negreiros.
Análise da confiabilidade de lagoas de estabilização em Estações de Tratamento de Efluentes no Sertão Pernambucano / Thamara Rafaella Negreiros Clemente. - Caruaru, 2024.
52f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2024.
Orientação: Simone Machado Santos.
Coorientação: Kenia Kelly Barros da Silva.
Inclui referências.

1. Tratamento de efluentes; 2. Conformidade regulatória; 3. Eficiência do sistema; 4. Qualidade do efluente; 5. Confiabilidade; 6. Lagoa. I. Santos, Simone Machado. II. Silva, Kenia Kelly Barros da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

THÂMARA RAFAELLA NEGREIROS CLEMENTE

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NO SERTÃO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

.

Aprovado em: 11/12/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
SIMONE MACHADO SANTOS
Data: 24/01/2025 14:06:24-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profª. Dª. Sc. Simone Machado Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Documento assinado digitalmente
gov.br
ARMANDO DIAS DUARTE
Data: 23/01/2025 18:17:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profº. D. Sc. Armando Dias Duarte (Examinador Externo)
Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB

Documento assinado digitalmente
gov.br
JULIANA CARDOSO DE MORAIS
Data: 24/01/2025 09:56:22-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Profª. Dª. Sc. Juliana Cardoso de Morais (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

AGRADECIMENTOS

Dedico primeiramente a Deus, aos meus pais, José Valciano e Redilamar Negreiros, a minha Tia Renijane, e a minha irmã Thárcylla Rebecca, pelo amor e incentivo incondicional ao longo de toda a minha jornada, que inconscientemente foram minha inspiração e nos momentos difíceis sempre estiveram comigo.

À minha amada avó Severina em memória, que sempre torceu por mim, educou-me para vida e estará sempre comigo, agora em minhas orações.

Às Professoras Orientadoras Profª. Dª. Sc. Simone Machado Santos, Profª. Dª. Sc. Kenia Kelly Barros da Silva, Profª. Dª Sc. Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves pelo empenho e dedicação disponibilizando seu tempo e conhecimentos às orientações a mim ministradas.

À Universidade Federal de Pernambuco e a todo o corpo docente, direção e coordenação, em especial a Marcelo, que oportunizaram ao longo da minha jornada conhecimentos essenciais para minha formação.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração e conclusão deste trabalho.

À Deus por me dar forças para não desistir e saúde para continuar, além de colocar em meu caminho pessoas especiais como todas já citadas e assim como também Tatiane Felix que me incentivou e esteve presente ao longo de todo o curso.

RESUMO

O tratamento de efluentes adequado é um dos desafios, pois requer que o efluente final esteja de acordo com os padrões ambientais, promovendo a reutilização de recursos, eficiência energética e redução de resíduos. O CDC, baseado na distribuição Log-normal, é uma ferramenta estatística essencial, utilizada para avaliar a conformidade do efluente com os limites legais, sendo influenciado por fatores como a variabilidade dos parâmetros, eficiência do tratamento e manutenção. O monitoramento regular é indispensável para identificar variações e implementar ações corretivas no sistema de tratamento. Neste estudo, avaliou parâmetros como SST, DBO, DQO, coliformes termotolerantes, PT e NTK, utilizando dados da COMPESA, voltadas as tecnologias nas lagoas de estabilização, as amostras foram analisadas mensalmente, com cálculos de CDC, CMC e NC. Além de estabelecer metas dos padrões de lançamento, utilizando a planilhas eletrônicas para compilar os dados. De acordo, com o resultado apresentado as ETEs demonstraram alta eficiência na remoção de poluentes, com destaque para a DBO e a DQO, atingindo reduções significativas que promovem a melhoria da qualidade dos efluentes, conforme as normas ambientais. A análise revelou estabilidade nos processos, com resultados consistentes na redução de DBO/DQO e boa retenção de sólidos. Contudo, os índices variáveis de remoção de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, indicam a necessidade de ajustes operacionais. Em síntese, as ETEs apresentaram potencial no tratamento de poluentes orgânicos, com oportunidades de aprimoramento na remoção de nutrientes e sólidos suspensos para maior proteção dos recursos hídricos.

Palavras-chaves: tratamento de efluentes; conformidade regulatória; eficiência do sistema; qualidade do efluente; confiabilidade; lagoa.

ABSTRACT

Proper effluent treatment remains a significant challenge, requiring final discharge to meet environmental standards while promoting resource reuse, energy efficiency, and waste reduction. The Compliance Discharge Criteria (CDC) based on log-normal distribution is an essential statistical tool for assessing effluent compliance with legal limits. This assessment is influenced by factors, such as parameter variability, treatment efficiency, and system maintenance. Regular monitoring is crucial to detect variations and implement corrective actions. In this study, parameters including Total Suspended Solids (TSS), Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), thermotolerant coliforms, Total Phosphorus (TP), and Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) were evaluated using data from COMPESA, focusing on stabilization pond technologies. Monthly sample analyses included calculations for CDC, Maximum Compliance Criteria (CMC), and Non-Compliance (NC) rates. Data compilation was facilitated through spreadsheets to establish effluent discharge targets. The results demonstrated high efficiency in pollutant removal, particularly for BOD and COD, with significant reductions that enhanced effluent quality in line with environmental standards. The analysis revealed process stability, demonstrating consistent reductions in BOD and COD, as well as effective solids retention. However, the variable removal rates for nutrients such as phosphorus and nitrogen indicate a need for operational adjustments. In summary, the ETEs exhibited strong potential for organic pollutant treatment while highlighting opportunities for improvement in nutrient and suspended solids removal to better protect water resources.

Keywords: wastewater treatment; regulatory compliance; system efficiency; effluent quality; reliability; pond.

.

SUMÁRIO

1.	**INTRODUÇÃO**	09
1.1.	Problemática e justificativa	10
1.2.	Objetivos	13
1.2.1.	Geral	13
1.2.2.	Específicos	13
2.	**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**	14
2.1.	A Preocupação com o meio Ambiente	14
2.2.	Estações de Tratamento de Esgotos	15
2.3.	Parâmetros operacionais de monitoramento	16
2.4.	Manutenção das Etapas das Lagoas na ETE	17
3.	**MATERIAIS E MÉTODOS**	18
4.	**RESULTADOS**	23
5.	**CONCLUSÃO**	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios em um sistema de tratamento de esgotos é importante que o efluente final esteja de acordo com os padrões de qualidade exigidos pelas regulamentações ambientais nacionais, tendo em vista que, a recuperação e reutilização de recursos são fatores que tendem à diminuição do consumo de matérias-primas, conduzindo a redução de resíduos e à melhoria da eficiência energética (Guerra-Rodríguez *et al*., 2020).

Segundo Niku, Schroeder e Samaniego (1979), ao utilizar a distribuição Log-normal com o objetivo de desenvolver o coeficiente de confiabilidade (CDC), os autores definiram que CDC é um índice que utiliza a concentração média do parâmetro estudado com os padrões de qualidade que devem estar em um nível de confiabilidade de maneira desejada. Segundo Oliveira (2007), reforça a importância de dimensionamentos apropriados, operação eficiente e monitoramento contínuo para aumentar a confiabilidade e a eficácia dos sistemas de tratamento de esgotos.

Os parâmetros de qualidade de um esgoto tratado podem ser avaliados pelo CDC, podendo este ser determinado de acordo com diversos fatores como, por exemplo, a variabilidade dos parâmetros de entrada do sistema de tratamento de esgotos, a eficiência do processo de tratamento, a manutenção adequada dos equipamentos, dentre outros aspectos relevantes (Oliveira, 2007; Michalake, 2016).

Em um sistema de tratamento de esgotos é importante considerar o CDC e monitorar a qualidade do efluente final ao longo de cada período, de forma que possa garantir a conformidade dos parâmetros de lançamento com as regulamentações ambientais (Morais, 2011; Michalake, 2016). Além disso, é sabido que existem variações e incertezas que estão relacionadas ao processo do tratamento de esgotos, como: a variabilidade dos parâmetros de entrada, eficiência do tratamento, manutenção dos equipamentos, questões operacionais, padrões de qualidade variáveis, que acabam interferindo na qualidade do efluente final, por isso a necessidade de um monitoramento regular da qualidade do efluente para garantir que ele esteja dentro dos limites especificados (Monteiro, 2009; Michalake, 2016). Assim, caso sejam detectadas alterações, é preciso tomar medidas corretivas para ajustar o sistema de tratamento de esgotos e garantir que a qualidade do efluente final esteja em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação ambiental.

1.1. Problemática e justificativa

O tratamento adequado dos esgotos é de suma importância para a preservação do meio ambiente e a promoção da saúde pública (Silva & Picanço, 2021). Ao realizar o tratamento dos esgotos, substâncias nocivas e patógenos são eliminadas, caso lançados diretamente no meio ambiente, podem contaminar águas superficiais e subterrâneas, comprometendo a qualidade dos recursos hídricos e colocando em risco a saúde das populações (Cornelli *et al*., 2014).

No Brasil e no mundo, diversos sistemas de tratamento de esgoto são empregados para atender às diferentes necessidades e contextos. Entre os mais utilizados, destacam-se o sistema de tratamento por lagoas de estabilização, o tratamento biológico em reatores anaeróbios e aeróbios, além de tecnologias mais avançadas como os processos de membranas e os sistemas de lodos ativados (von Sperling, 2014).

O processo de tratamento de esgotos geralmente envolve etapas físicas, químicas e biológicas com o objetivo de minimizar o potencial poluidor e contaminante desses resíduos. As estações de tratamento de esgoto são fundamentais para reduzir os poluentes na água e proteger o meio ambiente quando os efluentes são lançados em cursos d'água públicos (Papajová et al., 2022). Os tratamentos de esgotos voltados à preservação ambiental minimizam o risco de transmissão de doenças e melhoram a qualidade geral da água tratada. Essas abordagens ecológicas são especialmente relevantes em regiões com recursos financeiros e tecnológicos limitados para sistemas convencionais de tratamento de esgotos (Bouchaala et al., 2021).

Consequentemente, os tratamentos biológicos de esgotos oferecem uma alternativa importante para reduzir espécies patogênicas, utilizando processos ecológicos e biológicos em vez de métodos químicos. Essas abordagens têm o potencial de melhorar a saúde pública e promover a sustentabilidade ambiental.

Os sistemas de tratamento biológico de esgoto incluem o uso de *wetlands* (áreas úmidas construídas), lagoas de estabilização, filtros biológicos e outras estruturas que imitam ou replicam os processos naturais de depuração da matéria orgânica e remoção de microrganismos patogênicos (Edokpayi et al., 2021;

Arumugam et al., 2023). De acordo com Inglis et al. (2021), o tratamento biológico de águas residuárias resulta na redução significativa de bactérias e vírus indicadores.

Lagoas de estabilização são uma das formas mais econômicas e eficientes para a remoção da matéria orgânica e dos microrganismos patogênicos presentes nos esgotos (Van Haandel; Santos, 2021). Segundo Areerachakul e Kandasamy (2022), essas lagoas representam uma das tecnologias mais eficazes para o tratamento de esgotos, oferecendo operabilidade simples e robusta em comparação com outros sistemas biológicos, além de apresentarem custos acessíveis (Abyar; Nowrouzi, 2020; Rezaei et al., 2019). Diferentemente da biomineração, que possui alto tempo de operação e baixa confiabilidade (Johnson, 2014). As lagoas de estabilização oferecem uma solução mais viável e confiável. Ademais, as lagoas de estabilização se destacam como uma das tecnologias mais empregadas, especialmente em regiões com recursos hídricos limitados, devido à sua eficácia, custo reduzido e fácil operação e manutenção (Recio-Garrido et al., 2018), principalmente por serem projetadas para tratar esgotos de forma natural.

Para o reuso da água proveniente dos esgotos tratados, os critérios de segurança e os riscos associados devem estar de acordo com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006), da Resolução CONAMA Nº 54 de 2005 (CONAMA, 2005), da Resolução CONAMA Nº 357 de 2005 (Brasil, 2011), da Resolução Nº 121 de 2010 (CNRH, 2010), e da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2001). A Resolução Nº 430 de 2011 estabelece diretrizes adicionais para o lançamento de efluentes, complementando e revisando a Resolução CONAMA Nº 357 de 2005.

Análises de confiabilidade são procedimentos essenciais para garantir a eficiência e segurança das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Essas análises consistem na avaliação da capacidade do sistema de tratamento em cumprir suas funções ao longo do tempo, considerando fatores como a variabilidade da carga orgânica e a manutenção adequada dos equipamentos. O Coeficiente de Confiabilidade (CDC) é uma medida que expressa a probabilidade de uma ETE operar dentro dos parâmetros desejados ao longo de um período específico, possibilitando avaliar a confiabilidade da ETE no tratamento de efluentes (Padalkar; Kaur e Kumar, 2018).

A importância das análises de confiabilidade para o monitoramento das ETEs reside na capacidade de identificar potenciais falhas ou deficiências no sistema de tratamento, permitindo a implementação de medidas corretivas e preventivas. Ao garantir a confiabilidade operacional das ETEs, as análises contribuem para a proteção do meio ambiente e a saúde pública, assegurando o cumprimento das legislações ambientais e sanitárias (Padalkar; Kaur e Kumar, 2018). Dessa forma, é importante realizar um estudo de análise da confiabilidade das lagoas de estabilização para garantir que elas estejam funcionando corretamente e atendendo aos padrões de qualidade exigidos. Essa análise avalia a capacidade do sistema de tratamento em lidar com diferentes condições operacionais e situações adversas, garantindo sua eficiência e durabilidade ao longo do tempo.

Aqui estão alguns motivos pelos quais um estudo de análise da confiabilidade das lagoas de estabilização é importante:

- *Eficiência do tratamento*: Este estudo possibilita a avaliação da eficiência do sistema de tratamento, assegurando se as lagoas estão removendo de forma adequada os poluentes presentes no esgoto. Isso é fundamental para garantir que o efluente tratado atenda aos padrões de qualidade ambiental e de saúde pública (Ferri, 2019; Padalkar; Kaur e Kumar, 2018);
- *Dimensionamento adequado*: Auxilia a definir o tamanho adequado das lagoas de estabilização, considerando variáveis como a vazão de efluentes, a carga de poluentes e as condições hidrológicas locais. Isso evita problemas como sobrecarga do sistema e permite um tratamento eficaz dos esgotos ao longo do tempo (von Sperling, 2017).
- *Segurança operacional*: Este aspecto permite a identificação de possíveis falhas ou problemas operacionais que poderiam comprometer o desempenho das lagoas de estabilização. Isso permite a implementação de medidas de segurança e manutenção adequadas para garantir a operação segura e contínua do sistema (Brasil, 2011).
- *Sustentabilidade e durabilidade*: A sustentabilidade e a durabilidade a longo prazo das lagoas de estabilização dependem de medidas adequadas. Identificar possíveis problemas ou limitações do sistema permite implementar melhorias e soluções técnicas que otimizam o desempenho e prolongam a vida útil das lagoas. Algumas dessas medidas incluem monitoramento regular,

manutenção preventiva, controle de vegetação, aeração adequada, remoção de lodo e controle de odores (Brasil, 2011; Padalkar; Kaur e Kumar, 2018).

- *Cumprimento das regulamentações*: Em diversos países, regulamentações e normas específicas regem o tratamento de esgotos. Um estudo de análise da confiabilidade possibilita verificar se as lagoas de estabilização estão em conformidade com essas regulamentações, prevenindo possíveis sanções ou penalidades legais (Brasil, 2011).

Outro motivo do estudo de análise da confiabilidade das lagoas de estabilização, segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2013), para ser eficaz a gestão na utilização de água residuais, se faz necessário um plano de gestão de riscos, no qual passa a garantir a eficácia na reutilização de águas residuárias, que pode ser planejado de acordo com a gestão de riscos. Assim, o CDC pode servir como uma ferramenta para a gestão de riscos, permitindo a avaliação da eficácia do sistema como um todo. Essa abordagem ajuda a identificar fontes perigosas e a implementar medidas de proteção à saúde (Niku; Schroeder e Samaniego,1979).

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta um estudo sobre a confiabilidade de oito ETEs localizadas na cidade de Petrolina, sertão Pernambucano, que utilizam lagoas facultativas e de maturação como unidades de tratamento, com o objetivo de otimizar o desempenho desses sistemas e garantir sua eficiência operacional a longo prazo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Avaliar o desempenho operacional de lagoas facultativas e de maturação que tratam esgotos sanitários, em oito ETEs localizadas na cidade de Petrolina, sertão Pernambucano.

1.2.2. Específicos

- Avaliar eficiência do tratamento de esgoto sanitário de oito estações de tratamento de esgotos (ETEs), ao longo da série histórica entre 2005 e 2014;

- Obter as concentrações desejadas dos constituintes para que as ETEs atendam aos padrões de lançamento, de acordo com as metas estabelecidas;
- Realizar análise de confiabilidade dos dados de estações de tratamento de esgotos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A Preocupação com o Meio Ambiente

Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como um apelo global à erradicação da pobreza e proteção do meio ambiente e do clima. Atualmente, há uma discussão global em torno do sexto ODS - Água potável e saneamento. Isso se deve ao reconhecimento de que o acesso universal à água potável e ao saneamento básico é fundamental para alcançar a sustentabilidade ambiental. (Kuwajima *et al.* 2023).

A preocupação com o meio ambiente é um tema central não apenas nas engenharias civil, sanitária e ambiental, mas todo o mundo. A contaminação dos corpos d'água por esgotos *in natura* ou inadequadamente tratados pode causar danos significativos aos ecossistemas aquáticos, além de comprometer a disponibilidade de água potável e a saúde pública (Rosa; Fraceto, e Moschini-Carlos, 2012). Portanto, a implementação de sistemas de tratamento de esgotos eficientes desempenha um papel crucial na preservação do meio ambiente.

De acordo com Mendonça; Petreca e de Souza (2020), a poluição dos corpos hídricos causada pelo descarte indevido de esgotos domésticos é um dos principais problemas ambientais no Brasil. De acordo com Fragoso (2018), o descarte inadequado de efluentes nos corpos d'água tem gerado graves riscos ambientais e à saúde humana, demandando intervenção por parte do Poder Público. O maior problema é o lançamento desses resíduos *in natura* nos rios, mesmo em locais que possuem rede de coleta de esgotos. Essa situação é frequentemente agravada pelo descarte clandestino de esgoto no sistema pluvial e pelo lançamento de lixo em rios, lagos, lagoas e oceanos.

A degradação ambiental resultante pode causar doenças na população. Existe uma base legal sólida para a proteção do meio ambiente e a regulação do lançamento de efluentes líquidos, que se refere à política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação (Brasil, 1988; Brasil, 2002; Brasil, 1981). Brasil (1998) refere-se as sanções penais e administrativas derivadas das condutas lesivas ao meio ambiente, enquanto Brasil (2010) trata e dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A Resolução CONAMA nº 430/11 (Brasil, 2011) que complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357/2005, que se refere a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências.

2.2. Estações de Tratamento de Esgotos

As Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) são sistemas projetados para receber, tratar e dispor adequadamente os efluentes líquidos provenientes de atividades industriais, comerciais ou domésticas (Oliveira, 2013). Segundo aponta Rosa (2012), os efluentes domésticos possuem poluentes como matéria orgânica e organismos patogênicos, enquanto os efluentes industriais possuem além de matéria orgânica, espécies metálicas e compostos organossintéticos.

A principal função das ETEs é reduzir a carga de poluentes e contaminantes presentes nos efluentes, a fim de minimizar o impacto negativo desses resíduos no meio ambiente, especialmente nos corpos hídricos receptores. Para alcançar esse objetivo, as ETEs empregam diversas etapas de tratamento, incluindo lagoas de estabilização, que desempenham um papel fundamental no processo (ABNT NBR 9800:1987; Brasil, 2011).

Nas ETEs existem diversos tipos de lagoas que são comumente empregadas para depuração e purificação de esgotos. Dentre os tipos mais utilizados estão as lagoas de maturação, lagoas de estabilização e as lagoas facultativas. Cada tipo apresentado desempenha um papel crucial para a remoção de poluentes e na melhoria da qualidade da água tratada (Pereira, 2015).

As lagoas de estabilização, também conhecidas como lagoas de maturação ou lagoas de tratamento, consistem em bacias rasas e longas, projetadas para promover a estabilização biológica e a redução de matéria orgânica e microrganismos

patogênicos presentes nos esgotos (Oliveira, 2013; Wu, 2022). Nessas lagoas, ocorrem processos biológicos, físicos e químicos, nos quais microrganismos presentes naturalmente no esgoto atuam na decomposição da matéria orgânica, transformando-a em compostos mais estáveis e menos poluentes (Oliveira, 2013). Além disso, o processo de maturação contribui para a sedimentação de sólidos, melhorando a qualidade final do efluente tratado.

As lagoas de estabilização são muito utilizadas no mundo, principalmente em áreas com climas quentes, apresentando muitas vantagens como: aplicabilidade no tratamento de esgotos domésticos e industriais; custos relativamente baixos; baixo consumo de energia (von Sperling, 2017). Ademais, esses sistemas de tratamento possuem características como remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e até mesmo patógenos. No entanto, há algumas desvantagens a considerar, como a limitação imposta pelo clima, a necessidade de uma área relativamente ampla para implantação e a possibilidade de emanação de odores desagradáveis (Leonel, 2016).

2.3. Parâmetros operacionais de monitoramento

Os parâmetros operacionais de monitoramento são medidos regularmente em ETEs para avaliar como está o desempenho do processo de tratamento. Essas ações são importantes para garantir que o tratamento do esgoto seja eficaz e o resultado esteja em conformidade com os padrões regulatórios, de modo a proteger o meio ambiente (Brasil, 2011). Segundo Iervolino (2019), as lagoas de estabilização são sistemas que realizam a remoção biológica da matéria orgânica por meio de oxidação bacteriológica, oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia. Deste modo, as lagoas favorecem os metabolismos biológicos de respiração aeróbica, através de bactérias, e a fotossíntese, através de algas. Estes parâmetros só possuem uma relevância quando analisados juntos.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) mede a quantidade de oxigênio necessário para oxidar a matéria orgânica presente no esgoto através de processos químicos. A DQO é um importante indicador da carga orgânica presente no efluente tratado e da eficiência do processo de tratamento (von Sperling, 2017). Uma quantidade pequena de matéria orgânica significa um baixo valor de DQO, que após o tratamento indica uma boa remoção de matéria orgânica, o que é essencial para

evitar o esgotamento do oxigênio nos corpos d'água receptores, o que poderia levar à morte de organismos aquáticos (Leite; Hoffman e Daniel, 2019; Valente, 1997). Por outro lado, a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um dos parâmetros que analisa a quantidade de oxigênio dissolvido necessária para os microrganismos decomporem a matéria orgânica presente no esgoto. A DBO é um indicador da carga orgânica presente no esgoto ou na água (Cetesb, 2016). O DQO e DBO juntos indicam a matéria orgânica presente no efluente tratado (CONAMA, Resolução nº 430, 2011).

Os sólidos suspensos totais (SST) representam a quantidade de partículas solidas em suspensão no efluente, incluindo partículas orgânicas e inorgânicas. Essa medida é um parâmetro relacionado à qualidade do efluente final. Os coliformes termotolerantes são bactérias utilizadas como indicadores da eficiência do tratamento de esgotos, sua presença pode indicar contaminação fecal e consequentemente um potencial risco a saúde pública (Leão, 2018).

No esgoto estão presentes formas orgânicas e fosfatadas de fósforo, o que caracteriza o fósforo total (PT). A remoção do fósforo presente no esgoto é possível através da precipitação de fosfatos, em condições de pH elevado (Martins Júnior *et al.*, 2023).

O Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK), que representa o N-orgânico e o N-amoniacal, é monitorado em ETEs porque seu excesso pode provocar impactos ambientais bastante significativos aos corpos hídricos, sendo importante garantir a qualidade da água e proteger o meio ambiente. A remoção do fósforo e do nitrogênio passa por um processo que é realizado nas lagoas encontradas nas ETEs (Leite, Hoffman e Daniel, 2019).

2.4. Manutenção das Etapas das Lagoas na ETE

Segundo von Sperling (2017), a manutenção adequada do tratamento desempenhado pelas lagoas de estabilização é essencial para garantir funcionamento eficiente e sustentável das ETEs. Isso inclui o monitoramento contínuo dos parâmetros operacionais, como DBO, DQO, SST, Coliformes Termotolerantes (CT), PT e NTK; da remoção regular de sólidos acumulados em decantadores, tanques de sedimentação, reatores biológicos, fossas de acumulação, gradeamento e peneiramento; do controle do nível de água em decantadores e tanques de

sedimentação, lagoas de estabilização, reatores biológicos, fossas de acúmulo de sólidos, entrada de esgoto bruto; e da aplicação de práticas de manejo adequado de resíduos sólidos e lodo, controle de odores, monitoramento e manutenção preventiva, treinamento de pessoal, gestão de produtos químicos, segurança ambiental e de pessoal, conservação de recursos, comunicação e transparência. A falta de manutenção pode levar a problemas como a deterioração da qualidade do efluente tratado, o mau funcionamento do sistema e a redução da vida útil das lagoas (von Sperling, 2017).

Estudos como o de Niku, Schroeder e Samaniego (1979) contribuiu para uma abordagem metodológica para tratar de incertezas no desempenho de estações de tratamento, ajudando a identificar possíveis falhas e medidas corretivas para garantir a proteção dos corpos hídricos. Enquanto, Oliveira e von Sperling (2007) analisaram a confiabilidade de 166 estações de tratamento de esgotos no Brasil, utilizando o CDC para avaliar a probabilidade de atendimento aos padrões de lançamento para diversos parâmetros, como DBO, DQO, SST, NT, PT e CT. Contudo, segundo Michalake; Silva e Silva (2016) em sua pesquisa reafirma a relevância do controle rigoroso dos parâmetros físico-químicos para a melhoria contínua da qualidade do esgoto tratado.

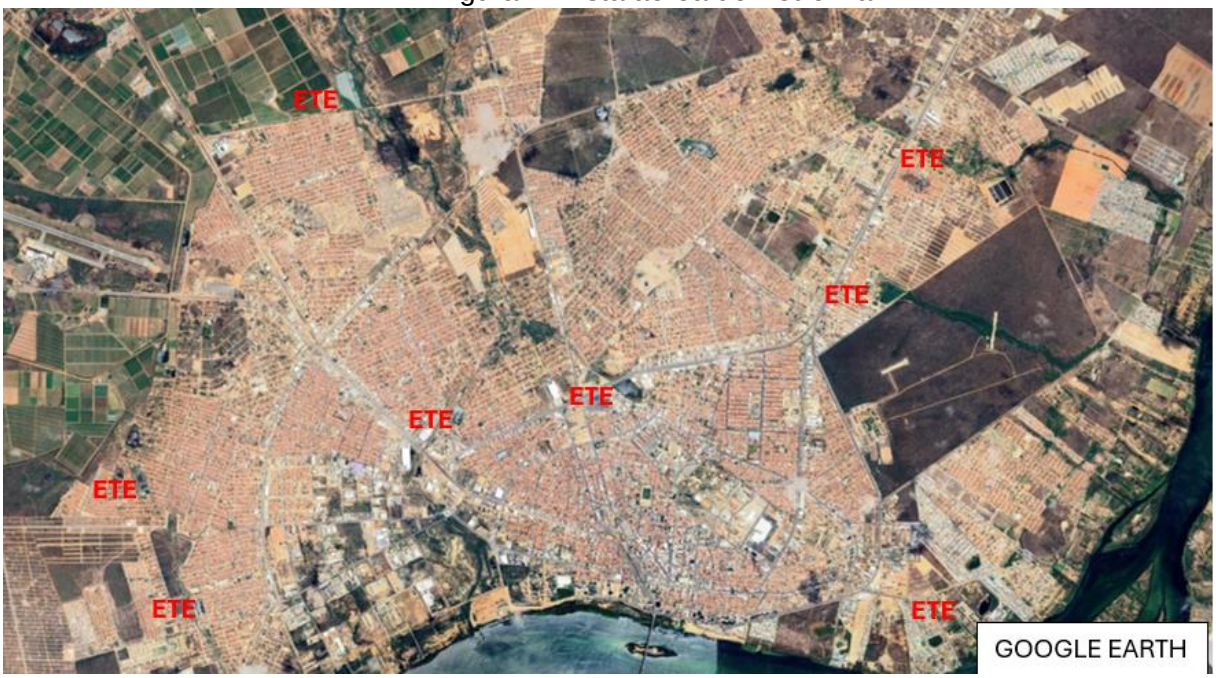
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados ao longo de um período de nove anos e foram extraídos banco de dados da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). As tecnologias de tratamento avaliadas foram os sistemas de lagoas de estabilização operando em oito Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) localizadas na cidade de Petrolina, sertão Pernambucano (Figura 1), caracterizando uma região de clima quente e semiárida que favorece o tratamento por lagoas de estabilização, com chuvas escassas, com altas temperaturas (26ºC a 39°C). Essas ETEs tratam esgotos de origem predominantemente doméstica, sendo o rio São Francisco o corpo receptor desses efluentes tratados.

O clima da região de estudo é classificado como quente e semiárido, do tipo BSH na classificação climática Köppen (1948). A região, em que o município está inserido, apresenta chuvas escassas e irregulares e forte evaporação, um reflexo das

altas temperaturas observadas durante o ano (em torno de 26°C a 39°C). Estas condições climáticas favorecem o tratamento de esgotos por lagoas de estabilização (Iervolino, 2019). Segundo Ali *et al.* (2020) o clima afeta como as lagoas de estabilização irão desempenhar a remoção de resíduos orgânicos e metais pesados, tendo em vista que possuem uma eficiência de tratamento entre 98% e 99%.

Figura 1: Vista aérea de Petrolina.



Fonte: Google Earth (acessado em 06 dez. 2024).

As amostras dos efluentes tratados foram realizadas mensalmente. As determinações dos parâmetros de monitoramento foram feitas nos laboratórios de análises físico-químicas instalados nas ETEs em operação na região de estudo. Essas ETEs, especificamente neste trabalho, foram representadas por suas Lagoas de Estabilização (LE) e enumeradas em sequência de 1 a 8. Na Tabela 1 estão descritos alguns dados operacionais e a configuração do sistema de distribuição das lagoas de estabilização.

Tabela 1-Principais características das estações de tratamento de esgotos.

ETE	**TF ($L.s^{-1}$)**	**População (hab.)**	**Sistema de tratamento de esgotos**
LE1	136,1	38.665	LAGOA FACULTATIVA + LAGOA DE MATURAÇÃO
LE2	23,4	6.648	LAGOA FACULTATIVA + LAGOA DE MATURAÇÃO
LE3	20,0	5.682	LAGOA FACULTATIVA + LAGOA DE MATURAÇÃO

LE4	91,0	25.852	LAGOA FACULTATIVA
LE5	27,0	7.670	LAGOA FACULTATIVA + LAGOA DE MATURAÇÃO
LE6	33,0	9.375	LAGOA FACULTATIVA + LAGOA DE MATURAÇÃO
LE7	67,0	19.034	LAGOA FACULTATIVA
LE8	108,0	30.682	LAGOA FACULTATIVA + LAGOA DE MATURAÇÃO

Nota: TF – Taxa de fluxo. ETE – Estação de Tratamento de Esgotos

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os Coeficientes de Confiabilidade (CDC) foram calculados utilizando a metodologia descrita por Niku *et al*. (1979), com base na conformidade do efluente tratado com o padrão de lançamento (Equação 1). Este método indica um índice mais baixo para uma maior estabilidade e consistência nos dados medidos ao longo do tempo. Quanto mais próximo de zero for o índice de confiabilidade, mais consistentes e previsíveis estarão as medições dos parâmetros de monitoramento do efluente em estudo. Dessa forma, podemos avaliar o desempenho com maior precisão.

$$\text{CDC} = \sqrt{CV^2 + 1}\ .\ \exp\left[-Z_{1-\alpha}\ \sqrt{\ln(CV^2 + 1)}\right] \qquad \text{Equação 1}$$

Em que: CV = coeficiente de variação; $Z_{1-\alpha}$ = variante normal padronizada

Com base nos CDC obtidos, foram determinados os valores de projeto/operação necessários para garantir que o efluente atenda aos padrões de lançamento especificados (Equação 2).

$$\text{CMC} = (\text{CDC}) \times \text{Xs} \qquad \text{Equação 2}$$

Em que: CMC = concentração média do constituinte (mg/L); CDC = coeficiente de confiabilidade; Xs = concentração do efluente conforme especificado pelo padrão de descarga (mg/L)

As legislações dos estados brasileiros que apresentam características legais próprias relacionadas ao lançamento de efluentes em corpos d’água, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2-Legislações estaduais que tratam de lançamento de efluentes domésticos em corpos d'água

Estado	Instrumento legal
Acre	Lei Estadual nº 1.500/03
Alagoas	Decreto Estadual 6.200 de 01/03/85; Instrução Normativa SEMARH nº 1 de 30/05/1018
Amazonas	Lei Estadual nº 2712/01
Ceará	Resolução CONAMA nº 357/2005; Portaria nº 154 de 22/07/02.
Goiás	Resolução nº 9, de 04 de maio de 2005
Mato Grosso do Sul	Deliberação CECA/MS 003 de 20/06/97; Deliberação CECA/MS nº 36, de 27 de junho de 2012
Minas Gerais	Deliberação Normativa COPAM 010/86; Deliberação Normativa COPAM 046/01
Paraíba	Norma Técnica COPAM 301/88
Permanbuco	CPRH n º 2.002 de 21/02/00
Rio de Janeiro	Diretriz 215.R1 de 26/04/94
Rio Grande do Sul	Portaria 05/89 SSMA
Rodônia	Decreto Estadual 7.903 de 01/07/97
Santa Catarina	Decreto Estadual 14.250 de 05/06/81
São Paulo	Decreto Estadual 8468 de 1976

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Inicialmente foram feitas as análises em relação aos parâmetros de estudo: DBO, DQO, SST, NTK, PT, coliformes termotolerantes. No entanto, é importante respeitar a legislação que são aplicadas nas ETEs como as normativas da CONAMA de acordo com a Resolução nº 430/2011, seguindo os padrões para DBO, DQO, SST, principalmente para a determinação da confiabilidade e estabilidade.

Conforme a Tabela 2, para o cálculo do percentual, foram adotadas algumas metas como padrões de lançamento para os constituintes dos efluentes. As metas foram escolhidas conforme os limites preconizados pelas legislações estaduais brasileiras (Tabela 2) e a Organização Mundial da Saúde (WHO,1989).

As metas adotadas nos possibilitam fornecer parâmetros, de acordo com as conformidades ou eficiências em relação as regulamentações. Vejamos no Quadro 1:

Quadro 1: Metas adotadas como padrões de lançamento para os parâmetros estabelecidos

Unidade de tratamento	Constituintes estudados	Meta adotada	Legislações de referência
Lagoa facultativa	DBO total	60 mg/L	Paraíba (1988), Santa Catarina (1981), Minas Gerais (1986)
	DQO total	90 mg/L	Minas Gerais (1986)
	SST	60 mg/L	Minas Gerais (1986)
	Coliformes termotolerantes	$1x10^3$ NMP/100 mL	WHO (1989)
	Fósforo	1 mg/L	Paraíba (1988), Rio de Janeiro (1994), Rio Grande do Sul (1989), Santa Catarina (1981)
	NTK	10 mg/L	Paraíba (1988), Rio de Janeiro (1994), Rio Grande do Sul (1989), Santa Catarina (1981)
Lagoa de maturação	DBO total	60 mg/L	Paraíba (1988), Santa Catarina (1981), Minas Gerais (1986)
	DQO total	90 mg/L	Minas Gerais (1986)
	SST	60 mg/L	Minas Gerais (1986)
	Coliformes termotolerantes	$1x10^3$ NMP/100 mL	WHO (1989)
	Fósforo	1 mg/L	Paraíba (1988), Rio de Janeiro (1994), Rio Grande do Sul (1989), Santa Catarina (1981)
	NTK	10 mg/L	Paraíba (1988), Rio de Janeiro (1994), Rio Grande do Sul (1989), Santa Catarina (1981)

Através das metas adotadas, verificou-se se os valores dos parâmetros de monitoramento das oito ETEs estudadas estavam de acordo com as legislações estaduais para o lançamento de efluentes domésticos em corpos d'água.

As análises de dados foram realizadas através de planilhas eletrônicas. Em seguida, as informações foram analisadas e representadas em gráficos Boxplot. Assim, a abordagem da pesquisa começa com a observação e descrição dos fenômenos apresentados, seguida pela interpretação desses dados para

compreender seu significado. Esse entendimento foi essencial para direcionar a pesquisa de maneira mais eficaz aos objetivos específicos do estudo e assim possibilitar uma visão do que já foi discutido sobre o tema e serviu como base para novas reflexões.

De acordo com Ponce *et al.* (2019), com os parâmetros índices, relacionados com a concentração média de substâncias, é possível avaliar a conformidade com padrões de qualidade ambiental, destacando a importância de manter um nível de confiabilidade desejado nas medições para garantir a precisão das avaliações; isto é importante para monitorar e proteger a qualidade do meio ambiente.

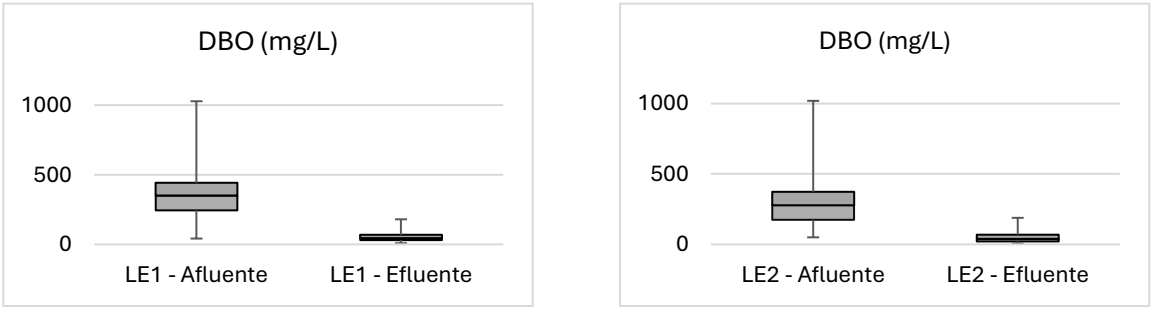
Na discussão dos resultados, foram considerados os padrões estabelecidos pelas regulamentações federais, que inclui as normas do CONAMA 357/05 e CONAMA 430/2011, que estabelecem os padrões de lançamento de efluentes, sendo utilizada como referência em regulamentações do estado de Pernambuco.

4 RESULTADOS

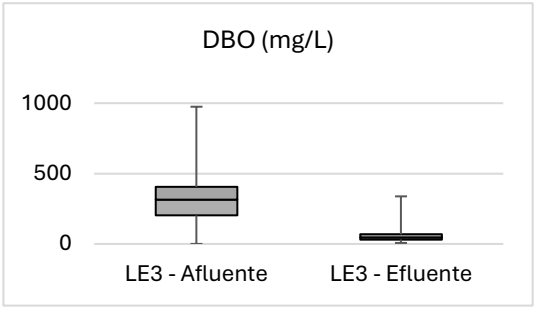
Os resultados apresentados nas Figuras de 2 a 8, com suas respectivas letras a), b), c), d), e) e f), se referem às concentrações afluentes e efluentes dos parâmetros de monitoramento das lagoas de estabilização, assim como suas respectivas eficiências de remoção. Esses resultados foram dispostos nos gráficos de forma comparativa.

Ao Analisar a Amplitude Interquartil (AIQ) dos afluentes, verificou-se que estas foram maiores que a dos efluentes, além de demostrar a mediana maior (Figura 2).

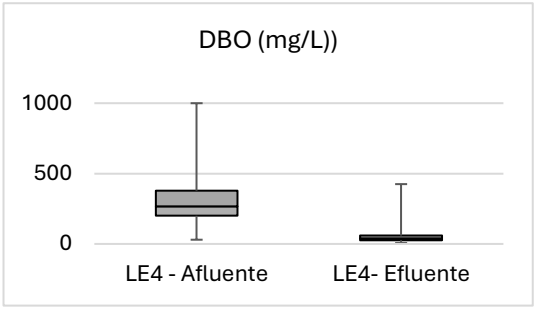
Figura 2. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)



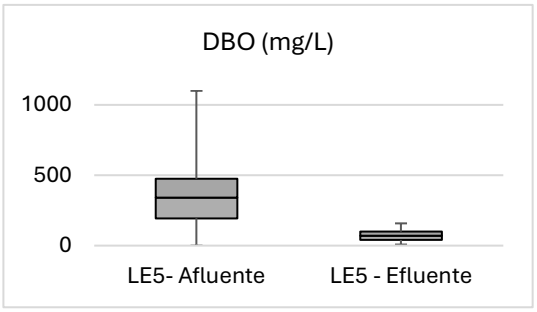
(a) LE1 (b) LE2



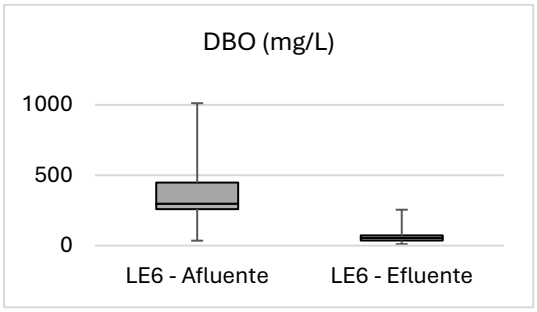
(c) LE3



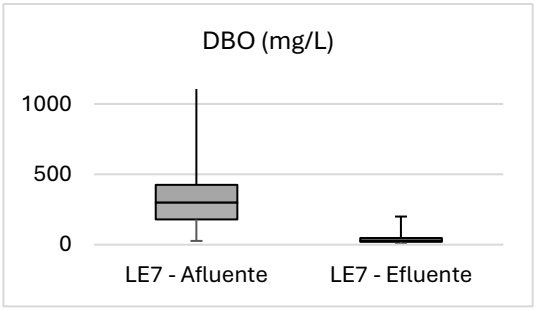
(d) LE4



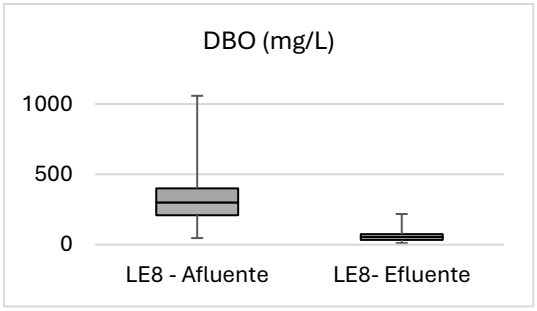
(e) LE5



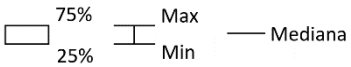
(f) LE6



(g) LE7



(h) LE8



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A concentração das medianas com média de DBO para os afluentes (38 - 145,8 mg/L) e para os efluentes (10,2 – 28,5 mg/L) apresentaram diferenças significativas, tendo em vista que houve uma redução, variando o percentual de remoção da DBO entre 73,16% a 80,45%, indicando uma redução significativa da concentração de DBO após tratamento do afluente. Deste modo, como a AIQ está menor para os efluentes, isso significa que os valores de concentração reduziram significativamente após o processo de tratamento, incluindo a própria mediana para LE3 (14,4 mg/L), LE4 (14,9 mg/L) e LE7 (10,2 mg/L). A mediana do LE6 (19,5 mg/L) para o efluente coincide com o limite superior.

Ao compararmos com a meta estabelecida de 60 mg/L, percebemos que se encontra abaixo do valor estabelecido, com média da mediana em todas as ETES de 17,61 (mg/L), caracterizando redução significativa do DBO (Paraíba, 1988; Santa Catarina, 1981; Minas Gerais, 1986). Percebe-se que os valores de DBO ficaram abaixo da meta adotada (Quadro 1), indicando uma boa qualidade da água em termos de poluição orgânica, o que é desejável para reduzir a contaminação do rio.

Na Tabela 3, apresenta dados de DBO em diferentes locais de amostragem, indicados para as oito ETEs, assim as medidas indicam a quantidade de oxigênio consumida pelos microrganismos durante a degradação da matéria orgânica no efluente, quanto maior o DBO, maior será a quantidade de poluentes orgânicos.

Tabela 3-Amostragem para DBO (mg/L)

DBO (mg/L)								
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA	54,95	55,24	59,32	54,22	68,60	59,79	43,05	62,98
DESVIO PADRÃO	34,55	47,15	49,91	59,47	38,33	39,85	36,89	43,06
CV	0,63	0,85	0,84	1,10	0,56	0,67	0,86	0,68
MÁXIMO	180,0	188,5	338,0	425,0	158,0	255,0	200,0	218,0
MÍNIMO	8,60	6,00	7,00	6,52	7,50	10,58	5,50	11,00

Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A média para DBO (Tabela 3) variam entre 43,05 mg/L (LE7) e 68,60 mg/L (LE5), indica que os locais apresentam níveis distintos de poluição orgânica. Na LE5 possui a maior média, sugere uma maior carga de matéria orgânica.

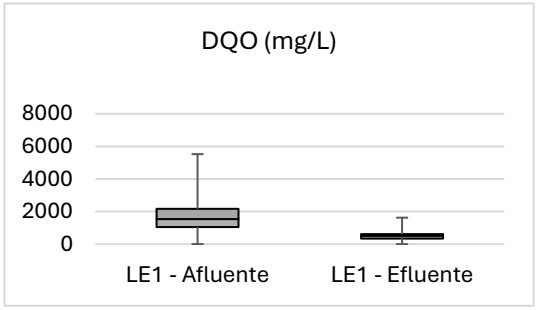
A análise do desvio padrão indica o grau de dispersão dos dados em relação à média. Na Tabela 3, os desvios padrão variam de 36,89 mg/L (LE7) a 59,47 mg/L (LE4). Locais com desvio padrão mais elevado, como o LE4, apresentam maior variação nas medições, possivelmente devido a fontes intermitentes de poluição.

Na mesma tabela, o coeficiente de variação (CV) é apresentado como a relação entre o desvio padrão e a média, expressando a dispersão dos dados em termos percentuais. Os CVs variam de 0,56 (LE5) a 1,10 (LE4). Um CV mais baixo, como em LE5, indica medições de DBO mais consistentes, enquanto um CV mais alto, como em LE4, reflete maior instabilidade nos resultados.

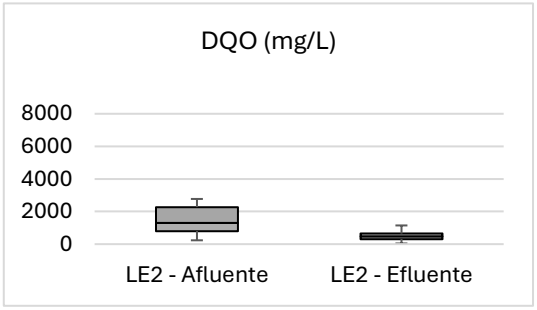
O valor máximo corresponde à maior DBO registrada em cada ponto de amostragem. O pico mais elevado foi de 425,0 mg/L em LE4, enquanto o menor valor máximo foi de 158,0 mg/L em LE5, indicando que o ponto LE4 apresentou um episódio de poluição orgânica significativa. Por outro lado, o valor mínimo refere-se à menor DBO registrada em cada ponto de amostragem, variando entre 5,50 mg/L (LE7) e 11,00 mg/L (LE8). Esses valores baixos sugerem que, em determinados momentos, a carga de matéria orgânica foi relativamente baixa nesses locais. De acordo com Oliveira (2007), apesar da ampla variação entre os valores máximos e mínimos, essa oscilação não interfere de forma significativa no desempenho geral das ETEs.

Ao analisar as AIQs dos afluentes para o DQO, observou-se que estas foram maiores quando comparadas com as IAQs dos efluentes, além de demostrar a mediana maior. Isto indica que as concentrações de DQO reduziram após o tratamento do esgoto (Figura 3).

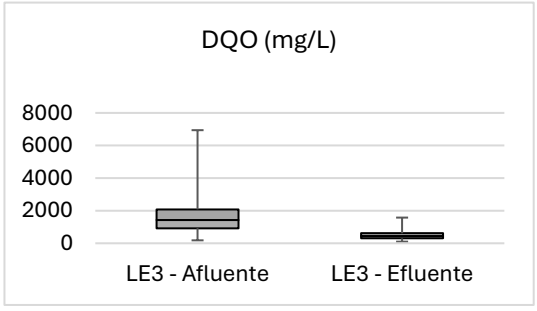
Figura 3. Demanda Química de Oxigênio (DQO)



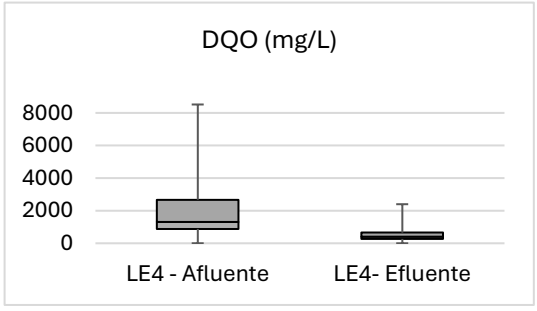
(a) LE1



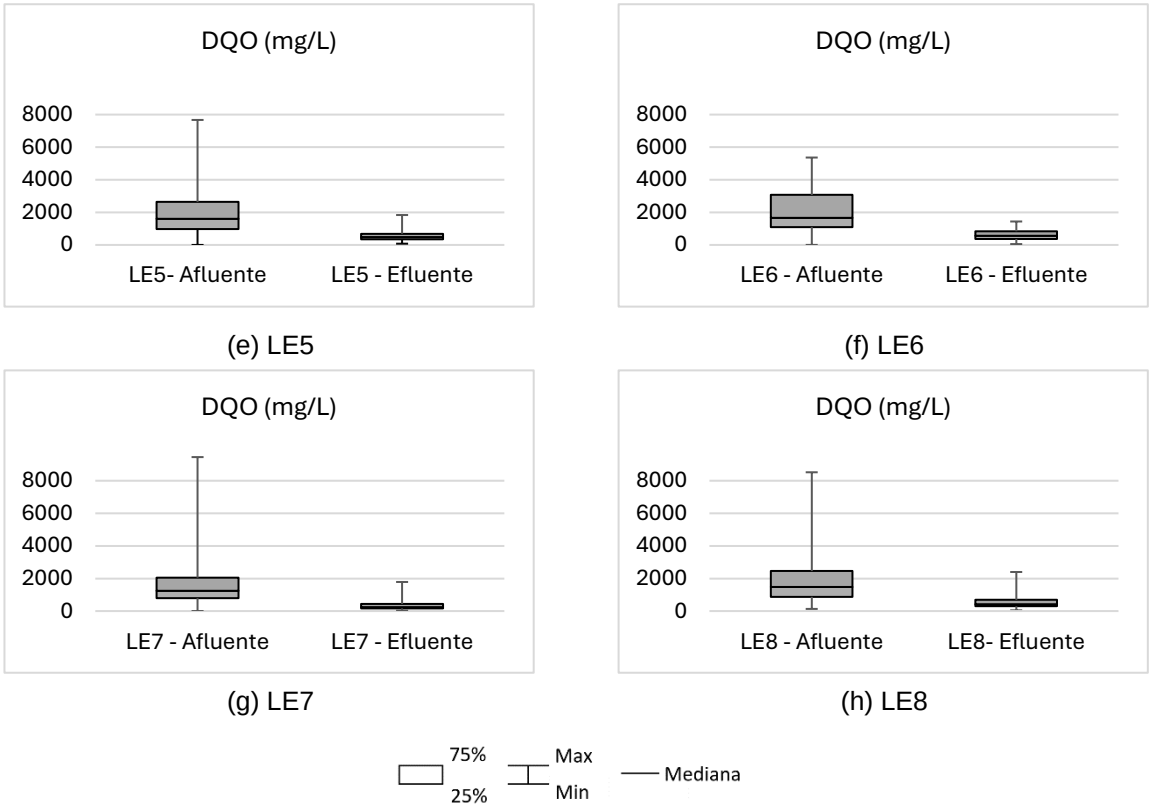
(b) LE2



(c) LE3



(d) LE4



(e) LE5 (f) LE6

(g) LE7 (h) LE8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Deste modo, como a AIQ está menor para os efluentes, isso significa que os valores de concentração reduziram significativamente após o processo de tratamento, incluindo a própria mediana para LE5, LE7 e LE8. A mediana do LE1 se apresenta próxima ao terceiro quartil, indica uma assimetria negativa na distribuição. Apesar da redução do DQO, apenas a LE7 está mais próxima da meta adotada como padrão de lançamento para os parâmetros estabelecidos (Quadro 1), com mediana de 83,5 mg/L (Minas Gerais, 1986).

Ao analisar as Figuras 2 e 3, percebe-se que as lagoas de estabilização apresentaram uma boa eficiência na remoção da matéria orgânica. Ao observar a razão DBO/DQO, é possível analisar a fração biodegradável, cuja média, para os afluentes, variou de 0,07 – 0,26 mg/L, indicando que a fração não foi muito elevada, e para os efluentes, de 0,08 – 0,22 mg/L, é possível avaliar que esse intervalo foi mais baixo, após o tratamento, indicando que a matéria orgânica residual nos efluentes é ainda menos biodegradável do que nos afluentes. Sendo uma situação esperada, pois no processo de tratamento espera-se a remoção da matéria orgânica, ficando uma fração residual de composto complexos e mais difíceis de degradar.

Segundo a Resolução CONAMA nº430/2011, as condições de lançamento de efluentes devem apresentar temperaturas inferior a 40ºC, com variação que não deve exceder a 3ºC no limite da zona de mistura. Desta maneira, é possível visar a preservação do ecossistema aquático e assegurar a integridade ambiental.

Na Tabela 4, são apresentados os dados de DQO para diferentes locais de amostragem em oito ETEs. Esse parâmetro indica a quantidade de matéria orgânica presente na água passível de oxidação por processos químicos. Trata-se de uma medida fundamental para avaliar o nível de poluição por compostos orgânicos e a eficiência do tratamento de efluentes.

Tabela 4-Amostragem para DQO (mg/L)

DQO (mg/L)								
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA	530,95	511,65	505,51	500,50	597,58	649,70	368,25	556,11
DESVIO PADRÃO	278,41	263,18	294,04	385,76	388,37	363,29	348,30	427,60
CV	0,52	0,51	0,58	0,77	0,65	0,56	0,95	0,77
MÁXIMO	1623	1350	1577	2398	1836	1440	1786	2398
MÍNIMO	0	41,3	100	0	77	53	26	47

Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A média para DQO (Tabela 4) indica o valor médio em cada ponto de amostragem. Esse valor informa a carga média de matéria orgânica presente na água. As médias variam entre 368,25 mg/L (LE7) e 649,70 mg/L (LE6). No ponto LE6 apresenta a maior média de DQO, o que sugere uma carga elevada de poluentes orgânicos nesse local. Já no LE7 possui a menor média, indicando uma poluição menor.

No desvio padrão apresenta o quanto os valores de DQO que variam em relação à média. O desvio padrão varia de 263,18 mg/L (LE2) a 427,60 mg/L (LE8), o mais elevado, observado em LE8, indica maior variação nas medições, o que pode sugerir fontes de poluição intermitentes ou irregulares. Já um desvio padrão mais baixo, como em LE2, indica que os valores são mais consistentes e próximos da média.

Os CVs para DQO, variam de 0,51 (LE2) a 0,95 (LE7). O CV mais baixo, como em LE2, indica maior estabilidade nas medições. Enquanto que, para o CV mais alto, como em LE7, sugere que as medições foram mais dispersas e menos consistentes.

O valor máximo corresponde à maior concentração de DQO registrada em cada ponto de amostragem. O pico mais elevado foi de 2398 mg/L, observado em LE4 e LE8, indicando possíveis episódios de poluição significativa nesses pontos. O menor valor máximo foi de 1350 mg/L em LE2. Já o valor mínimo representa a menor concentração de DQO registrada em cada ponto de amostragem, variando de 0 mg/L (LE1, LE4 e LE5) a 100 mg/L (LE3). Concentrações de 0 mg/L podem indicar ausência de carga orgânica significativa em determinados momentos ou possíveis erros na coleta ou medição.

De forma simples, ao comparar as concentrações de DQO com as de DBO, podem ser feitas as seguintes observações:

- Quando DQO ≥ DBO, há indicativo da presença de poluentes não biodegradáveis.
- Quando a DQO se aproxima da DBO, sugere-se que a maior parte da matéria orgânica presente é biodegradável.

Ao analisar as Tabelas 3 e 4, observa-se que a DQO (Tabela 3) mede toda a matéria orgânica suscetível à oxidação (biodegradável e não biodegradável), enquanto a DBO (Tabela 4) mede apenas a fração biodegradável, decomposta por microrganismos. A Tabela 5 apresenta a relação DQO/DBO, que varia entre 8,5 mg/L e 10,9 mg/L, indicando maior presença de matéria orgânica total (DQO) em relação à matéria orgânica biodegradável (DBO). O valor mais elevado foi registrado em LE6, com uma relação de 10,9 mg/L, sugerindo a presença de uma quantidade significativa de materiais não biodegradáveis, como compostos sintéticos, plásticos, detergentes ou resíduos industriais.

Na análise do desvio padrão, a DQO apresentou, em geral, valores mais altos do que a DBO, refletindo uma maior variação nas medições. Isso é esperado, pois a DQO é influenciada por uma gama mais ampla de compostos, incluindo os não biodegradáveis, que podem ser lançados de forma intermitente.

Tabela 5-Comparação das médias de DQO (mg/L) e DBO (mg/L)

LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA DBO (mg/L)	54,95	55,24	59,32	54,22	68,60	59,79	43,05	62,98
MÉDIA DQO (mg/L)	530,95	511,65	505,51	500,50	597,58	649,70	368,25	556,11
RELAÇÃO DQO/DBO	9,7	9,3	8,5	9,2	8,7	10,9	8,6	8,8

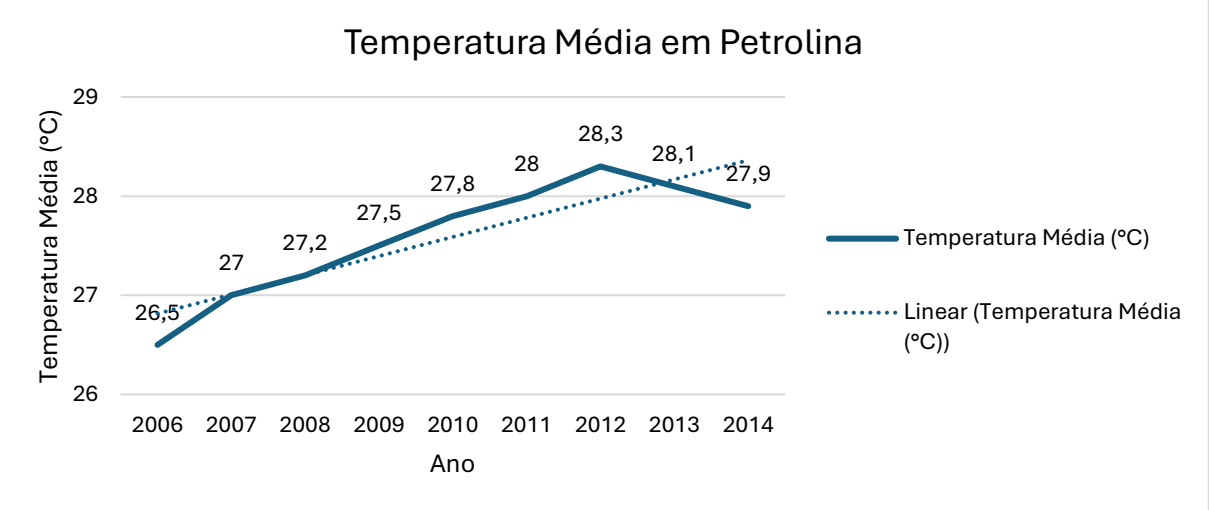
Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De modo geral, nas ETEs LE6 e LE8, onde a relação DQO/DBO é mais alta, há maior presença de poluentes não biodegradáveis. Isso pode indicar a descarga de resíduos industriais ou esgoto sem tratamento adequado. Locais onde a relação é mais baixa, como LE3 e LE7, têm poluentes mais biodegradáveis, que podem ser tratados biologicamente de forma mais eficiente.

Na Figura 4, observa-se que a temperatura média variou de 26,5ºC a 28,3ºC. Apesar de não apresentar uma variação média acima de 1,0°C, os anos mais quentes como o ano 7 e ano 8, podem caracterizar maior atividade biológica, mas com potencial para problemas como baixa oxigenação devido ao calor.

Figura 4. Temperatura média em Petrolina-PE no período de nove anos.



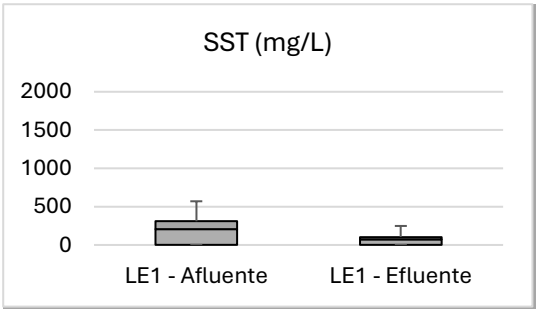
Fonte: APAC (2024)

Ao considerar o ano 7, cuja temperatura média anual foi 28,3ºC, mesmo com o aumento de temperatura, as eficiências de remoção das lagoas não foram afetadas (Figura 2). Segundo Iervolino (2019), temperaturas mais elevadas resultam em maior

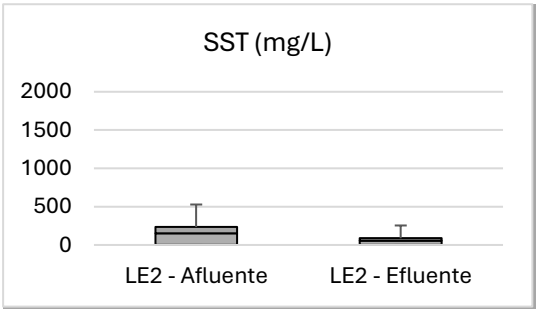
evaporação, menor oxigenação e um aumento na proliferação de algas. Esses fatores podem causar desequilíbrios, como a formação de odores ou o acúmulo de matéria orgânica não decomposta.

Ao Analisar as Amplitudes Interquartis (AIQs) dos afluentes para o SST, estas se apresentaram maiores que as IAQs dos efluentes. No entanto, os valores das diferenças da mediana, entre afluente e efluente, foram próximos, indicando que não houve redução significativa da quantidade de SST, após o tratamento do esgoto (Figura 5). Contudo, as AIQs foram menores para os efluentes. Isso significa que os valores coincidem com o limite inferior, incluindo a própria mediana para LE7. A mediana do LE1, LE2 e LE3 coincidiram com o limite superior (Figura 5).

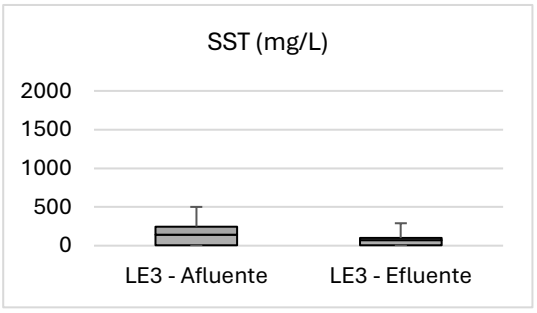
Figura 5. Sólidos Suspensos Totais (mg/L)



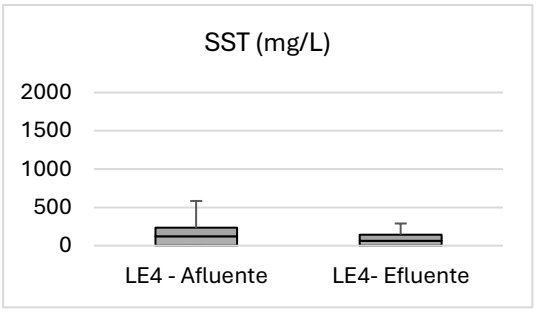
(a) LE1



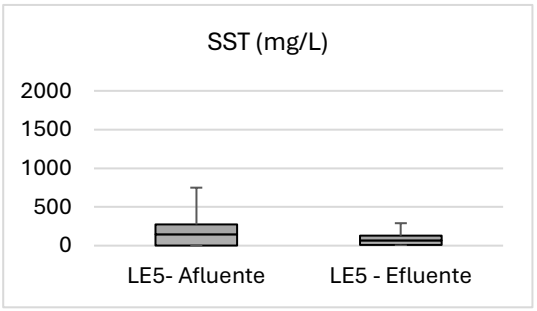
(b) LE2



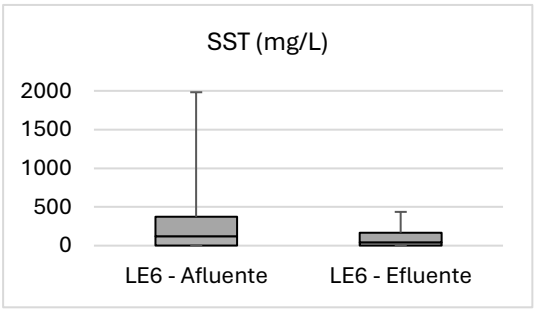
(c) LE3



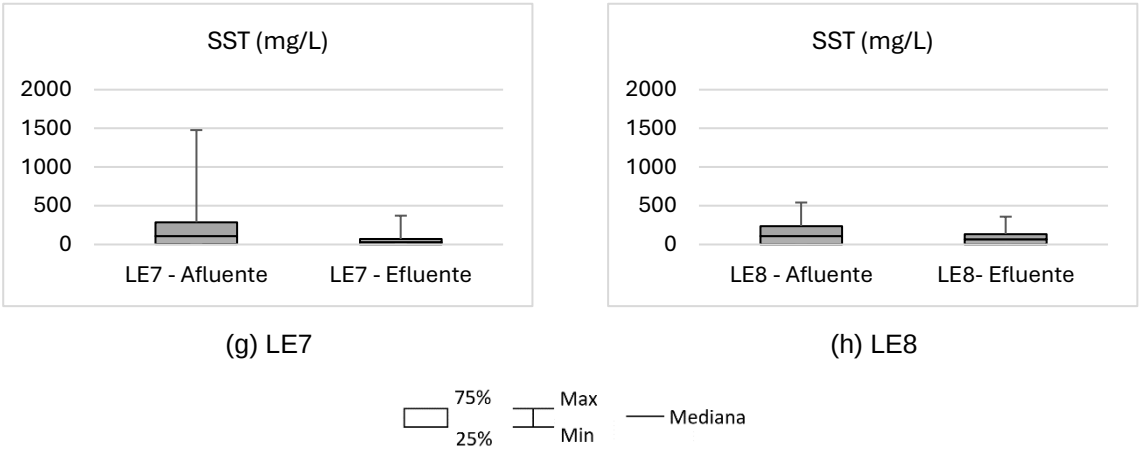
(d) LE4



(e) LE5



(f) LE6



(g) LE7 (h) LE8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com relação aos Sólidos Suspensos Totais (SST) do afluente e efluente (Figura 5), é bem evidente que as concentrações de SST nas LE2 (57 mg/L), LE3 (63 mg/L), LE4 (65 mg/L), LE5 (59 mg/L) e LE8 (67 mg/L) ficaram próximas a meta estipulada de 60 mg/L (Minas Gerais, 1986). Neste caso, como as concentrações de SST em LE3, LE4 e LE8 ficaram acima do valor da meta, a quantidade de partículas solidas em suspensão foram maiores do que o desejado, indicando baixa qualidade. As concentrações em LE6 (41 mg/L) e LE7 (29 mg/L) se destacaram com valores abaixo da meta, o que significa que a quantidade de partículas sólidas em suspensão foi menor, sendo um indicador positivo de boa qualidade.

Na Tabela 6, são apresentadas as concentrações de SST em diferentes pontos de amostragem das oito ETEs. Esse parâmetro mede a quantidade de partículas sólidas suspensas na água e é fundamental para avaliar a turbidez da água e a eficácia dos processos de tratamento.

Tabela 6-Amostragem para SST (mg/L)

SST (mg/L)								
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA	71,90	58,11	82,06	72,68	66,92	94,63	46,69	70,52
DESVIO PADRÃO	60,99	59,24	78,34	81,24	66,16	119,21	61,92	81,49
CV	0,85	1,02	0,95	1,12	0,99	1,26	1,33	1,16
MÁXIMO	248	254	290	290	290	436	372	359
MÍNIMO	0,021	0,004	0,006	0,069	0,004	0,078	0,010	0,084

Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A média para SST (Tabela 6) indica o valor médio em cada ponto de amostragem. As médias variam de 46,69 mg/L (LE7) a 94,63 mg/L (LE6). LE6 apresentou a maior média, indicando uma alta concentração de SST nesse local, o que pode aumentar a turbidez da água e comprometer a qualidade. Já LE7 apresentou a menor média, sugerindo uma água mais limpa em relação a presença de sólidos.

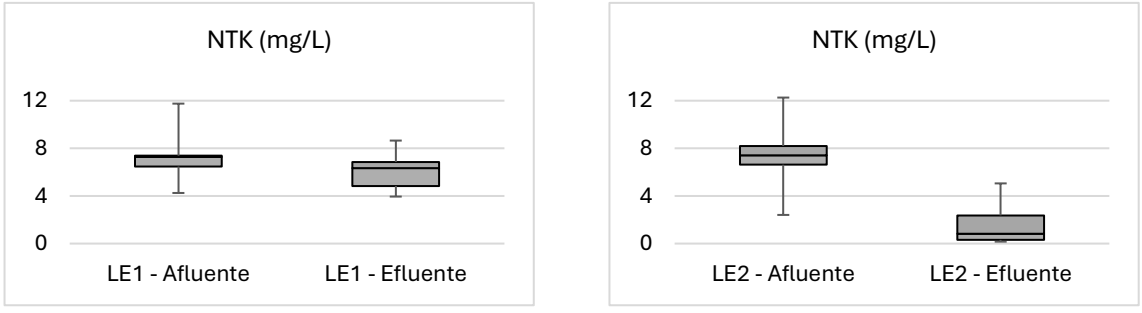
Ao analisar o desvio padrão, o menor valor foi de 59,24 mg/L, em LE2, e o mais alto foi de 119,21 mg/L, em LE6. Um desvio padrão mais alto indica grande variação nos valores, o que pode sugerir fontes intermitentes de poluição, enquanto um desvio padrão mais baixo, indica que os valores de SST foram mais consistentes.

Os Coeficientes de Variação (CVs) para SST variaram de 0,85 (LE1) a 1,33 (LE7). O ponto LE7 apresentou o maior CV, indicando que os valores de SST nesse local são mais dispersos em relação à média. Por outro lado, LE1 apresentou o menor CV, indicando maior consistência nos valores.

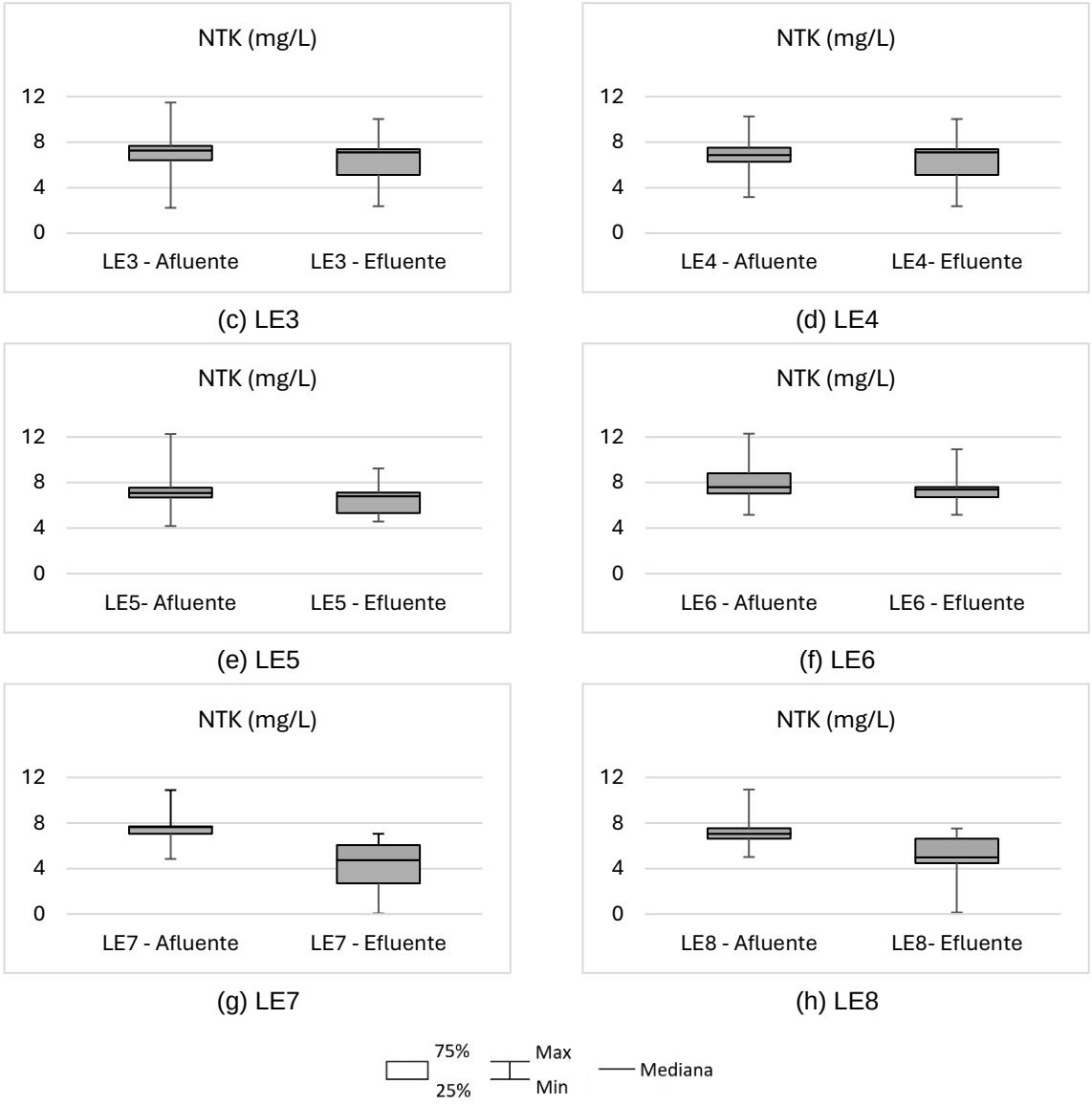
O valor máximo é a maior concentração de SST registrada em cada ponto de amostragem. Os valores máximos variaram entre 248 mg/L e 372 mg/L, o máximo mais alto foi de 436 mg/L em LE6, o que confirma que este ponto tem os maiores picos de sólidos suspensos. O valor mínimo é a menor concentração de SST registrada em cada ponto de amostragem, o mais baixo foi de 0,004 mg/L em LE2, enquanto o mais alto foi de 0,084 mg/L em LE8. Valores mínimos baixos indicam que, em alguns momentos, a água esteve relativamente limpa em termos de sólidos suspensos.

Na Figura 6 são apresentadas as concentrações de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) para o afluente e efluente das ETEs estudadas. É possível perceber que as ETEs representadas pelas lagoas de estabilização LE2, LE7 e LE8 tiveram eficiência de remoção de 77%, 42% e 35%, respectivamente, as quais foram consideradas as maiores eficiências de remoção, já as ademais apresentaram eficiência menor que 20%.

Figura 6. Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)



(a) LE1 (b) LE2



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao analisar as AIQs dos afluentes em relação ao NTK, observa-se que somente o LE6 possui uma AIQ maior do que a do efluente. Isso indica que a variação diminuiu após o tratamento, embora as medianas estivessem próximas, sendo 0,57 mg/L para o afluente e 0,67 mg/L para o efluente. É notável que as AIQs dos efluentes foram maiores para LE1 (1,5 mg/L), LE3 (1,98 mg/L), LE4 (1,98 mg/L), LE5 (1,49 mg/L) e LE7 (2,04 mg/L), o que sugere uma variação mais ampla. No entanto, ao considerar as medianas para LE3, LE4 e LE5, fica claro que o tratamento não contribuiu para a redução do NTK.

As medianas dos efluentes para LE2 (0,50 mg/L) e LE7 (0,51 mg/L) revelam uma semelhança na concentração de NTK entre essas ETEs. No entanto, ao

considerar a meta de 10 mg/L, todas as ETEs demonstram valores excelentes para esse parâmetro (Paraíba, 1988; Rio de Janeiro, 1994; Rio Grande do Sul, 1989; Santa Catarina, 1981).

Na Tabela 7 encontram-se os dados de NTK em diferentes pontos de amostragem, indicados para as oito ETEs. O NTK mede a quantidade de nitrogênio orgânico e amônia na água. Esse parâmetro é importante para indicar a poluição por matéria orgânica e presença de resíduos nitrogenados.

Tabela 7-Amostragem para NTK (mg/L)

NTK (mg/L)								
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA	5,97	1,55	6,45	6,43	6,47	7,39	4,27	5,05
DESVIO PADRÃO	1,20	1,44	1,61	1,04	1,79	1,25	2,11	2,11
CV	0,20	0,93	0,25	0,16	0,28	0,17	0,49	0,42
MÁXIMO	8,65	5,06	10,03	9,24	10,54	10,93	7,05	7,52
MÍNIMO	3,95	0,13	2,37	4,58	0,21	5,17	0,06	0,13

Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A média para o NTK (Tabela 7) indica o valor médio em cada ponto de amostragem. As medias variaram de 1,55 mg/L (LE2) a 7,39 mg/L (LE6). Em LE6 observou-se a maior média, sugerindo que há uma alta concentração de nitrogênio nesse local, o que pode indicar poluição por esgoto doméstico, efluentes industriais ou resíduos agrícolas. Já a LE2 apresentou a menor média, indicando uma água relativamente mais limpa em relação à carga nitrogenada.

Ao analisar o desvio padrão, o mais baixo foi 1,04 mg/L, em LE4, indicando que os valores de NTK nesse ponto foram mais consistentes. Assim, o valor mais alto de desvio padrão foi 2,11 mg/L, registrado em LE7 e LE8. Este resultado mostra que os valores nesses locais são mais dispersos, sugerindo fontes variáveis de poluição.

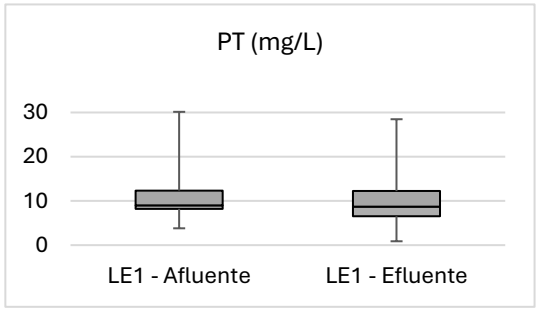
Os CVs para NTK que apresentaram os menores valores foram: 0,16, em LE4, e 0,17, em LE6. Isto indica que os valores nesses locais são mais uniformes e previsíveis. Enquanto que o maior CV foi 0,93, em LE2, sugerindo que a variação dos dados é alta em relação à média.

O valor máximo é a maior concentração de NTK registrada em cada ponto de amostragem. O maior valor máximo foi de 10,93 mg/L, observado em LE6, reforçando

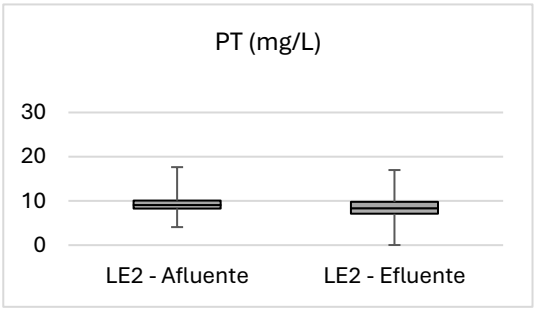
a hipótese de que esse local tem uma alta carga de poluição nitrogenada. Enquanto o menor valor máximo foi 5,06 mg/L, em LE2, indicando menor impacto de fontes nitrogenadas. O valor mínimo é a menor concentração de NTK registrada em cada ponto de amostragem, o menor valor mínimo foi 0,06 mg/L, em LE7, indicando que a água, em alguns momentos, esteve quase livre de nitrogênio. E o maior valor mínimo foi 5,17 mg/L, em LE6, mostrando que, mesmo nos melhores momentos, a concentração de NTK foi elevada.

Em relação às concentrações de fósforo total (PT), observa-se que as eficiências de remoção foram baixas, sugerindo que as lagoas de estabilização estudadas não foram eficazes na remoção de fósforo (Figura 7).

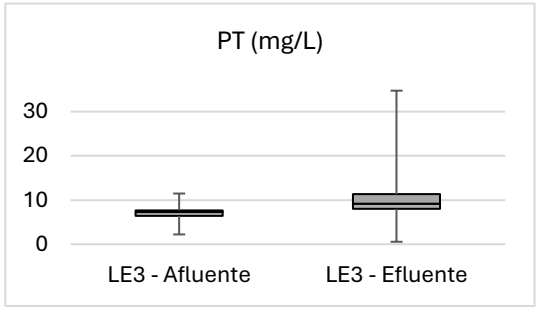
Figura 7. Fósforo Total (mg/L)



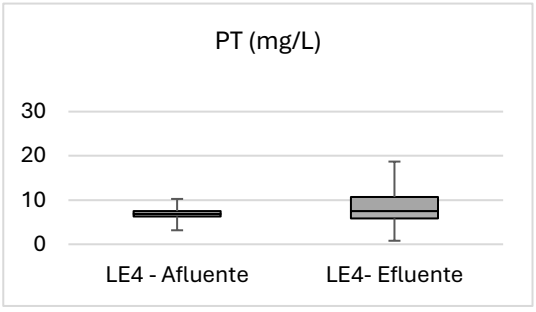
(a) LE1



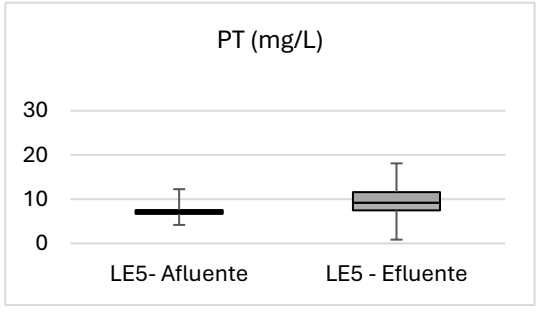
(b) LE2



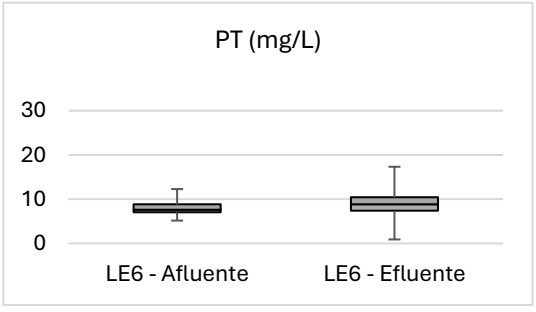
(c) LE3



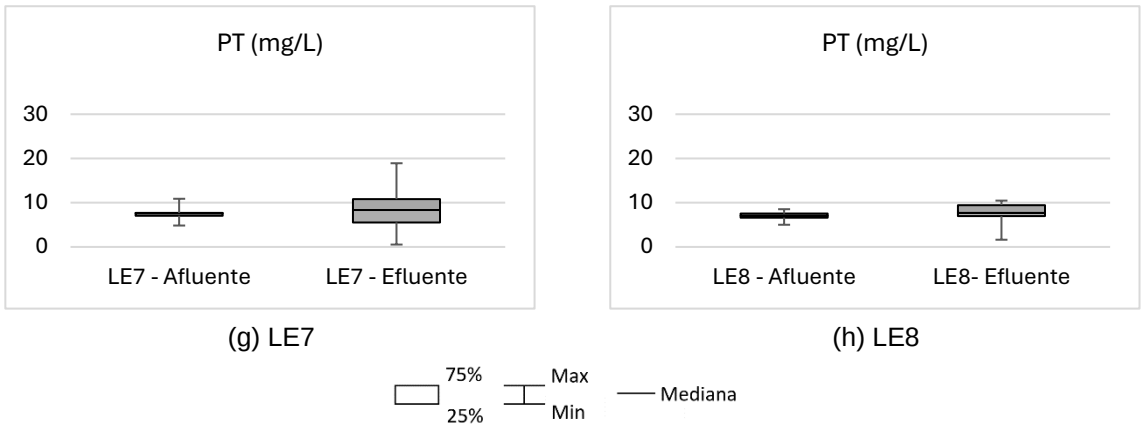
(d) LE4



(e) LE5



(f) LE6



(g) LE7 (h) LE8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A remoção de fósforo total (PT) ocorre em valores elevados de pH, geralmente em torno de 8, propiciando a formação e precipitação de sais de fósforo (Metcalf & Eddy, 2016). Portanto, é fundamental considerar as condições operacionais específicas das lagoas de estabilização no que se refere à remoção de nutrientes, como o fósforo, avaliando a necessidade de ajustes nas práticas operacionais ou a adoção de alternativas de tratamento para garantir a conformidade com os requisitos ambientais e normas específicas (Paraíba, 1988; Rio de Janeiro, 1994; Rio Grande do Sul, 1989; Santa Catarina, 1981).

Nas lagoas de estabilização, o pH é importante para determinar se as reações químicas e biológicas estão favorecendo a decomposição da matéria orgânica. Apesar das condições operacionais serem semelhantes nas lagoas, a variabilidade do pH influencia o funcionamento do sistema. O fósforo por sua vez pode ser encontrado em formas dissolvidas ou em partículas ligadas a sólidos em suspensão. O pH no sistema (Tabela 8) impacta a forma e a disponibilidade do fósforo, influenciando a sua remoção ou acumulação.

Tabela 8-Valores de pH dos afluentes e dos efluentes das lagoas de estabilização.

	pH							
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
AFLUENTE	7,11	7,21	7,02	7,06	6,60	7,15	7,19	7,10
EFLUENTE	7,68	8,30	7,67	7,44	7,49	7,61	7,86	7,94

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao analisar as AIQs dos efluentes das lagoas LE1, LE2, LE3, LE4, LE5, LE6, LE7 e LE8 para o PT, verificou-se que os maiores valores foram observados nos afluentes, indicando uma maior variação após o tratamento e um aumento da quantidade de PT em mg/L. Nas lagoas LE3 e LE7, as AIQs dos afluentes foram menores, o que significa que houve menos variação, e suas medianas coincidiram com os limites superiores. Para LE5 (0,41 mg/L) e LE8 (0,42 mg/L), os limites superior e inferior da mediana se encontravam sobrepostos, indicando pouca variação na representação de seus valores.

Apesar das condições de operações serem semelhantes, por se tratar de lagoas de estabilização, o desempenho na remoção de fósforo total pode ter sido impactado pelo pH inferior a 8, uma vez que essa faixa de pH reduz a eficiência dos processos de precipitação química e assimilação biológica. O pH do sistema impacta a forma e a disponibilidade do fósforo, interferindo na sua remoção ou acumulação. Na Figura 7, a representação do terceiro quartil aumentou para todos os efluentes, conforme o pH se aproxima de 8 (Tabela 3), indicando que os valores superiores do conjunto estão mais altos ao ser comparado com os afluentes, com o pH próximos de 7. Assim, podemos afirmar que este comportamento pode ocorrer por causa da variação nos valores do pH que passa a elevar a concentração de dados na região superior (acima da mediana), assim aumentando a dispersão dos dados no intervalo interquartílico, entre o quartil 1 e 3.

Segundo Abdoli et al. (2024), embora o processo de remoção de PT no tratamento de efluentes seja, em sua maioria eficiente e confiável, há situações em que ele não atinge o sucesso esperado. Essa insatisfação na remoção de PT pode ocorrer devido a uma série de limitações operacionais, químicas ou biológicas. Neste caso, necessitando de etapas adicionais de processamento para lidar com os subprodutos gerados durante o tratamento. Já para Cornel & Schaum (2009), para ter sucesso na remoção de PT, possa ser que haja a necessidade de ajustes químicos antes mesmo do lançamento dos efluentes.

Na Tabela 9, podem ser observados os valores de PT em diferentes pontos de amostragem, indicados para as oito ETEs, este parâmetro mede o fósforo total nas lagoas de estabilização.

Tabela 9-Amostragem para PT (mg/L)

PT (mg/L)								
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA	9,63	8,46	9,81	7,29	8,85	8,22	7,66	7,86
DESVIO PADRÃO	4,97	3,12	4,33	3,08	2,57	2,61	4,03	2,37
CV	0,52	0,37	0,44	0,42	0,29	0,32	0,53	0,30
MÁXIMO	28,47	16,98	34,73	18,7	18,10	17,33	18,92	17,83
MÍNIMO	0,88	0,02	0,57	0,8	0,86	0,9	0,53	1,63

Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A média para o PT (Tabela 9) indica o valor médio em cada ponto de amostragem. As medias variam de 7,29 mg/L (LE4) a 9,81 mg/L (LE3). LE3 apresentou a maior média, indicando que há uma carga significativa de fósforo nesse ponto. A menor média foi registrada em LE4, sugerindo uma menor influência de fontes externas de fósforo.

Ao analisar o desvio padrão, o mais alto foi 4,97 mg/L em LE1, mostrando uma grande dispersão nos dados desse ponto. O desvio padrão mais baixo foi 2,37 mg/L em LE8, indicando que os valores nesse local são mais consistentes.

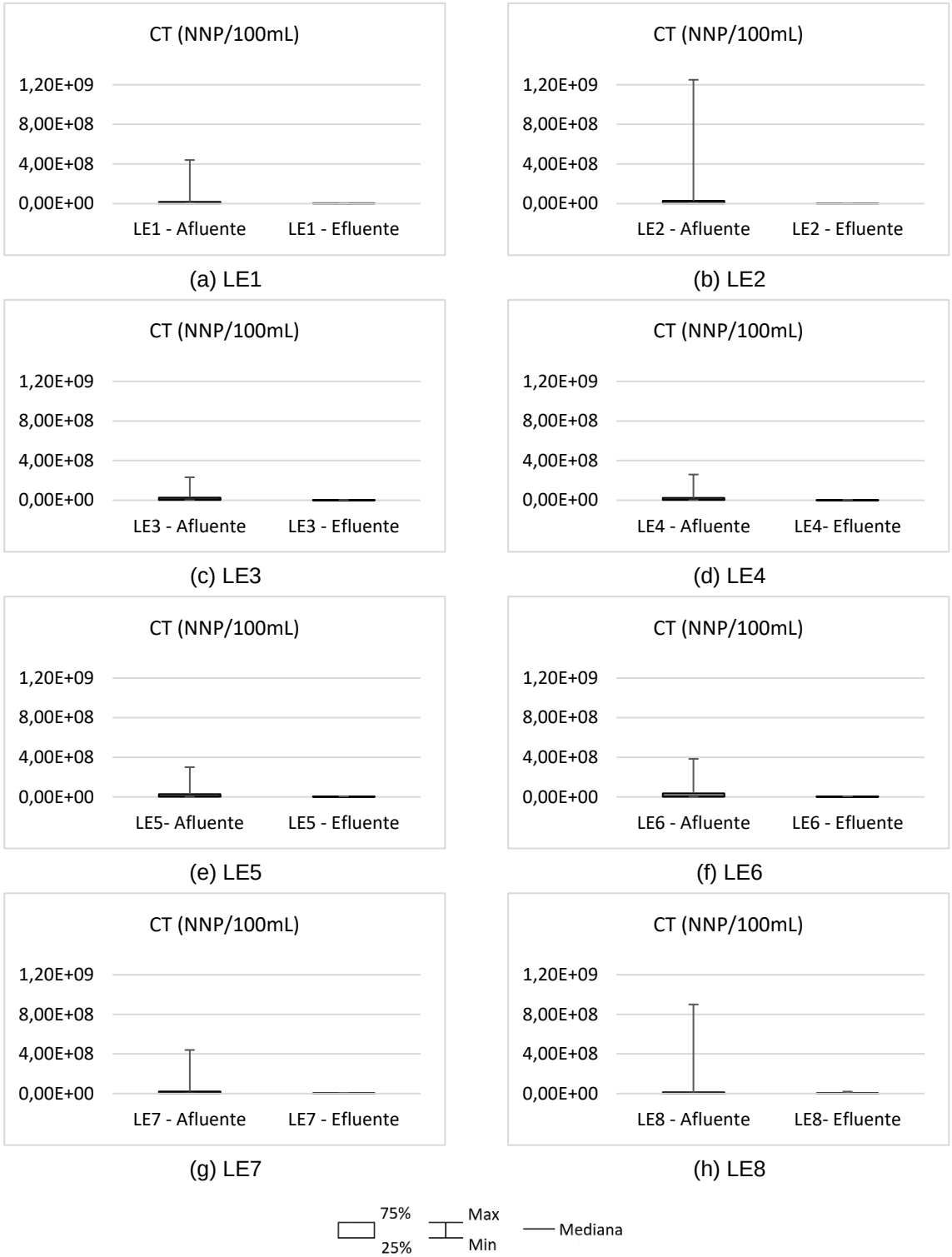
Os menores CVs para o PT foram observados em LE5 (0,29) e LE8 (0,30), indicando maior uniformidade e previsibilidade nos valores desses locais. Em contrapartida, o maior CV foi registrado em LE7 (0,53), sugerindo uma alta variabilidade na concentração de fósforo.

O valor máximo é a maior concentração de PT registrada em cada ponto de amostragem. O maior valor máximo foi observado em LE3 (34,73 mg/L), reforçando a hipótese de que esse ponto recebe altas cargas de fósforo. Enquanto o menor valor máximo foi registrado em LE2 (16,98 mg/L), indicando que esse local tem menores picos de poluição. O valor mínimo representa a menor concentração de fósforo total registrada em cada ponto. O menor valor mínimo foi em LE2 (0,02 mg/L), indicando que em alguns momentos a água esteve quase livre de fósforo. E o maior valor mínimo, 1,63 mg/L, foi em LE8, sugerindo que, mesmo nos momentos de menor impacto, há uma carga residual de fósforo nesse ponto.

Com relação às concentrações de coliformes termotolerantes (CT) dos afluentes e efluentes das lagoas estudadas (Figura 8), percebe-se que a LE3 se destacou pela redução de $7{,}90 \times 10^6$ NMP/100mL para $1{,}20 \times 10^3$ NMP/100mL, após o tratamento. De maneira geral, observou-se reduções significativas no número de

bactérias coliformes termotolerantes em todas as lagoas estudadas após o tratamento. No entanto, ao considerarmos a meta estabelecida de 1,00x10^3 NMP/100mL (WHO, 1989), apenas a LE3 se aproximou dessa meta, com 1,20x10^3 NMP/100mL.

Figura 8. Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 10, encontram-se os dados de CT em diferentes pontos de amostragem, indicados para as oito ETEs, este parâmetro é um indicador microbiológico usados para avaliar a qualidade microbiológica da água. Eles indicam a presença de contaminação fecal e ajudam a identificar possíveis riscos à saúde pública.

Tabela 10-Amostragem para CT (NNP/100ml)

CT (NNP/100ml)								
LE	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
MÉDIA	6,89E+04	3,12E+04	5,74E+04	3,64E+05	4,04E+05	2,13E+05	1,48E+05	3,98E+05
DESVIO PADRÃO	2,67E+05	1,22E+05	1,01E+05	6,79E+05	8,63E+05	4,60E+05	4,48E+05	2,60E+06
CV	3,87	3,93	1,76	1,86	2,13	2,16	3,02	6,53
MÁXIMO	2,20E+06	8,80E+05	5,60E+05	4,10E+06	6,40E+06	3,10E+06	3,37E+06	2,00E+07
MÍNIMO	0	0	6,00E+02	0	1,00E+03	1,80E+02	10	4,00E-03

Nota: CV – Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A média para o CT indica o valor médio em cada ponto de amostragem. As médias variaram de 2,13×10⁵ NNP/100 mL em LE6 (o menor valor) até 3,98×10⁵ NNP/100 mL em LE8 (o maior valor). LE8 apresentou a maior média de coliformes, o que pode indicar forte contaminação por efluentes sanitários ou industriais. Já LE6 obteve a menor média, sugerindo uma menor presença de fontes contaminantes.

Ao analisar o desvio padrão que demonstra a dispersão dos dados em relação à média. O maior desvio padrão foi 8,63×10⁵ NNP/100 mL em LE5, indicando uma grande variação nas amostras. Em contrapartida, o menor desvio padrão foi observado em LE3 (1,01×10⁵ NNP/100 mL), mostrando que os valores nesse ponto são mais uniformes e consistentes.

Os CVs para CT que apresenta valor maior foi 6,53 em LE8, sugerindo uma alta variabilidade nos dados de coliformes nesse ponto. Enquanto o menor CV foi 1,76 em LE3, indicando que os valores são mais previsíveis e consistentes.

O valor máximo é a maior concentração de CT registrada em cada ponto de amostragem. O maior valor máximo foi 2,00×10⁷ NNP/100 mL em LE8, indicando uma contaminação extremamente elevada em algum momento. E o menor valor máximo foi 5,50×10⁵ NNP/100 mL em LE3, o que ainda assim é considerado um valor alto. O

valor mínimo representa a menor concentração de coliformes totais registrada em cada ponto. O menor valor mínimo é 0 NNP/100 mL em LE1, LE4 e LE5, indicando que em alguns momentos a água esteve livre de coliformes nesses locais. Enquanto o maior valor mínimo foi $1{,}80\times10^{2}$ NNP/100 mL em LE6, sugerindo que há uma carga constante de contaminação microbiológica nesse ponto.

Nas Tabelas 11, 12, 13, 14 e 15 encontram-se os valores dos principais parâmetros de interesse do estudo, organizados de acordo com seus coeficientes de confiabilidade (CDC). Esses coeficientes foram calculados para diferentes níveis de confiabilidade (N.C.), variando entre 80%, 90%, 95% e 99%. Esses níveis de confiabilidade indicam o grau de certeza com que os valores representados na tabela refletem a realidade observada.

Ao relacionar o aumento do Nível de Confiança (N.C.) com o Coeficiente de Detecção de Carga (CDC), para um mesmo parâmetro de estudo, pode-se observar que o aumento do N.C. está associado a uma maior confiabilidade nos resultados. Ao aumentar o N.C., reduz-se a probabilidade de cometer um erro tipo I (aceitar uma hipótese nula quando ela é falsa), tornando os resultados mais robustos. Isso pode levar a uma diminuição do CDC, indicando uma melhor capacidade de detectar a presença de poluentes ou cargas contaminantes no sistema, sob as mesmas condições de estudo. Portanto, um aumento no N.C. pode melhorar a precisão e a confiabilidade dos resultados, levando a uma melhor capacidade de detecção de carga.

Observa-se nas Tabelas 11, 12, 13, 14 e 15, que, para todos as ETE, foram obtidas médias gerais dos CDC para cada N.C. Esses valores médios são 0,77 para 80% de confiança, 0,57 para 90%, 0,45 para 95% e 0,31 para 99%. Para calcular essas médias, somamos os valores de CDC de todas as ETEs para cada nível de confiança e dividimos pelo número total de ETEs analisadas. Os resultados indicaram que em um determinado intervalo de tempo, observou-se uma variação significativa nos valores quando o N.C. era mais baixo, aproximando-se de 0,77. Isso sugere que, nesse período específico, o efluente estava sujeito a flutuações acentuadas nos valores medidos.

Nos casos em que os N.C. eram mais altos, os valores do CDC eram menores (Tabelas 11, 12, 13, 14 e 15,). A discrepância dos valores de CDC, entre os diferentes N.C. apontam que o efluente naquele intervalo de tempo estava com uma flutuação

acentuada nos valores que foram medidos. Em um cenário em que a ETE opera de forma controlada, apresenta boa eficiência e bom desempenho, os resultados do CDC não sofrem grandes alterações com a mudança do nível de confiabilidade.

Na Tabela 11, observa-se que os CDCs para DBO na localidade de LE5 foram maiores em comparação com as demais localidades das LE, apresentando valores de N.C. de 80% com 0,74, 90% com 0,59, 95% com 0,49 e 99% com 0,43. Em contraste, a LE4 apresentou os menores valores de DBO, com N.C. de 80% com 0,70, 90% com 0,48, 95% com 0,34 e 99% com 0,19. Esses resultados indicam que as determinações analíticas de DBO realizadas na LE4 foram mais consistentes, sugerindo maior sensibilidade do método de análise. Na mesma tabela, percebe-se que os CDCs da DQO para LE1 e LE3 foram maiores que os das outras LE, enquanto o CDC da LE7 foi o menor entre todas. Isso indica que as determinações analíticas de DQO realizadas nos efluentes da LE7 foram mais confiáveis, evidenciando maior sensibilidade do método de análise. Essas confiabilidades configuram um aspecto positivo para o monitoramento e controle da qualidade da água, especialmente no que diz respeito às poluições orgânica e química.

Tabela 11-Coeficientes de confiabilidade dos parâmetros analisados para DBO e DQO.

DBO								
N.C (%)	Coeficientes de confiabilidade							
	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
80	0,73	0,71	0,71	0,70	0,74	0,72	0,71	0,72
90	0,56	0,51	0,51	0,48	0,59	0,55	0,51	0,55
95	0,46	0,39	0,39	0,34	0,49	0,44	0,39	0,44
99	0,31	0,24	0,24	0,19	0,34	0,29	0,23	0,29
DQO								
N.C (%)	Coeficientes de confiabilidade							
	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
80	0,75	0,75	0,73	0,71	0,72	0,74	0,70	0,71
90	0,60	0,60	0,58	0,53	0,56	0,59	0,49	0,53
95	0,50	0,51	0,48	0,41	0,45	0,49	0,37	0,41
99	0,36	0,36	0,33	0,26	0,30	0,34	0,21	0,26

Ao analisar a Tabela 12 para o SST, o CDC da LE1 foi maior que os das outras LE, enquanto a LE4 e LE8 apresentaram os menores CDCs das LE. Estes resultados indicam que as análises de determinação de SST para LE1 foram mais confiáveis e

que o método de análise é mais sensível. Isso é positivo em termos de monitoramento e controle da qualidade da água, especialmente em relação à presença de materiais sólidos em suspensão.

Tabela12-Coeficientes de confiabilidade dos parâmetros analisados para SST.

SST								
N.C (%)	Coeficientes de confiabilidade							
	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
80	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71	0,70
90	0,51	0,48	0,49	0,47	0,49	0,46	0,46	0,47
95	0,39	0,36	0,37	0,34	0,36	0,32	0,32	0,34
99	0,24	0,20	0,21	0,18	0,21	0,17	0,16	0,18

A respeito dos valores de CDC para NT, LE4 registrou o maior CDC quando comparado com as demais LE. No entanto, o CDC da LE2 foi menor (Tabela 13). Logo, para LE2, os resultados das medições de NT são mais confiáveis e que o método de análise utilizado é mais sensível, permitindo uma detecção mais precisa de baixas concentrações de nitrato na água. Isso é crucial para garantir a segurança e a qualidade da água para consumo humano e proteção ambiental.

Tabela 13-Coeficientes de confiabilidade dos parâmetros analisados para NT.

NT								
N.C (%)	Coeficientes de confiabilidade							
	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
80	0,86	0,70	0,84	0,89	0,83	0,88	0,75	0,77
90	0,79	0,50	0,75	0,82	0,73	0,82	0,61	0,65
95	0,74	0,37	0,69	0,78	0,66	0,77	0,52	0,56
99	0,64	0,22	0,58	0,70	0,55	0,69	0,38	0,43

Na Tabela 14, os valores de CDC da LE5 foram maiores que os CDCs das outras LE, e as LE1 e LE7 apresentaram os menores valores. Neste caso, os CDCs das LE1 e LE7 indicam uma melhoria na confiabilidade e na sensibilidade dos métodos de análise utilizados para monitorar a qualidade da água em relação a esses parâmetros. Isso é fundamental para garantir a segurança e a saúde pública, bem como para proteger o meio ambiente.

Tabela 14-Coeficientes de confiabilidade dos parâmetros analisados para PT.

Coeficiente de Confiabilidade em relação à remoção de PT.								
N.C (%)	Coeficientes de confiabilidade							
	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
80	0,75	0,79	0,77	0,77	0,82	0,81	0,75	0,81
90	0,60	0,67	0,64	0,65	0,72	0,71	0,60	0,72
95	0,51	0,59	0,55	0,56	0,65	0,63	0,50	0,64
99	0,36	0,46	0,41	0,42	0,54	0,51	0,36	0,53

Contudo, a LE1 apresentou valores mais altos para DQO, SST e PT caracterizando possíveis deficiências no processo de tratamento que precisam ser identificadas e corrigidas para garantir a eficácia do tratamento de efluentes.

Ao analisarmos os valores de E. coli (Tabela 15), observamos variações significativas entre as ETEs. Para um nível de confiança (N.C.) de 80%, o maior valor foi registrado na LE8, enquanto o menor foi na LE3. Para N.C. de 90%, novamente, a LE8 apresentou o maior valor, enquanto o menor foi na LE5. No caso do N.C. de 95%, a LE8 se destacou mais uma vez, com o menor valor também pertencendo à LE5. Por fim, para um N.C. de 99%, os valores que se destacaram foram os da LE1, LE2 e LE8.

Tabela 15-Coeficientes de confiabilidade dos parâmetros analisados para E. Coli.

Coeficiente de Confiabilidade em relação à remoção de E. Coli.								
N.C (%)	Coeficientes de confiabilidade							
	LE-1	LE-2	LE-3	LE-4	LE-5	LE-6	LE-7	LE-8
80	0,98	0,99	0,74	0,75	0,78	0,79	0,88	1,29
90	0,47	0,47	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,55
95	0,26	0,26	0,29	0,28	0,27	0,27	0,26	0,27
99	0,08	0,08	0,13	0,12	0,11	0,11	0,09	0,07

A análise dos valores de Escherichia coli em diferentes Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), considerando distintos níveis de confiança, destaca a complexidade do tratamento de águas residuais. Esse contexto reforça a importância de um monitoramento rigoroso aliado a uma análise estatística mais criteriosa para garantir uma gestão eficiente da qualidade da água tratada.

5 CONCLUSÕES

As ETEs analisadas demonstraram eficiência relevante na remoção de poluentes, com destaque para a DBO e a DQO. A redução da DBO nos efluentes variou entre 73,16% e 80,45%, mantendo a mediana consistentemente abaixo do limite de 60 mg/L, em conformidade com as normas ambientais, o que contribui para a redução da poluição orgânica dos corpos d'água receptores.

A análise das AIQs confirmou a redução das variações nas concentrações de DBO e DQO após o tratamento, indicando estabilidade no processo. Para a maioria dos parâmetros, as AIQs dos efluentes foram inferiores às dos afluentes, refletindo um controle eficaz da dispersão de poluentes e consistência nos resultados, evidenciada pela menor fração biodegradável nos efluentes, conforme a razão DBO/DQO.

Embora alguns pontos tenham apresentado valores de SST acima do limite de 60 mg/L, a maioria das ETEs manteve-se dentro da meta, demonstrando boa retenção de sólidos. No entanto, a remoção de NTK e PT mostrou-se variável, sugerindo a necessidade de ajustes operacionais, especialmente no controle de pH, para melhorar a remoção de fósforo, cuja eficiência foi baixa em algumas lagoas de estabilização.

As CDCs detalharam a estabilidade dos métodos de análise e resultados, reforçando a importância do monitoramento contínuo e de análises estatísticas rigorosas para garantir a segurança e qualidade ambiental dos efluentes.

Os resultados obtidos oferecem subsídios para aprimorar políticas públicas e práticas de gestão em ETEs. A adoção de tecnologias avançadas, como processos combinados de lagoas de estabilização e filtração avançada, pode otimizar a remoção de sólidos e nutrientes, especialmente em regiões com escassez hídrica. A capacitação contínua dos operadores das ETEs também se mostra essencial para assegurar a eficiência e a estabilidade dos processos.

REFERÊNCIAS

ABDOLI, S. *et al.* A review of the efficiency of phosphorus removal and recovery from wastewater by physicochemical and biological processes: challenges and opportunities. **Water**, v. 16, n. 17, p. 2507–2507, 4 set. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/w16172507.

ABYAR, H.; NOWROUZI, M. Highly efficient reclamation of meat-processing wastewater by aerobic hybrid membrane bioreactor-reverse osmosis simulated system: a comprehensive economic and environmental study. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 37, p. 14207–14216, 24 ago. 2020.

ACRE. **Lei Estadual nº 1.500/03.** Institui a política estadual de recursos hídricos. Rio Branco, 2003.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). **Previsões do Tempo.** Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/previsoes-do-tempo. Acesso em: 24 out. 2024.

ALAGOAS. Decreto n. 6200, de 01 de março de 1985. Estabelece medidas de proteção ambiental na área de implantação do Pólo Cloroquímico de Alagoas e dá outras providências. Maceió, 1 mar. 1985.

ALAGOAS. Instrução Normativa SEMARH nº 1, de 30 de maio de 2018. Estabelece critérios e padrões de lançamento para análise técnica de outorga na modalidade lançamento de efluentes no Estado de Alagoas. **Alagoas,** 30 maio de 2018.

ALI, A., SALEM, W., YOUNES, S., & KAID, M. Modeling climatic effect on physiochemical parameters and microorganisms of Stabilization Pond Performance. **Heliyon,** 6, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04005.

AMAZONAS. **Lei Estadual nº 2712/01.** Estabelece a política estadual de recursos hídricos. Amazonas: Manaus, 2001.

AREERACHAKUL, N., KANDASAMY, J. Integrated design of a small wastewater treatment plant – a case study from thailand. **Journal of Sustainable Development of Energy,** Water and Environment Systems, 2022.

ARUMUGAM, P. *et al.* The potential of decentralised wastewater treatment in urban and rural sanitation in South Africa: lessons learnt from a demonstration-scale DEWATS within the eThekwini Municipality. **Water SA**, 49, 2020. DOI: https://doi.org/10.17159/wsa/2023.v49.i1.3985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9800**: Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

BOUCHAALA, L.; CHARCHAR, N.; SAHRAOUI, H.; GHERIB, A. Assessment of wastewater biological treatment efficiency and mapping of WWTPs and LTPs in

Algeria. **Journal of Environmental Health Science and Engineering,** v. 19, n.1, p. 1153-1169, 2021.

BRASIL. **Código Civil. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002**. Brasília, DF: Senado Federal, 2002.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Planalto, 2010.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Planalto, 1981.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Planalto, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRASIL. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.

CEARÁ. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Ceará, 17 de mar. de 2005.

CNRH. Resolução nº 121, de 24 de novembro de 2010. Estabelece diretrizes para o reuso direto não potável de água e seus critérios gerais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 nov. 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Dados do Saneamento Básico dos Municípios Paulistas.** São Paulo: CETESB, 2016.

CONAMA. **Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005**. Define critérios para o uso agrícola de efluentes líquidos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 28 nov. 2005.

CORNEL, P.; SCHAUM, C. Phosphorus recovery from wastewater: Needs, technologies and costs. **Water Science Technology**, v. 59, p.1069-1076, 2009.

CORNELLI, R. *et al.* Métodos de tratamento de esgotos domésticos: uma revisão sistemática. **Revista de estudos ambientais**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 15-25, 2014.

EDOKPAYI, J. N.; ODIYO, J. O.; POPOOLA, O. E.; MSAGATI, T. A. M. Evaluation of contaminants removal by waste stabilization ponds: A case study of Siloam WSPs in Vhembe District, South Africa. **Heliyon**, South Africa, v. 7, p. 1-12, 3 jan. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06207.

FERON, G. **Avaliação do tratamento e da destinação do lodo de esgoto da estação de tratamento de esgoto do município de Francisco Beltrão/PR.** 2018. 184 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, PR. 2018.

FERRI, K. C. F. *et al.* Eficiência no tratamento de esgoto no município de Caiapônia-GO. **Itinerarius Reflectionis**, v. 15, n. 3, p. 01-23, 2019.

FRAGOSO, G. M. T. Base legal vigente no Brasil aplicada à agressão ao meio ambiente causada pelo descarte de efluentes líquidos. **Cistemoteca** Pombal, 2018.

GOOGLE. Google Earth. Imagem de Petrolina, 2024. Disponível em: https://earth.google.com/web/. Acesso em: 06 dez. 2024.

GOIÁS. **Decreto n° 1.745, de 06 de dezembro de 1979.** Aprova o Regulamento da Lei n.º 8.544, de 17 de outubro de 1978, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Goiás, Goiânia, 06 dez. 1979.

GOIÁS. **Resolução nº 9, de 04 de maio de 2005**. Estabelece o regulamento do sistema de outorga das águas de domínio do estado de goiás e dá outras providências. Goiás. 04 de maio de 2005.

GUERRA-RODRÍGUEZ, S. *et al*. Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: challenges and opportunities. ***Water***, v. 12, 1431, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/w12051431.

IERVOLINO, L. F. Lagoas de estabilização. In: IERVOLINO, Luiz Fernando. **Lagoas de estabilização.** São Paulo, 17 abr. 2019. Disponível em: https://tratamentodeagua.com.br/artigo/lagoas-estabilizacao/. Acesso em: 23 out. 2023.

INGLIS, A. *et al*. Laboratory-scale waste stabilization pond development. **Environmental Technology.** New Zealand 2022.

JOHNSON, D. B. Biomining — biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 30, p. 24–31, 2014.

KÖPPEN, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. **Fondo de Cultura Econômica**. México. 1948. 479p.

KUWAJIMA, J. I. et al. Indicadores do ODS 6: importância e divergências metodológicas nas primeiras medições. **Desenvolvimento e Meio Ambiente,** v. 62 (SDG 6 Water), p. 941-959, nov. 2023. DOI:https://doi.org/10.5380/dma.v62i0.89502.

LEÃO, R. C. *et al.* Ocorrência de enteroparasitos e coliformes termotolerantes nas mãos de manipuladores de alimentos de um hospital de ensino. **Cadernos Saúde Coletiva,** v. 26, n. 2, p. 211-215, abr.-jun. 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/1414-462X201800020283.

LEITE, L. DE S.; HOFFMANN, M. T.; DANIEL, L. A. Microalgae cultivation for municipal and piggery wastewater treatment in Brazil. **Journal of Water Process Engineering,** v. 41, 2019.

LEONEL, L. F. **Desempenho de estações de tratamento de esgoto uma análise de sistemas de lagoas de estabilização de pequeno e médio porte integrada à avaliação da qualidade dos corpos hídricos na UGRI 12.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

LOBÃO, J. R. S. **Análise de desempenho, estabilidade e confiabilidade de estações de tratamento de esgoto.** 2009. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MARTINS JÚNIOR, A. C. de O. *et al.* Avaliação da eficiência do uso de coagulantes para a remoção de fósforo em efluentes. **Revista AIDIS De Ingeniería Y Ciencias Ambientales**. Investigación, Desarrollo Y práctica, v. 16, n. 1, p. 65–81, 2023. DOI: https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.81742.

MATO GROSSO DO SUL. **Deliberação CECA/MS n° 003, de 20 de junho de 1997.** Dispõe sobre a preservação e utilização das águas das bacias hidrográficas do Estado de Mato Grosso do Sul, e dá outras providências. Mato Grosso do Sul: Campo Grande, 20 jun. 1997.

MATO GROSSO DO SUL. **Deliberação CECA/MS n° 36, de 27 de junho de 2012.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água superficiais e estabelece diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem, como, estabelece as diretrizes, condições e padrões de lançamento de efluentes no âmbito do Estado do mato Grosso do Sul, e dá outras providências. Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 27 jun. 2012.

MENDONÇA, T. P.; PETRECA, W. L.; DE SOUZA, A. D. G. Autodepuração de corpos hídricos: estudo do lançamento de esgoto doméstico no rio Lambari (Poços de Caldas/MG). **Geoambiente On-line**, n. 36, p. 85-103, 2020.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução de Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MICHALAKE, A. E.; SILVA, C. R. da; SILVA, F. F. da Análise dos parâmetros físico-químicos do esgoto tratado de Curitiba (PR) - Estação Belém. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1560-1569, 2016.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa n° 10 de 16 de dezembro de 1986.** Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências. Belo Horizonte: Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM, 1986.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa n° 46, de 9 de agosto de 2001.** Estabelece alteração no limite de eficiência de remoção em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio para os sistemas de tratamento de esgotos domésticos e de percolado de aterros sanitários municipais, e dá outras providências. Belo Horizonte: Conselho de Política Ambiental de Minas Gerais – COPAM, 2001.

MONTEIRO, C. R. L. **Análise da eficiência e confiabilidade em 56 estações de tratamento de esgotos localizadas na região metropolitana de Fortaleza.** 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MORAIS, J.C. **Avaliação da eficiência e dos problemas operacionais de uma estação de tratamento de esgotos ao longo de 13 anos de monitoramento.** 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

NIKU, S.; SCHROEDER, E.D.; SAMANIEGO F.J. Performance of activated sludge process and reliability-based design. **Journal Water Pollution Control Association**, v. 51, n. 12, p. 2841 - 2857, dez. 1979.

OLIVEIRA, G. H. **Interferências da codisposição de resíduos de fossa e tanque séptico em sistemas de lagoas anaeróbias seguidas de facultativas aeradas - Estudo de caso para a ETE-Anápolis.** 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente (EEC) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

OLIVEIRA, S.C. SPERLING, M.V. Análise da confiabilidade de estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** v. 12, n. 4, p. 389-398, out./dez. 2007.

PADALKAR, A., KAUR, S. E KUMAR, R. Análise de confiabilidade e relação de eficiência de remoção de estações de tratamento de efluentes comuns de clusters industriais. **Jornal Internacional de Ciência e Tecnologia Ambiental**, 2018**.** DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-018-1740-9.

PAPAJOVÁ, I. *et al.* Effect of wastewater treatment on bacterial community, antibiotic-resistant bacteria and endoparasites. **International Journal *of Environmental Research and Public Health*,** v. *19*, p. 2750, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph19052750.

PARAÍBA. **Norma Técnica COPAM 301/88.** Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Paraíba: João Pessoa, 1988.

PEREIRA, V. G**. Avaliação de metais em efluente e lodo de esgoto doméstico de um sistema de lagoas aeradas de São João da Boa Vista utilizando a técnica SR-TXRF.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. 2015.

PERNAMBUCO. **Norma Técnica 2007.** CPRH - Agência Estadual do Meio Ambiente. Coliformes Fecais – Padrão de Lançamento para efluentes domésticos e/ou industriais.

PERNAMBUCO. **Norma Técnica CPRH n° 2.002 de 21 de fevereiro de 200.** Critérios e padrões de lançamento de carga orgânica não industrial. Pernambuco: Recife, 2000.

PONCE, F. 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, 2019.

RECIO-GARRIDO, D.; KLEINER, Y.; COLOMBO, A.; TARTAKOVSKY, B. Dynamic model of a municipal wastewater stabilization pond in the arctic. **Water Research**, v. 144, p. 444-453, 20 jul. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.052.

Relatório de Esgotamento Sanitário Municipal. Petrolina-PE, 2017. Disponível em: https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/atlas_esgoto/Pernambuco/ Relatorio_ Geral/Petrolina.pdf. Acesso em: 14 abr. 2023.

REZAEI, N. *et al.* A multi-objective optimization model for decision support in water reclamation system planning. **Journal of Cleaner. Production**, v. 240, 2019.

RIO DE JANEIRO (Estado). **DZ.215.R-4 - Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem não industrial.** Aprovada pela Deliberação CECA nº 3.154, de 26 de abril de 1994. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 26 abr. 1994.

RIO GRANDE DO SUL. Portaria SSMA n° 05/89. Aprova a norma técnica SSMA n° 01/89, que dispõe sobre critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lancem seus efluentes nos corpos d'água interiores do estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul,** Porto Alegre, 29 mar. 1989.

RONDÔNIA. **Decreto Estadual n° 7.903, de 1° de julho de 1997.** Regulamenta a Lei nº 547, de 30 de dezembro de 1993, que dispõe sobre a preservação e controle

da poluição ambiental e estabelece normas disciplinadoras da espécie. Rondônia, Porto Velho, 1997.

ROSA, A. H. FRACETO, L. F. MOSCHINI-CARLOS V. Meio ambiente e sustentabilidade. Porto Alegre: **Bookman,** 2012.

SANTA CATARINA. **Decreto n° 14.250, de 5 de junho de 1981.** Regulamenta dispositivos da Lei nº 5.793, de 15 de outubro de 1980, referentes à proteção e a melhoria da qualidade ambiental. Santa Catarina, Florianópolis, 05 jun. 1981.

SÃO PAULO. **Decreto n° 8468, de 8 de setembro de 1976.** Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, 1976.

SILVA, L. C.; PICANÇO, A. P. Visão geral sobre as tecnologias sustentáveis do saneamento rural no tratamento de esgotos sanitários no brasil entre 2008 E 2018. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales.** Investigación, desarrollo y práctica, p. 1444-1462, 2021.

Special section - Water, Sanitation and SDGs in Brazil: challenges, contradictions and governance. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 62, p. 941-959, jul./dez. 2023. DOI: https://doi/.org/10.5380/dma.v62i0.89502.

USEPA (United States Environment Protection Agency). **States Compendium.** Programs and Regulatory Activities related to Animal Feeding Operations. EPA, 2021.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. **Eclética Química**. UNESP, v. 22, 221p., 1997.

VAN HAANDEL, A.; DOS SANTOS, S. L. Transformação de lagoas de estabilização: reengenharia de um sistema obsoleto de tratamento de águas residuárias. **Revista DAE**, v. 69, n. 229, p. 6-24, 2021.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização.** 3. ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

WORLD HEALTH ORGANISATION. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. **World Health Organization**, v. 4, p. 182. Geneva: World Health Organization Press, 2013.

WU, Z. DUAN, H. LI, K. YE, L. A comprehensive carbon footprint analysis of different wastewater treatment plant configurations. **Environmental research**, v. 214, 2022.