



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**TIAGO RIBEIRO BARBOSA**

**GARANTIA PROBABILÍSTICA EM MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE  
EFLUENTE DE UM SISTEMA DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2021**

TIAGO RIBEIRO BARBOSA

GARANTIA PROBABILÍSTICA EM MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE  
EFLUENTE DE UM SISTEMA DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B213g Barbosa, Tiago Ribeiro.  
Garantia probabilística em monitoramento da qualidade de efluente de um sistema de lagoas de estabilização / Tiago Ribeiro Barbosa. – 2021.  
33 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

1. Esgoto. 2. Atendimento normativo. 3. Lagoas de estabilização. 4. Efluente. I. Título.

CDD 620

---

TIAGO RIBEIRO BARBOSA

GARANTIA PROBABILÍSTICA EM MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE  
EFLUENTE DE UM SISTEMA DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 29/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marisete Dantas de Aquino (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Engenheiro Ambiental David Harisson Santos Bezerra (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Educação (IFCE)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

A Deus.

À minha família, por compreender meus momentos de reclusão.

## RESUMO

O descontrole do despejo de efluentes no ambiente ocasiona poluição das águas. O excesso de matéria orgânica causa o esgotamento do oxigênio da água e mata os seres vivos dele dependentes. Outro problema do esgoto é a possibilidade de contaminação por agentes microbianos causadores de doenças. A adequada aplicação de instrumentos e técnicas voltados para o controle da poluição da água exige garantia material ao longo do tempo. Também, demanda a plena compreensão da legislação correspondente e o seu consequente entendimento e atendimento. Além disso, é necessário que se disponha de recursos analíticos que avaliem o desempenho de estações de tratamento de esgotos (ETE). Dessa forma o cômputo da confiabilidade de uma ETE considera a qualidade do efluente tratado e o atendimento de limites normativos pré-estabelecidos como o estudo tem como objetivo geral determinar o grau de garantia probabilística no atendimento aos padrões ambientais. Esse tema trata do despejo de efluente de um sistema de lagoas de estabilização em escala real. Para consecução dos objetivos foram considerados os seguintes parâmetros analíticos da qualidade do efluente do sistema de lagoas de Ponta Negra: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), amônia (AMT), pH, temperatura (temp.) e coliformes termotolerantes (CTT). Ao todo foram coletadas 25 amostras no período de janeiro de 2014 a novembro de 2017, referente aos esgotos bruto (EB) e esgoto tratado (ET), efluente da última lagoa de maturação.

**Palavras-chave:** Esgoto. Atendimento Normativo. Lagoas de Estabilização. Efluente.

## ABSTRACT

The uncontrolled discharge of effluents into the environment causes water pollution. The excess of organic matter causes the depletion of oxygen in the water and kills the living beings dependent on it. Another problem with sewage is the possibility of contamination by disease-causing microbial agents. The adequate application of instruments and techniques aimed at controlling water pollution requires material guarantee over time. It also demands full understanding of the corresponding legislation and its consequent understanding and compliance. In addition, it is necessary to have analytical resources to assess the performance of sewage treatment plants. Thus, the computation of the reliability of an sewage treatment plants considers the quality of the treated effluent and the compliance with pre-established normative limits as the study has as its general objective to determine the degree of probabilistic guarantee in meeting the environmental standards. This theme deals with the discharge of effluent from a full-scale stabilization pond system. To achieve the objectives, the following analytical parameters of the effluent quality of the Ponta Negra lagoon system were considered: biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), ammonia (AMN), pH, temperature (temp.) and thermotolerant coliforms. In all, 25 samples were collected from January 2014 to November 2017, referring to raw sewage and treated sewage, effluent from the last maturation pond.

**Keywords:** Sewage. Normative Service. Stabilization Lagoons. Effluent.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Impurezas contidas no esgoto .....	13
Figura 2	– Constituição dos esgotos sanitários .....	14
Figura 3	– Sistema DBO/OD e a curva de autodepuração .....	16
Figura 4	– Representação simplificada do processo de eutrofização .....	16
Figura 5	– Representação comparativa entre eutrofização natural e artificial .....	17
Figura 6	– Esquema de funcionamento de uma lagoa anaeróbia .....	18
Figura 7	– Esquema de funcionamento de uma lagoa facultativa .....	19
Figura 8	– Configurações mais comuns em sistemas de lagoas de estabilização .....	20
Figura 9	– Estruturação de programas de monitoramento de águas e efluentes .....	22
Figura 10	– Localização do Rio Grande Norte, Região Nordeste do Brasil .....	23
Figura 11	– Representação esquemática da ETE Ponta Negra .....	24
Figura 12	– Procedimento para simulação Monte Carlo com os dados de qualidade do efluente tratado do sistema de lagoas de Ponta Negra .....	25
Figura 13	– Remoção de DBO, DQO e AMT (%) e de CTT (unidades de Log10) com base em três medidas centrais na ETE Ponta Negra .....	28



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Principais tipos de lagoas de estabilização e suas características .....	18
Tabela 2	– Estatística descritiva compilada dos limites de poluentes contidos em efluentes a serem despejados no ambiente .....	21
Tabela 3	– Remoção dos principais poluentes a serem despejados por ETEs .....	21
Tabela 4	– Graus de restrição e respectivos limites valores limites .....	26
Tabela 5	– Estatística descritiva dos esgotos bruto e tratado no sistema de lagoas de estabilização Ponta Negra, RN .....	27
Tabela 6	– Garantia probabilística no atendimento aos limites especificados, com as distribuições Normal, Gama e Lognormal (simulação com 5000 interações)	29
Tabela 7	– Efeito da alteração dos valores limites nos respectivos graus de restrição sobre a garantia probabilística (G) .....	30

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Doenças associadas às águas poluídas .....	15
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	Considerações iniciais .....	10
1.2	Motivação do estudo .....	10
1.3	Objetivo .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
2.1	Importância do tratamento de esgotos .....	12
2.2	Sobre os esgotos .....	13
2.3	Impactos dos esgotos não tratados .....	14
2.4	Lagoas de estabilização para tratar esgotos sanitários .....	17
2.5	Características normativas do efluente tratado .....	20
2.6	Monitoramento da qualidade de efluentes .....	21
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	23
3.1	O sistema de lagoas de estabilização do estudo .....	23
3.2	Dados do estudo .....	24
3.3	Abordagem .....	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	27
4.1	Desempenho do sistema de lagoas de estabilização .....	27
4.2	Garantia probabilística para as funções e parâmetros selecionados .....	28
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	31
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	32

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Com o desenvolvimento da tecnologia de tratamento de esgoto e as demandas ambientais, um dos temas mais relevantes é o atendimento normativo. Diz respeito ao lançamento de efluentes no ambiente, especialmente nos corpos aquáticos, e os limites reguladores. O esgoto tratado deve atender a padrões de qualidade, de maneira a preservar o recurso água e seus usos. Assim necessita-se de substancial redução da carga de matéria orgânica biodegradável e de sólidos em suspensão, de nutrientes (nitrogênio e fosforo) e remoção patógenos.

Há diferentes tecnologias para tratamento de esgotos como: sistemas anaeróbios, filtros biológicos, lagoas de estabilização, rotores biológicos de contato, dentre outros. As lagoas de estabilização são uma tecnologia de tratamento de efluentes de caráter doméstico e industrial e vem sendo estudada desde 1960 (JORDÃO; PESSOA, 2014). Sua principal particularidade é a sua capacidade de permitir uma condição eficaz de tratamento de efluentes a partir da presença de microrganismos e sem a necessidade de grandes custos com construção.

As lagoas de estabilização apresentam grandes vantagens para o contexto econômico. Elas permitem uma tratabilidade do efluente com mínimo de recursos energéticos, construtivo e de manutenção, facilitando não somente a sua implantação no Brasil, como em países desenvolvidos.

## 1.2 Motivação do estudo

O descontrole do despejo de efluentes no ambiente ocasiona poluição das águas. O excesso de matéria orgânica ocasiona o esgotamento do oxigênio da água e mata os seres vivos dele dependentes. Outro problema do esgoto é a possibilidade de contaminação por agentes microbianos causadores de doenças de veiculação hídrica.

A adequada aplicação de instrumentos e técnicas voltados para o controle da poluição da água exige garantia material ao longo do tempo. Também, demanda a plena compreensão da legislação correspondente e o seu consequente entendimento e atendimento. É necessário que se disponha de recursos analíticos que avaliem o desempenho de estações de tratamento de esgotos (ETE) ao longo do tempo. A interpretação da qualidade média do efluente de ETE é, em si, um entendimento limitado. Exige-se, portanto, a aplicação do conceito de

garantia com base em função marginal. Dessa forma o cômputo da confiabilidade de uma ETE considera a qualidade do efluente tratado e o atendimento de limites normativos pré-estabelecidos.

### **1.3 Objetivo**

O estudo tem como objetivo geral determinar o grau de garantia probabilística no atendimento aos padrões ambientais. Esse tema trata do despejo de efluente de um sistema de lagoas de estabilização em escala real.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Importância do tratamento de esgotos

Apesar dos avanços tecnológicos, o tratamento de esgoto tem limitações, não removendo completamente todas as substâncias indesejadas. O agente final desse processo decisório é o homem ou o ambiente. Ocorrendo desde o risco tecnológico (decorrente de efeitos não naturais), o risco ambiental (decorrente por fatores ou mudanças ambientais) e o risco naturais (causados por fenômenos naturais).

Agentes químicos (substâncias químicas perigosas) e biológicos (organismos patogênicos) na água tornam-se preocupações principais para os consumidores da água. A remoção dos contaminante dependerá diretamente do investimento aplicado na tecnologia e dependerá, também, da necessidade de tratamento. Varela e Manaia (2013) destacam que os esgotos são o elo de ligação entre as atividades humanas e o meio ambiente. As autoras apontam que este é um passivo ambiental a ser minorado. Souza *et al.* (2015) e Mota (2012) destacam que os esgotos devem ser coletados e tratados, tendo em vista as seguintes dimensões e impactos:

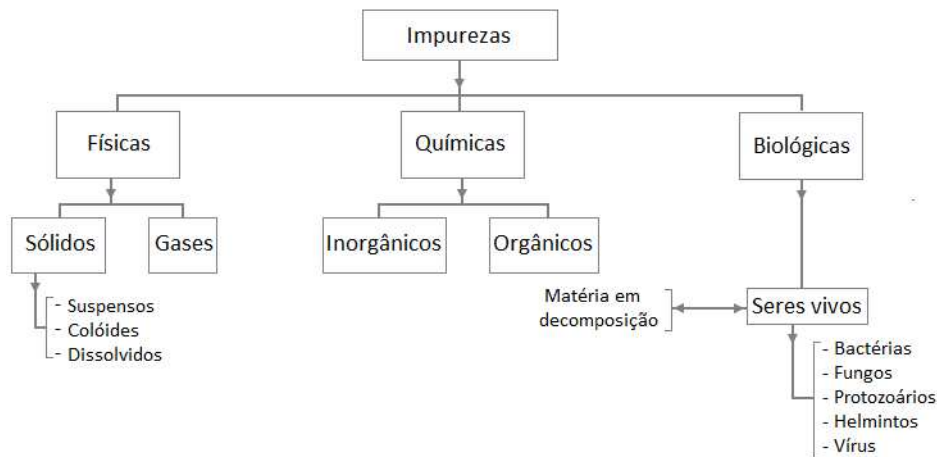
- a) dimensão saúde – redução da ocorrência de doenças relacionadas à água; do número de casos de internação por diarreias, e; do despejo de poluentes químicos e outros emergentes que apresentem risco potencial à a saúde humana;
- b) dimensão socioeconômica – incremento da produtividade laboral em razão da menor incidência de doenças relacionadas à água; redução de custos com os serviços públicos de saúde; elevação do nível de desenvolvimento das comunidades; preservação de mananciais com impacto direto sobre os custos de tratamento de água; redução do impacto sobre as diversas atividades usuárias dos recursos hídricos; elevação do valor cênico dos corpos aquáticos, e; diminuição do estresse hídrico pelo potencial de reuso de água;
- c) dimensão ambiental – redução da carga orgânica nos corpos receptores; redução do impacto no consumo de oxigênio dissolvido; redução no aporte de nutrientes e da eutrofização em águas superficiais, e; diminuição do despejo de poluentes emergentes com elevado impactos sobre a cadeia trófica.

## 2.2 Sobre os esgotos

Águas residuais são chamadas de esgotos e águas servidas (ou residuárias). Existem três tipos de esgoto: os domésticos (vêm das residências), os pluviais (coleta da água da chuva) e os industriais (resíduos das indústrias). A norma brasileira a respeito do estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário, ABNT 9648 (1986), define esgoto sanitário como: “Despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”.

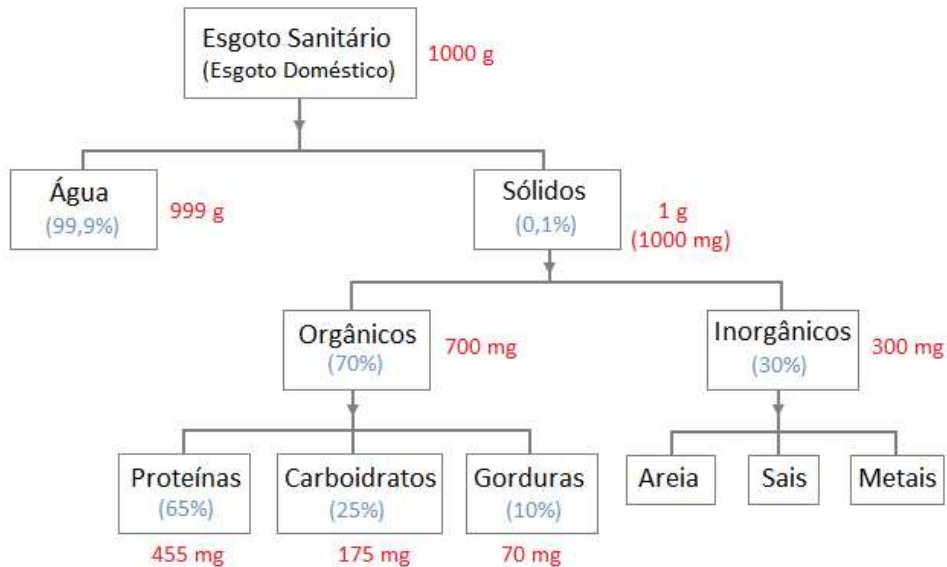
Em constituição, o esgoto sanitário é “idêntico” ao esgoto doméstico. As características dos esgotos resultam de impurezas adicionadas à água. Uma descrição desse conteúdo de impurezas está representada na Figura 1. Trata-se de uma adaptação da descrição geral das impurezas contidas a água, no meio ambiente. Também, os esgotos sanitários podem ser caracterizados conforme o conteúdo gravimétrico, em que cerca de 99,9% da massa constituinte é água. O restante (0,1%) são impurezas de natureza orgânica e inorgânica, conforme mostrado na Figura 2 (VON SPERLING, 2014).

Figura 1 – Impurezas contidas no esgoto.



Fonte: adaptado de Von Sperling (2014).

Figura 2 – Constituição dos esgotos sanitários.



Fonte: adaptado de Von Sperling (2014).

### 2.3 Impactos dos esgotos não tratados

O cenário brasileiro em relação a serviços de esgotamento sanitário ainda é muito precário. Em espectro geral, os impactos causados pelo despejo de esgotos não tratados e mal tratados são inúmeros impactos. Esses, ao final alcançam não apenas a dimensão ambiental e de saúde, mas atingem seriamente as esferas econômica e social.

No escopo saúde, o Quadro 1 mostra sumariamente um conjunto de doenças associadas à qualidade da água e que, por consequência, a, têm relação com o despejo de esgotos não tratados. No quadro, as doenças crônicas e de alto custo têm entendimento mais complexo, mas todas apresentam risco computável a partir do dual: tempo de exposição *versus* concentração do contaminante na água.

Na dimensão ambiental o impacto de esgotos está concentrado nos efeitos sobre os corpos aquáticos. Esses impactos são melhor representados a partir do aporte de matéria orgânica e de nutrientes (nitrogênio e fósforo).

O excesso de matéria orgânica demanda maior quantidade de oxigênio dissolvido (OD) para estabilizá-la até que esse estabeleça o status anterior ao despejo. A estabilização é feita por via aeróbia, denominada de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). O sistema DBO/OD é representado no tempo a partir da curva de autodepuração (Figura 3). Alterações nas curvas de DBO e OD têm impacto sobre as comunidades bióticas nos corpos aquáticos e sobre os compostos químicos mediados pela atividade biótica.



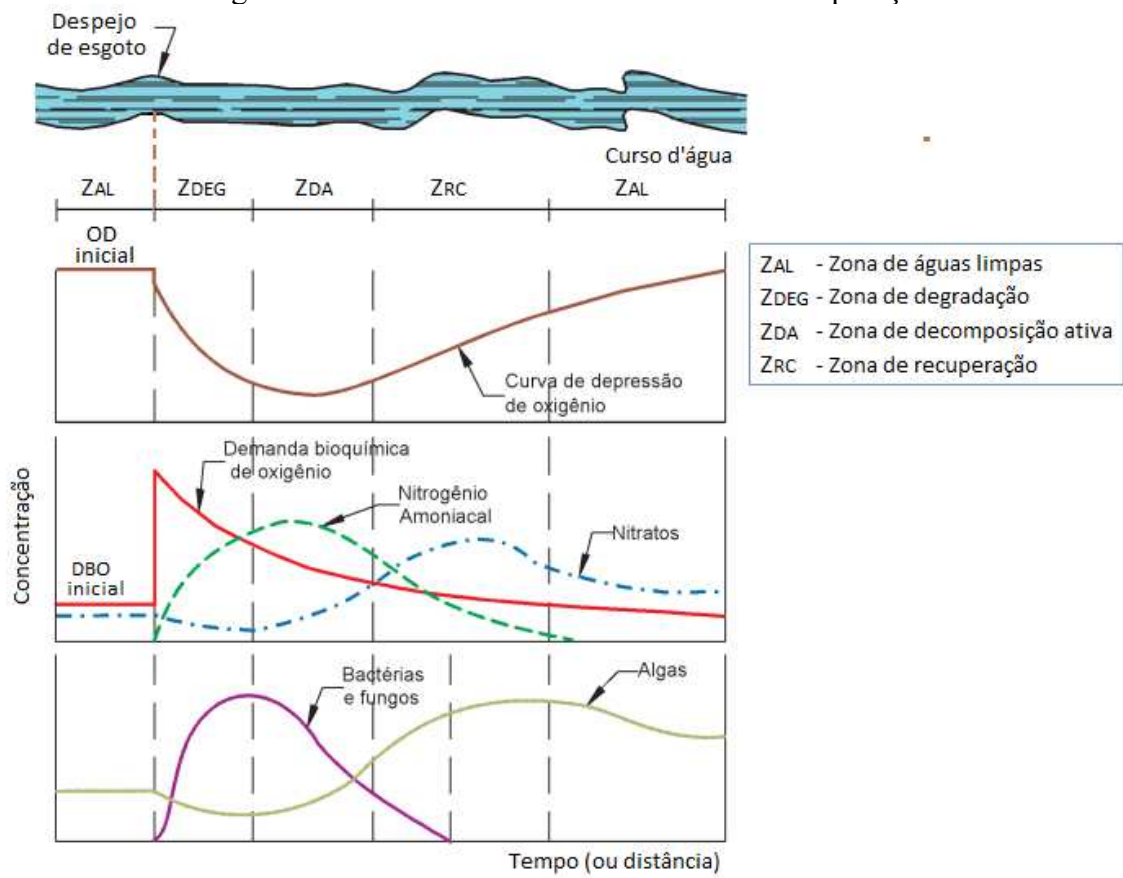
Quadro 1 – Doenças associadas às águas poluídas.

<b>Associação na água</b>	<b>Descrição</b>	<b>Doenças</b>
<b>Transmitidas</b>	Causadas pela ingestão, em geral, de água contaminada	Amebíase, disenterias (viróticas e bacterianas), febre tifóide, cólera, dentre outras
<b>Relacionadas</b>	Causadas por organismos que se desenvolvem na água e são hospedeiros intermediários de patógenos. Dá-se por contato, ingestão da água ou alimentos que tiveram contato	Filariose, esquistossomose e parasitoses em geral
<b>Por escassez</b>	Relativa à higiene e limitada pela escassez de água	Escabiose, tracoma, câncer de pênis, doenças odontológicas, dentre outras
<b>Vetores biológicos</b>	Transmitidas por vetores que se desenvolvem na água	Malária, febre amarela, dengue, chicungunha, etc
<b>Contaminantes químicos</b>	Resultam de processos industriais, uso de insumos ou como resíduos de descarte ou armazenamentos. Envolve um grande espectro de compostos, que podem ser inorgânicos, como metais pesados ou orgânicos, como pesticidas e solventes	Inflamações por toxicidade, desequilíbrio metabólico, alterações em nível celular que levam à mutagênese, teratogênese e, carcinogênese
<b>Contaminantes emergentes</b>	Produtos excretados vai metabolismo humano, como hormônios, analgésicos, antibióticos e fármacos em geral. Produtos residuais de difícil mensuração como microplásticos. Novos agentes biológicos causadores de doenças	Inflamações do organismo, desequilíbrio metabólico, resistência ao tratamento por antibiótico, alterações em nível celular (mutagênese, teratogênese e, carcinogênese). Novas doenças de caráter infeccioso, por “novos” vírus e bactérias

Fonte: adaptado de Cairncross e Feachem (2019); Petrie, Barden e Kasprzyk-Hordern (2015).

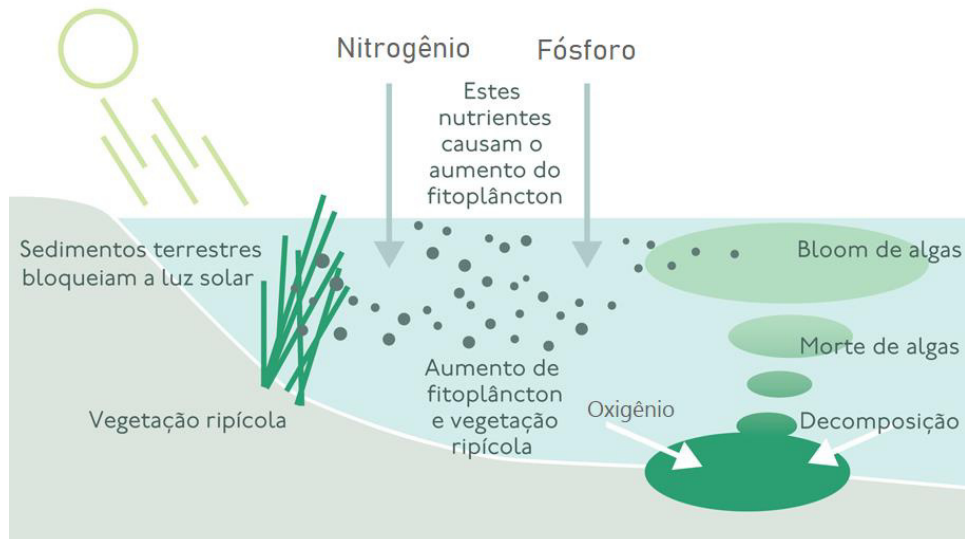
O excesso de nitrogênio e fósforo (N e P) acelera o fenômeno da eutrofização. Os nutrientes são necessários à produtividade primária. O esgoto não tratado disponibiliza maiores quantidades de N e P, causando crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas. Esse crescimento exagerado tem sério impacto sobre a biota da água, com redução de espécies, e sobre a qualidade dela (LIMA *et al.*, 2020). A esse processo acelerado dá-se o nome de eutrofização artificial (MOTA, 1995; TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008). As Figuras 4 e 5 ilustram a eutrofização natural e artificial enquanto fenômenos.

Figura 3 – Sistema DBO/OD e a curva de autodepuração.



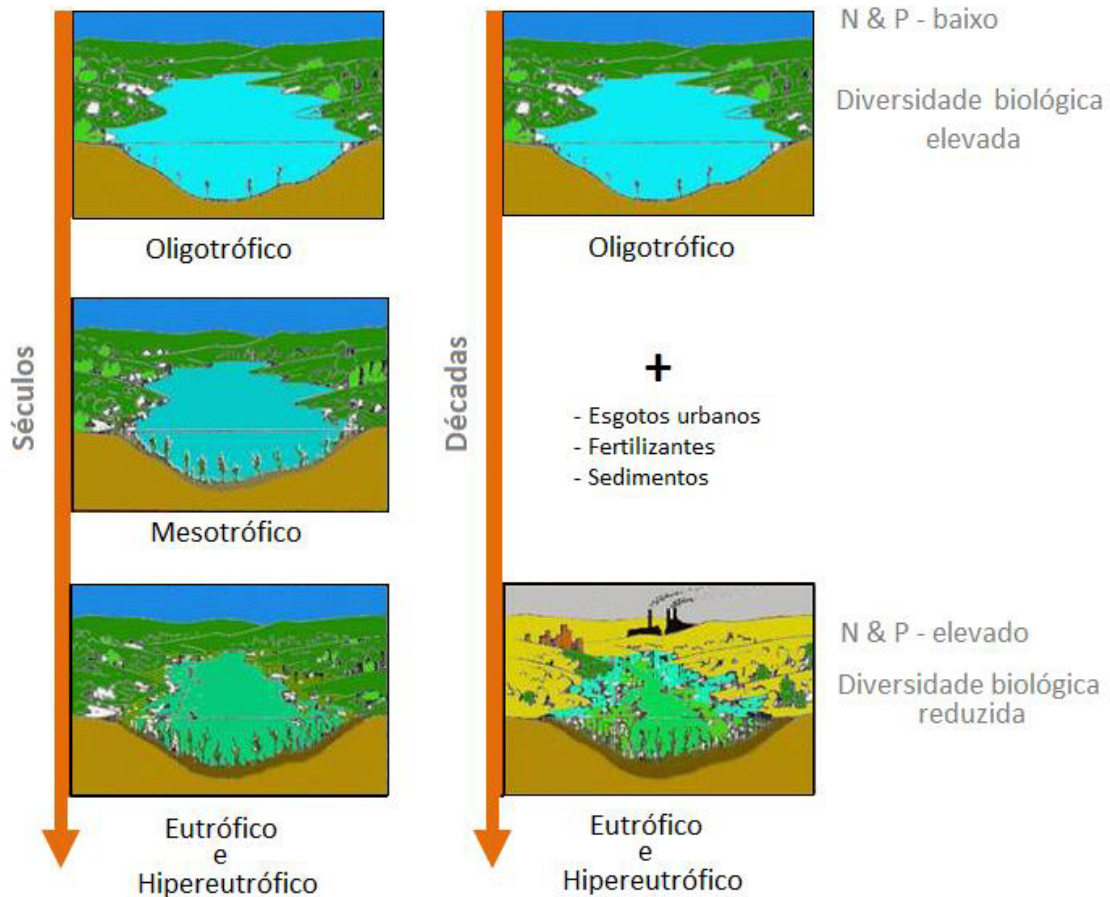
Fonte: adaptado de Mota (1995).

Figura 4 – Representação simplificada do processo de eutrofização.



Fonte: adaptado de Mota (1995) e Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008).

Figura 5 – Representação comparativa entre eutrofização natural e artificial.



Fonte: adaptado de Mota (1995) e Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008).

## 2.4 Lagoas de estabilização para tratar esgotos sanitários

Mara (2004) sintetiza lagoas de estabilização como: grandes tanques de pequena profundidade, definidas por dique de terra, destinadas a tratar águas residuárias brutas através de processos naturais, envolvendo algas e bactérias. Von Sperling (2002) destaca que as lagoas de estabilização se apresentam como uma tecnologia simples, de baixo custo operacional e efetiva capacidade na remoção de matéria orgânica e patógenos. Pode ainda obter remoção considerável de nitrogênio amoniacal. Os principais tipos de lagoas de estabilização estão descritos na Tabela 1.

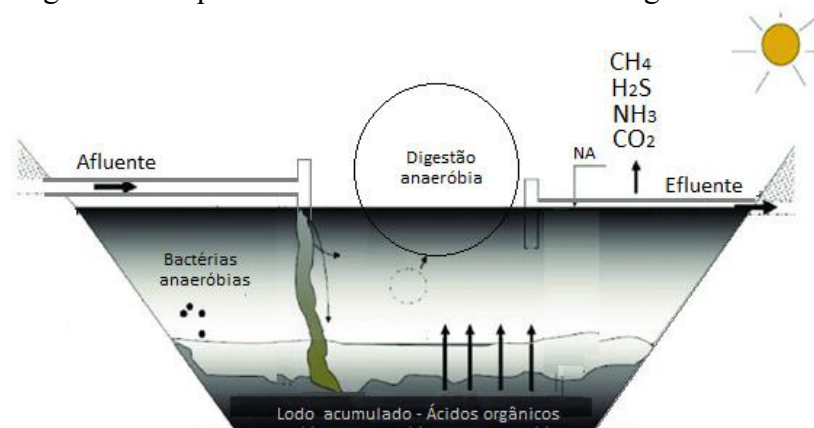
Tabela 1 – Principais tipos de lagoas de estabilização e suas características.

Tipo de Lagoa	Caraterísticas	Carga orgânica aplicada	TDH (dias)	Profundidade (m)
Anaeróbia	Recebem elevadas cargas orgânicas Objetiva à remoção de matéria orgânica Processo de digestão anaeróbia Desprovidas de OD na coluna líquida	150 a 350 g DBO/m <sup>3</sup> .dia	1 a 5	2,5 a 4,5
Facultativa	Coexistência de processos anaeróbios e aeróbios Variação de OD e pH na coluna líquida ao longo do dia	200 a 400 kg DBO/ha.dia	15 a 45	1,5 a 2,0
Maturação	Predomínio de processo aeróbio Objetivam à remoção de patógenos Valores médios de pH e OD elevados Variação de OD e pH na coluna líquida ao longo do dia	175 a 400 kg DBO/ha.dia	≥ 5	1,0 a 1,5

Fonte: adaptado de Von Sperling (2002) e Mara (2004).

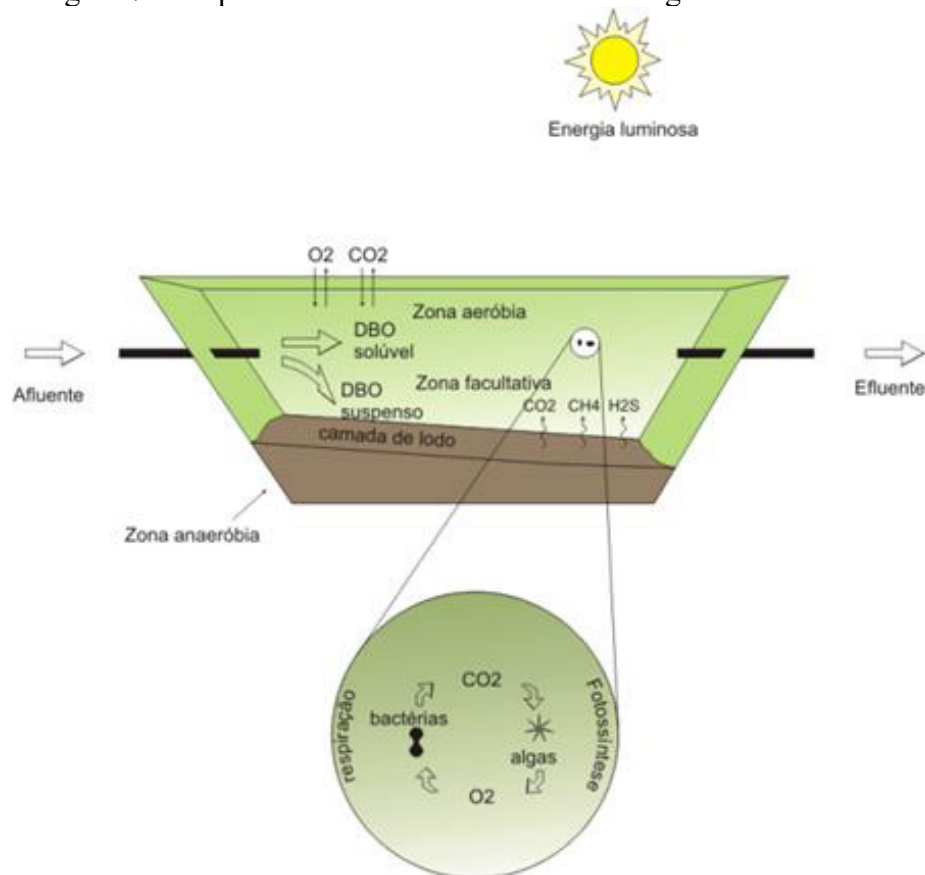
O funcionamento de lagoas parte de processo com interações complexas. As Figuras 6 e 7 mostram de maneira simplificada, o que ocorre em lagoas anaeróbias e facultativas. As lagoas de maturação têm funcionamento semelhante às lagoas facultativas, porém praticamente sem influência da camada inferior. Assim, a remoção de matéria orgânica é irrelevante, mas é significativo o processo de redução do conteúdo de patógenos.

Figura 6 – Esquema de funcionamento de uma lagoa anaeróbia.



Fonte: adaptado de Von Sperling (2002).

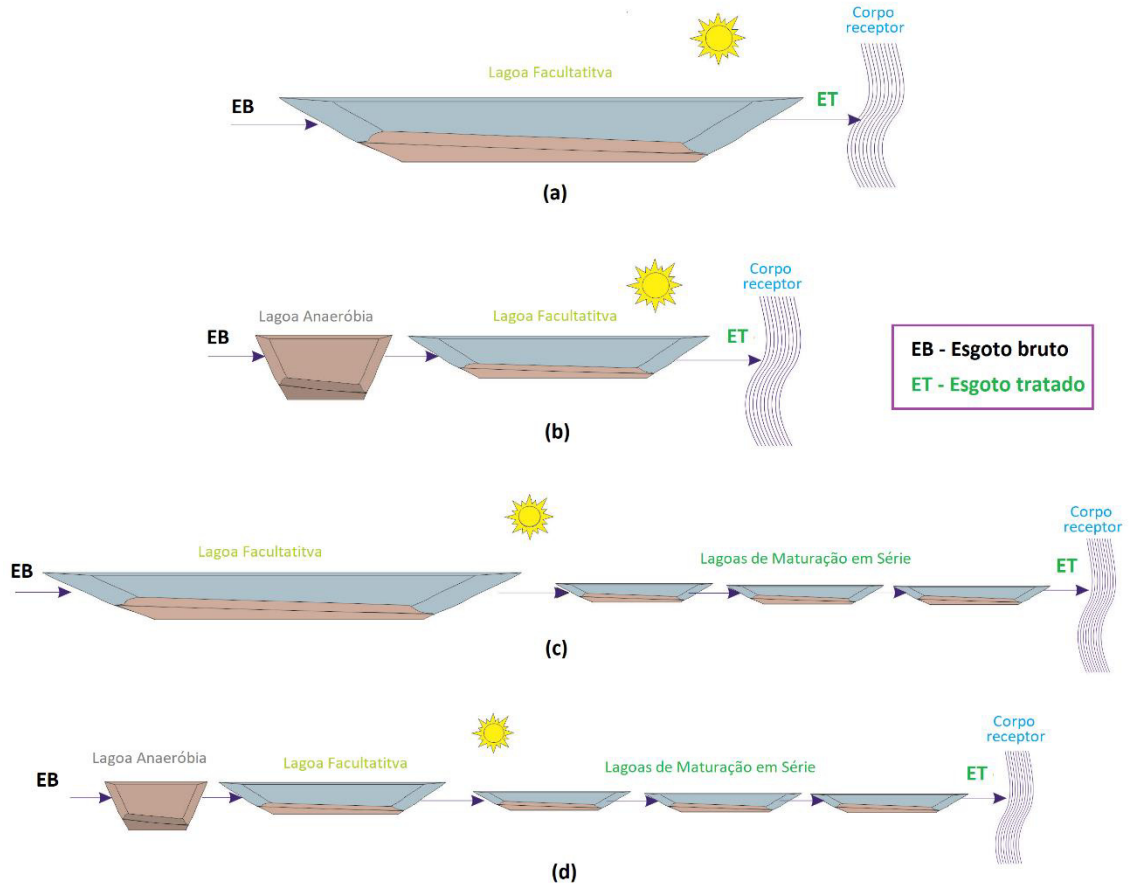
Figura 7 – Esquema de funcionamento de uma lagoa facultativa.



Fonte: adaptado de Von Sperling (2002).

O tratamento de esgotos por lagoas de estabilização permite diferentes configurações, incluindo com outros perfis tecnológicos. A Figura 8 mostra os arranjos mais comuns. Inicia-se com uma única célula (lagoa facultativa), seguida por arranjos com séries de lagoas. Cabe destacar que a adição de lagoas às séries permite a obtenção de um efluente de melhor qualidade. Ao mesmo tempo, o uso de unidades anaeróbicas no início de séries possibilita a redução de área na ETE, conforme destacam Von Sperling (2002) e Mara (2004). Há que ressaltar ainda, uma distinção conceitual: quando a lagoa facultativa recebe esgoto bruto, esta é denominada lagoa facultativa primária; quando recebe esgoto pré-tratado em unidade anaeróbica, é denominada lagoa facultativa secundária.

Figura 8 – Configurações mais comuns em sistemas de lagoas de estabilização.



Fonte: adaptado de Von Sperling (2002).

Os sistemas de lagoas de estabilização permitem remoções de DBO variando entre 70 e 90%. No caso de coliformes termotolerantes, as remoções médias que variam de 1,50 a 4,50 unidades de  $\text{Log}_{10}$  (*i.e.* 96,840 a 99,997%). As remoções de nitrogênio amoniacal podem chegar até 90%.

## 2.5 Características normativas do efluente tratado

As normas de controle da qualidade do despejo efluentes partem da Resolução CONAMA 357 (2005). Dessa norma deriva a Resolução CONAMA 430 (2011), que estabelece os critérios sobre lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários. Individualmente, as demais unidades federativas podem dispor de normas próprias, desde que se estas sejam submissas às diretrizes de ordem superior. Dessa maneira, Estados e Municípios podem apenas propor limites iguais ou mais restritivos, de forma a favorecer a qualidade do ambiente.

Morais e Santos (2019) fizeram um estudo compilativo e mostraram que além da

CONAMA 430 (2011), pelos menos 21 estados possuem normas próprias. A Tabela 2 mostra os valores relativos aos limites de despejo de efluentes. A Tabela 3, por sua vez, trata da faixa de remoção de poluentes, com base em esgotos sanitário típico e limites de despejo. Ressalve-se, que a remoção de coliformes termotolerantes deve ser expressa em unidades de Log<sub>10</sub> para que se melhore a percepção de eficiência.

Tabela 2 – Estatística descritiva compilada dos limites de poluentes contidos em efluentes a serem despejados no ambiente.

Descritor	Parâmetros de monitoramento							
	pH	DQO	DBO	SST	NT	NAM	PT	CTT
μ	7,2	216	89	104	15,8	10,1	2,2	2,90E+04
Q <sub>50%</sub>	8,0	200	80	100	17,5	5,0	2,0	1,00E+04
σ	1,4	91	43	42	4,9	8,4	1,3	4,54E+05
Mín	5,0	60	30	40	10	0,5	1,0	1,00E+03
Máx	9,0	400	180	180	20	20,0	4,0	1,00E+06

DBO - demanda bioquímica de oxigênio; DQO - demanda bioquímica de oxigênio; SST – sólidos suspensos totais; NT – nitrogênio total; NAM – nitrogênio amoniacal; PT – fósforo total e CTT – coliformes termotolerantes.

Fonte: adaptado de Morais e Santos (2019).

Tabela 3 – Remoção dos principais poluentes a serem despejados por ETEs.

Parâmetro	Média	Intervalo
DQO <sup>a</sup>	70	60 a 90
DBO <sup>a</sup>	75	60 a 90
SST <sup>a</sup>	55	20 a 90
NT <sup>b</sup>	68	60 a 80
NAM <sup>b</sup>	71	43 a 98
PT <sup>b</sup>	71	47 a 87
CTT <sup>b</sup>	3,699	1,699 a 4,699

<sup>a</sup>Remoções baseadas no trabalho de Morais e Santos (2019); <sup>b</sup>Remoções baseadas em EB com concentrações de NT, AMT, PT e CTT de 55 mg N/L, 35 mg N/L, 7,5 mg P/L e 5,0x10<sup>7</sup> Células/100 mL, respectivamente.

Fonte: Os valores foram adaptados de Silva e Bezerra (2005) e Von Sperling (2014).

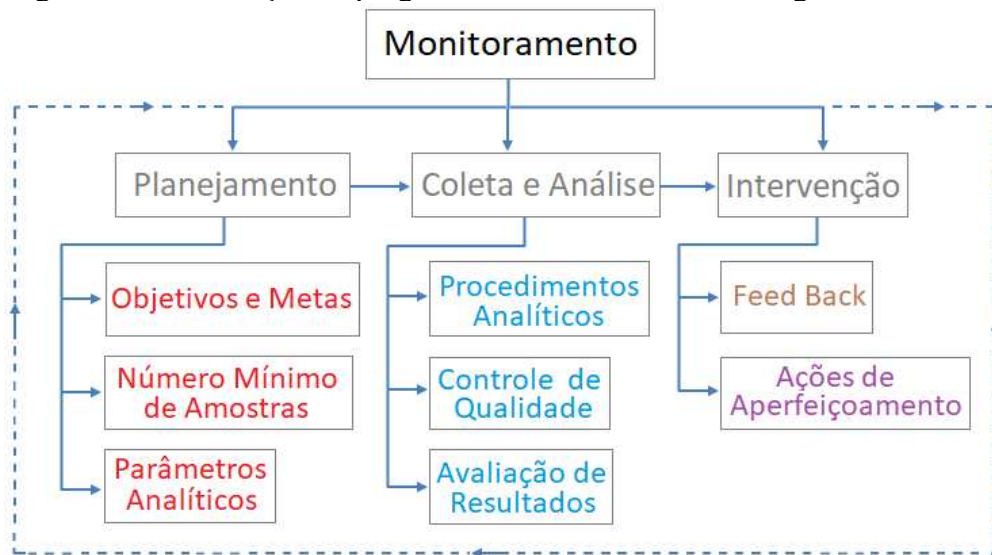
## 2.6 Monitoramento da qualidade de efluentes

Derísio (2012) ressalta que o acompanhamento de dados de qualidade da água, incluindo efluentes, são definidos nos seguintes tipos como estudos: a) monitoramento (*monitoring*); b) vigilância (*surveillance*), e; c) especial (*survey*). O primeiro tipo é o regularmente empregado. Os demais exigem condições específicas, como risco elevado de falhas e consequência destas, ou exigência de graus bastante restritos de garantia.

O objetivo do monitoramento de efluentes é verificar se a ETE atende às

especificações de performance esperada e conformidade com a norma ambiental. No entanto, há variações de resultados ao longo do tempo, sendo necessário conhecer o grau de atendimento da norma ou metas preconizadas em projeto. A consecução do monitoramento de uma ETE deve considerar as fases de planejamento, implementação (coleta e análise) e intervenção. Nessa última depende-se fortemente do retorno (*feed back*) dado pela avaliação e análise dos resultados. A fase de intervenção é o fechamento para retorno aos objetivos e metas (DA SILVA, 2020). A estruturação de um programa de monitoramento de águas e efluentes é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Estruturação de programas de monitoramento de águas e efluentes.



Fonte: adaptado de da Silva (2020).



### 3 MÉTODO DE PESQUISA

#### 3.1 O sistema de lagoas de estabilização do estudo

A estação de tratamento de esgoto (ETE Ponta Negra) está localizada na zona sul da cidade de Natal/RN (5° 45' 42" de latitude sul e 35° 12' 34" de Longitude Oeste, 41 m a.n.m.) (ARAÚJO, 2017). A Figura 10 mostra a localização do estado do Rio Grande do Norte em relação ao país e à região nordeste.

A ETE atende à população do bairro de Ponta Negra, Via Costeira e algumas residências do bairro de Mãe Luiza, existindo uma previsão para ampliar sua área de atendimento incluindo o bairro de cidade Jardim e Capim Macio. Todo o sistema de esgotamento é constituído por rede coletora (extensão total de 76.092 metros), estações elevatórias, tratamento preliminar, lagoas de estabilização em série e disposição do efluente final no solo.

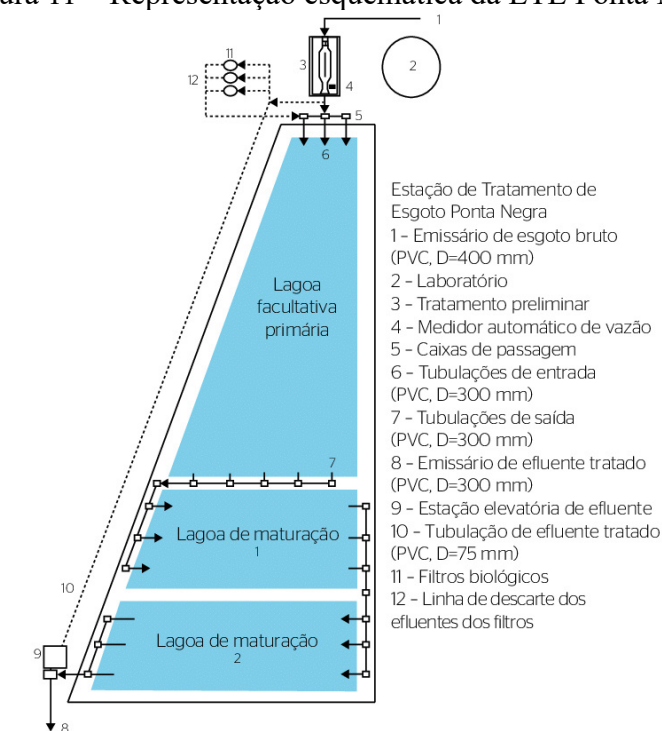
Figura 10 – Localização do Rio Grande Norte, Região Nordeste do Brasil.



Fonte: adaptação do autor (2021).

O sistema de Ponta Negra é composto por de três lagoas de estabilização, sendo a primeira uma lagoa facultativa primária (LFP), seguida de uma lagoa de maturação primária (LMP) e, esta, por uma lagoa de maturação secundária (LMS). A representação esquemática é mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática da ETE Ponta Negra.



Fonte: Araújo *et al.* (2016).

### 3.2 Dados do estudo

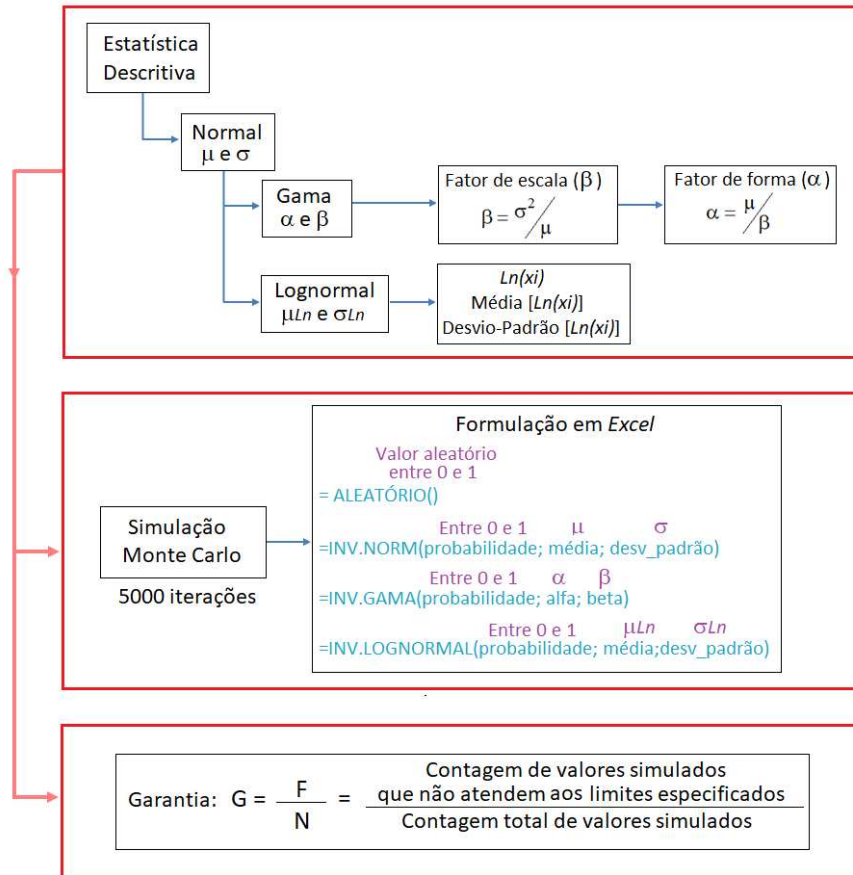
Para consecução dos objetivos foram considerados os seguintes parâmetros analíticos da qualidade do efluente do sistema de lagoas de Ponta Negra: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), amônia (AMT), pH, temperatura (temp.) e coliformes termotolerantes (CTT). Ao todo foram coletadas 25 amostras no período de janeiro de 2014 a novembro de 2017, referente aos esgotos bruto (EB) e esgoto tratado (ET), efluente da última lagoa de maturação. As coletas foram pontuais, no período da manhã.

### 3.3 Abordagem

Inicialmente procedeu-se o cômputo da estatística descritiva de EB e ET, para avaliação do desempenho médio, no formato entrada/saída (E/S). Logo após, efetuou-se uma simulação Monte Carlo com os parâmetros DBO, DQO, amônia, pH e CTT. Foram empregadas as distribuições teóricas: *Normal*, *Gama* e *Lognormal*. Assim, de posse da média ( $\mu$ ) e desvio-padrão ( $\sigma$ ) da *Normal* teórica. Em seguida, calcularam-se os fatores de escala ( $\beta$ ) e de forma ( $\alpha$ ) da distribuição Gama. Para a função *Lognormal*, a média ( $\mu_{Ln}$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma_{Ln}$ )

foram computados a partir da transformada com Ln (Logaritmo natural). A Figura 12 descreve o processo de forma minudente.

Figura 12 – Procedimento para simulação Monte Carlo com os dados de qualidade do efluente tratado do sistema de lagoas de Ponta Negra.



Fonte: adaptado de da Silva (2020).

O cálculo das garantias com base na simulação Monte Carlo tomou como referência os valores limites mostrados na Tabela 4. Construiu-se um *set* com graus de restrição decrescente. Assim, o Grau 1 propõe o nível mais elevado de restrição, seguido do Grau 2, do Grau 3, finalizando com o Grau 4, que é o menos restrito.

Tabela 4 – Graus de restrição e respectivos limites valores limites.

Parâmetro	Grau de restrição			
	1	2	3	4
DBO	$\leq 60$	$\leq 80$	$\leq 100$	$\leq 120$
DQO	$\leq 150$	$\leq 200$	$\leq 250$	$\leq 300$
NAM	$\leq 10,0$	$\leq 12,5$	$\leq 15,0$	$\leq 20,0$
pH	7,0 a 7,5	6,5 a 8,0	6,5 a 8,5	6,0 a 9,0
CTT	$\leq 2000$	$\leq 5000$	$\leq 7500$	$\leq 10000$

Fonte: o autor (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Desempenho do sistema de lagoas de estabilização

A Tabela 5 apresenta os resultados, através de resumo de estatística descritiva, dos esgotos bruto (EB) e tratado (ET) da ETE Ponta Negra, no período de janeiro de 2014 a novembro de 2017. Com base nos valores de DBO e DQO o EB pode ser considerado esgoto do tipo médio a forte, em concordância com Mara (2004).

O resumo descritivo mostrou ainda coeficientes de variação ( $CV = [\text{desvio-padrão}]/\text{média}$ ) muito semelhantes entre parâmetros representado o EB e ET. Entretanto, os valores de CV foram um pouco maiores no efluente tratado, no caso dos parâmetros DBO, DQO e CTT, e u, pouco menores no caso dos parâmetros AMT, pH e temperatura. A flutuação de biomassa algal pode impactar de forma mais significativa o conteúdo orgânico e o decaimento de CTT.

Tabela 5 – Estatística descritiva dos esgotos bruto e tratado no sistema de lagoas de estabilização Ponta Negra, RN.

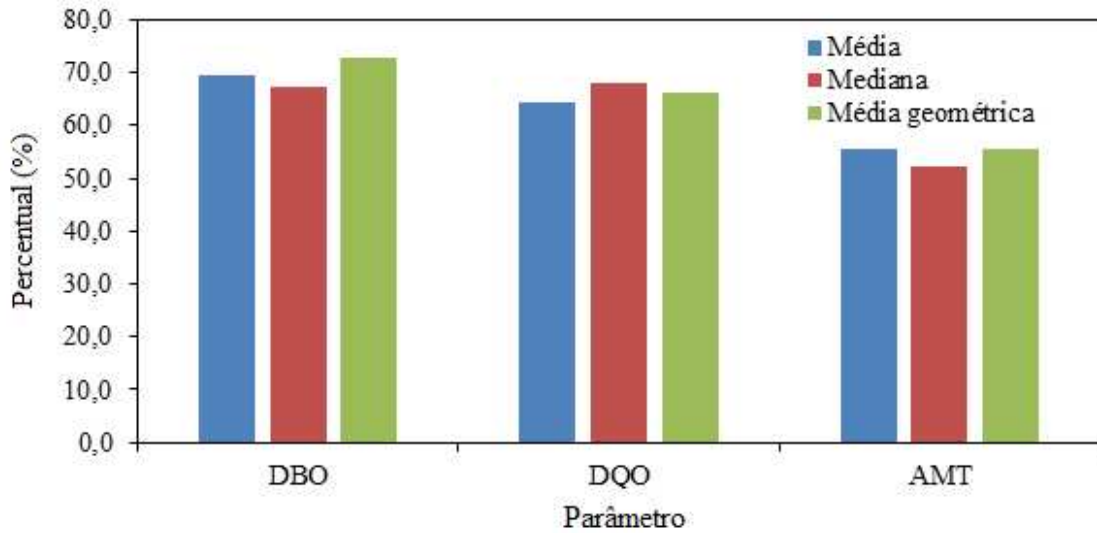
Descritor estatístico	Esgoto Bruto (EB)					
	<i>DBO</i> (mg/L)	<i>DQO</i> (mg/L)	<i>AMT</i> (mg N/L)	<i>pH</i> (und)	<i>Temp</i> (°C)	<i>CTT</i> (NMP/100 ml)
Mínimo	115	417	28,6	6,70	24,0	2,60E+07
Média	436	867	47,3	7,38	30,1	1,74E+11
Mediana	433	758	44,9	7,50	30,0	1,60E+10
Média geométrica	395	795	45,5	7,37	30,0	1,09E+10
Máximo	1059	2642	73,5	8,10	32,0	1,60E+12
CV	0,447	0,513	0,284	0,050	0,054	2,549
-	Esgoto tratado (ET)					
Mínimo	20	109	9,2	6,70	24,0	1,30E+03
Média	133	308	21,0	7,40	27,5	9,93E+04
Mediana	141	242	21,4	7,40	28,0	1,50E+04
Média geométrica	107	269	20,2	7,39	27,5	1,96E+04
Máximo	291	902	31,6	7,90	29,0	1,60E+06
CV	0,577	0,632	0,244	0,036	0,039	3,256

Fonte: o autor (2021).

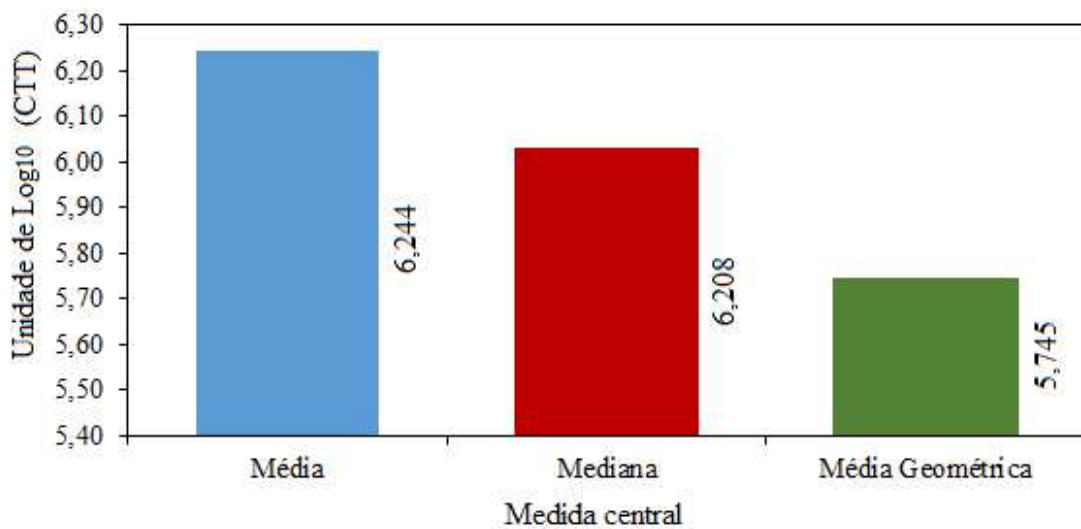
As remoções de DBO, DQO e AMT estão representadas na Figura 13 (a), que mostra os resultados para as medidas centrais médias, mediana e média geométrica. Para

remoção de CTT, os valores (unidade de  $\text{Log}_{10}$ ) estão na figura 13 (b). Os resultados correspondem à expectativa de desempenho mostrado na Tabela 3.

Figura 13 – Remoção de DBO, DQO e AMT (%) e de CTT (unidades de  $\text{Log}_{10}$ ) com base em três medidas centrais na ETE Ponta Negra.



(a)



(b)

Fonte: o autor (2021).

#### 4.2 Garantia probabilística para as funções e parâmetros selecionados

A Tabela 6 contém os percentuais de garantia para DBO, DQO, AMT, pH e CTT, a partir das distribuições Normal, Gama e Lognormal. Em geral, a garantia (G) ficou ordenada da seguinte forma:  $G_{CTT} < G_{AMT} < G_{DBO} < G_{DQO} < G_{pH}$ . Entretanto, um teste de aderência, seguido de teste de verificação de adequabilidade de modelo (FDP) poderia apontar um

resultado mais preciso. Destaca-se que a determinação de qual distribuição seria mais apropriada, foge ao escopo do presente estudo.

Tabela 6 – Garantia probabilística no atendimento aos limites especificados, com as distribuições Normal, Gama e Lognormal (simulação com 5000 interações).

<b>Parâmetro/Limite</b>	<b>Distribuição</b>		
	<i>Normal</i>	<i>Gama</i>	<i>Lognormal</i>
<b>DBO (mg/L)</b>			
≤ 60	17,3%	15,8%	22,0%
≤ 80	24,0%	26,6%	34,6%
≤ 100	32,4%	39,1%	46,8%
≤ 120	43,2%	51,0%	56,6%
<b>DQO (mg/L)</b>		-	
≤ 150	20,3%	23,0%	12,7%
≤ 200	28,0%	32,6%	27,1%
≤ 250	37,9%	45,8%	44,1%
≤ 300	48,3%	57,2%	59,0%
<b>Amônia (mg N/L)</b>		-	
≤ 10,0	1,9%	0,5%	0,9%
≤ 12,5	5,1%	3,4%	5,0%
≤ 15,0	12,7%	12,0%	15,5%
≤ 20,0	42,5%	45,9%	48,5%
<b>pH</b>		-	
7,0 a 7,5	59,4%	59,9%	59,8%
6,5 a 8,0	98,9%	98,8%	98,6%
6,5 a 8,5	99,9%	99,9%	100,0%
6,0 a 9,0	100,0%	100,0%	100,0%
<b>CTT (NMP/100 mL)</b>		-	
≤ 2000	37,8%	58,5%	5,2%
≤ 5000	38,1%	63,7%	18,7%
≤ 7500	38,5%	65,8%	26,1%
≤ 10000	38,8%	67,6%	32,2%

Fonte: o autor (2021).

Na Tabela 7 é mostrada a redução do nível de garantia (G), em função do incremento do grau de restrição. Em termos gerais, a resposta à alteração do grau de restrição pode ser conformada da seguinte maneira: pH < CTT < DBO < DQO < AMT. Novamente, há que se pesar o efeito da distribuição que representa o conjunto amostral de cada parâmetro.

Tabela 7 - Efeito da alteração dos valores limites nos respectivos graus de restrição sobre a garantia probabilística (G).

Parâmetro	Variação de grau de restrição	Variação do limite	Redução da garantia		
			<i>Normal</i>	<i>Gama</i>	<i>Lognormal</i>
DBO (mg/L)	Grau 4 → Grau 1	120 → 60	60,0%	69,0%	61,1%
	Grau 4 → Grau 2	120 → 80	44,4%	47,8%	38,9%
	Grau 4 → Grau 3	120 → 100	25,0%	23,3%	17,3%
DQO (mg/L)	Grau 4 → Grau 1	300 → 150	58,0%	59,8%	78,5%
	Grau 4 → Grau 2	300 → 200	42,0%	43,0%	54,1%
	Grau 4 → Grau 3	300 → 250	21,5%	19,9%	25,3%
AMT (mg N/L)	Grau 4 → Grau 1	20,0 → 10,0	95,5%	98,9%	98,1%
	Grau 4 → Grau 2	20,0 → 12,5	88,0%	92,6%	89,7%
	Grau 4 → Grau 3	20,0 → 15,0	70,1%	73,9%	68,0%
pH	Grau 4 → Grau 1	6,0 a 9,0 → 7,0 a 7,5	40,6%	40,1%	40,2%
	Grau 4 → Grau 2	6,0 a 9,0 → 6,5 a 8,0	1,1%	1,2%	1,4%
	Grau 4 → Grau 3	6,0 a 9,0 → 6,5 a 8,5	0,1%	0,1%	0,0%
CTT (cél./100 mL)	Grau 4 → Grau 1	$1,0 \times 10^4 \rightarrow 2,0 \times 10^3$	2,6%	13,5%	83,9%
	Grau 4 → Grau 2	$1,0 \times 10^4 \rightarrow 5,0 \times 10^3$	1,8%	5,8%	41,9%
	Grau 4 → Grau 3	$1,0 \times 10^4 \rightarrow 7,5 \times 10^3$	0,8%	2,7%	18,9%

Fonte: o autor (2021).



## 5 CONCLUSÕES

O estudo possibilitou concluir o seguinte que o sistema de lagoas de Ponta Negra alcançou remoções médias de 70,0; 66,2; 54,5% para DBO, DQO e amônia total, respectivamente. Quanto à densidade de coliformes termotolerantes, a remoção média foi de 5,9 unidades de  $\text{Log}_{10}$ . O desempenho alcançado pode ser considerado satisfatório se levada em contas as características da tecnologia de tratamento e a concepção de projeto.

Além disso, os valores de garantia probabilística (G) variaram de acordo com os parâmetros. Em geral, a garantia (G) ficou ordenada da seguinte forma:  $G_{\text{CTT}} < G_{\text{AMT}} < G_{\text{DBO}} < G_{\text{DQO}} < G_{\text{pH}}$ . Foi observado ainda que para diferentes graus de restrição (*i.e.* valores limites para despejo) a resposta à alteração apontou a seguinte ordem:  $\text{pH} < \text{CTT} < \text{DBO} < \text{DQO} < \text{AMT}$ .

A função estatística teórica de cada parâmetro exige um teste de aderência, seguido de teste de verificação de adequabilidade de modelo. Somente assim seria possível apontar um resultado mais preciso, dessa forma, a metodologia de estrutura é ferramenta importante para avaliar o desempenho de ETE e auxiliar para redução da poluição dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A.L.C. **Avaliação operacional e da eficiência de lagoas de estabilização no estado do Rio Grande do Norte**. In: FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. VIII Caderno de pesquisa em engenharia de saúde pública (pp. 39-71). Brasília - DF: Ed. FUNASA. Brasília, 2017.

ARAÚJO, G.M.; LIMA NETO, I.E.; ARAÚJO, A.L.C.; DA SILVA, M.C.R. Avaliação experimental e modelagem matemática de filtros anaeróbios como alternativa de baixo custo para remoção de algas de efluentes de lagoas de estabilização. **Eng Sanit Ambient.**, v. 21, n.4, p. 687-696, out/dez, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016134641

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro - RJ, novembro de 1986. 5 p.

BRASIL, **Resolução CONAMA nº357**, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U.

BRASIL, **Resolução CONAMA nº430**, de 30 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Publicado no D.O.U.

CAIRNCROSS, S.; FEACHEM, R. **Environmental health engineering in the tropics - water, sanitation and disease control**. Third edition. London, 2019. 365 p.

DA SILVA, F.J.A. **Qualidade da água e controle da poluição**. Notas de Aula da Disciplina TD0954. Curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

DERÍSIO, J.C. **Introdução ao controle da poluição ambiental**. 4ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 226p.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 7ª edição. Rio de Janeiro: ABES, 2014. 1087p.

LIMA, G.R.R.; SOUZA, S.O.; ALENCAR, F.K.M.; ARAÚJO, A.L.; da SILVA, F.J.A. O que comunicam os índices de qualidade de água e de estado trófico em um reservatório do semiárido brasileiro? **Geociências**, v. 39, p. 181-190, 2020. DOI: 10.5016/geociencias.v39i1.14206

MARA, D. D. **Domestic wastewater treatment in developing countries**. Earthscan. London, 2004. 293 p.

MORAIS, N.W.S.; SANTOS, A.B. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAE**, n. 15, v. 67, p. 42-55, 2019. DOI: 10.4322/dae.2019.004.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 6ª edição. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Rio de Janeiro, 2012. 280 p.

MOTA, S. **Preservação e conservação de recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Editora ABES, 1995. 222p.

PETRIE, B.; BARDEN, R.; KASPRZYK-HORDERN, B. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. **Water Research** v. 72, p. 3-27, 2015.  
DOI:10.1016/j.watres.2014.08.053

SOUZA, C.M.N.; COSTA, A.M.; MORAES, L.R.S.; FREITAS, C.M. **Saneamento: promoção da saúde, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental**. Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, RJ, 2015. 140p.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. Oficina de Textos. São Paulo, 2008.

VARELA, A.R.; MANAIA, C.M. Human health implications of clinically relevant bacteria in wastewater habitats. **Environmental Science Pollution Research** v. 20, p. 3550–3569, 2013.  
DOI: 10.1007/s11356-013-1594-0

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade da água e ao tratamento de esgoto**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, Editora UFMG, 2014. 452p.

VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. In: **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Volume 3. 2ª Edição. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2002. 196 p.