



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DIONY DO NASCIMENTO GOMES

**O EFEITO DAS VARIAÇÕES SAZONAIS NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO CEARÁ**

FORTALEZA

2024

DIONY DO NASCIMENTO GOMES

O EFEITO DAS VARIAÇÕES SAZONAIS NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Química do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^ª. Ma. Renata Félix de Lima.

FORTALEZA

2024

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)

G613e Gomes, Diony do Nascimento.

O efeito das variações sazonais nos parâmetros de qualidade de uma estação de tratamento de água no Ceará / Diony do Nascimento Gomes. – 2024.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Ma. Renata Félix de Lima.

1. Parâmetros de qualidade. 2. Tratamento de água. 3. Aprendizado de máquina. I. Título.

CDD 660

DIONY DO NASCIMENTO GOMES

O EFEITO DAS VARIAÇÕES SAZONAIS NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Química do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 18/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Ma. Renata Félix de Lima (Orientadora)

Prof^a Dr^a. Andréa da Silva Pereira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Vasconcelos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado, me protegendo, enviando forças e discernimento para enfrentar os desafios da vida. Minha eterna gratidão aos meus pais, Jonas e Antônia, por acreditarem no meu potencial, me apoiarem incondicionalmente todas decisões e por sonharem meus sonhos junto comigo. Às minhas irmãs, Glauba e Gardelia, por estarem sempre ao meu lado, pelo companheirismo e incentivo constantes. Aos meus queridos sobrinhos, Juliany Vitória, Yasmin e Aristeu Neto, por todo carinho e compaixão.

Aos meus amigos, Acácio e Joana, que mesmo à distância, compartilhavam comigo a rotina, os sonhos e sempre nos incentivávamos mutuamente.

Aos meus amigos, Douglas Ferreira, Vitória Andrade e Vitor Monteiro, por estarem presentes tanto nos momentos de alegria quanto nos de tristeza. Vocês foram amigos incríveis e, sem a presença de vocês, tudo teria sido muito mais difícil. Meus sinceros agradecimentos.

A todos os amigos que conheci durante a graduação, com destaque para: Amanda Bezerra, Dayane Wendy, Daniele Pereira, Mikaelly Sousa, Lyssandra Lucas e Larissa Pinheiro. Obrigada por todo apoio, por todos os momentos de alegria e pelas conversas, sejam elas sobre estudos ou sobre a vida.

Aos professores da Engenharia Química, com destaque para Hiluy e Diana, e especialmente à professora Andréa, por estar sempre disponível, seja para compartilhar seu vasto conhecimento ou para conversar sobre a vida cotidiana. Muito obrigado por todo o seu apoio. Aos professores, orientadores e colegas de iniciação científica do Laboratório de Visualização e Simulação Molecular, em especial Mardonio Lucena, Daniel Vasconcelos e Alexandre de Oliveira, pelas reflexões, críticas, sugestões e valiosas contribuições

À PETROBRAS, à ASTEF e ao CNPQ, pelas bolsas de Iniciação Científica e por todos os recursos concedidos.

Aos meus colegas do Laboratório de Controle de Qualidade, deixo meus mais sinceros agradecimentos pelas oportunidades de aprendizado e crescimento.

Por fim, à minha orientadora Renata Félix, alguém que admiro por sua excelência profissional, inteligência e empatia. Obrigado por sua disponibilidade e por suas valiosas sugestões ao longo dessa jornada.

“A vida me ensinou a nunca desistir.”

(Charlie Brown Jr.)

RESUMO

Em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), correlacionaram-se os parâmetros de qualidade da água (bruta e tratada) com os índices pluviométrico, avaliou-se a eficiência de tratamento e previram-se as dosagens dos produtos químicos utilizando aprendizado de máquina, no período de 2020 e 2023. Acompanharam-se os parâmetros cor, turbidez, cloro residual livre, coliformes totais e *Escherichia coli*. Testaram-se os modelos de aprendizado de máquina do tipo regressão polinomial e XGBoost, avaliando-se por coeficientes de determinação (R^2) e desvio absoluto relativo médio (AARD%) para determinar qual modelo é mais adequado para prever os produtos químicos. A avaliação gráfica mostra um perfil com variações aleatórias, com aumento dos valores em estações chuvosas e em estações de estiagem, causados por lixiviação de escoamento superficial advinda por chuvas e lançamentos descontínuos de esgotos. Mesmo assim, os valores dos parâmetros estão abaixo do valor máximo permitido pela legislação brasileira. O desempenho de remoção da cor e turbidez na saída do tratamento foi superior a 90% para a maioria dos anos. Poucos casos de contaminação de coliformes totais na saída do tratamento, o que pode ser decorrente de algum evento isolado de contaminação pós-tratamento, não sendo relacionado ao tratamento. Quanto à predição das dosagens dos produtos químicos, o modelo XGBoost destacou-se como o mais eficiente, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,85 para a maioria dos produtos químicos e baixos desvio absoluto relativo médio (AARD%). Conclui-se altas concentrações dos parâmetros em alguns períodos de chuvas e de estiagem, que podem ser resultantes do escoamento superficial que transporta sedimentos e despejo de esgotos domésticos e residuais no corpo hídrico. Ainda que essas atividades naturais e antrópicas afetem os parâmetros de qualidade, seus resultados estão distantes dos valores máximos permitidos na legislação brasileira. Determinou-se um ótimo desempenho para remover cor e turbidez após a desinfecção, comprovando a eficiência do tratamento. Embora tenha sido identificado a contaminação por coliformes totais, que pode estar relacionada a eventos pontuais, o tratamento foi eficiente na maioria das vezes com a remoção dos microrganismos. A partir de métricas, comprovou-se a eficiência da aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina, como o XGBoost, apresentando resultados satisfatórios para a maioria dos produtos químicos.

Palavras-chave: Parâmetros de qualidade; Tratamento de Água; Aprendizado de Máquina.

ABSTRACT

At a Water Treatment Plant (WTP) in the Metropolitan Region of Fortaleza (MRF), water quality parameters (both raw and treated) were correlated with rainfall indices, treatment efficiency was evaluated, and chemical dosages were predicted using machine learning between 2020 and 2023. The monitored parameters included color, turbidity, free residual chlorine, total coliforms, and *Escherichia coli*. Machine learning models, specifically polynomial regression and XGBoost, were tested and evaluated using determination coefficients (R^2) and average absolute relative deviation (AARD%) to determine which model was more suitable for predicting chemical dosages. The graphical evaluation shows a profile with random variations, with parameter increases during both rainy and dry seasons, caused by surface runoff from rainfall and intermittent sewage discharges. Despite this, the parameter values remained below the maximum limits allowed by Brazilian regulations. The removal efficiency for color and turbidity at the treatment output exceeded 90% in most years. Few cases of total coliform contamination were identified post-treatment, which may be due to isolated post-treatment contamination events, unrelated to the treatment process. Regarding chemical dosage predictions, the XGBoost model proved to be the most efficient, with determination coefficients (R^2) above 0.85 for most chemicals and low average absolute relative deviation (AARD%). High concentrations of the parameters were observed during some rainy and dry periods, which may result from surface runoff carrying sediments and the discharge of domestic and industrial sewage into the water body. While these natural and human activities impact water quality parameters, their levels remain well below the maximum limits set by Brazilian legislation. Excellent performance in removing color and turbidity was observed after disinfection, confirming the treatment's efficiency. Although total coliform contamination was identified, likely due to isolated incidents, the treatment was generally effective in removing microorganisms. Based on the metrics, the application of machine learning algorithms, such as XGBoost, proved to be effective, delivering satisfactory results for most chemical dosages.

Keywords: Quality parameters; Water Treatment; Machine Learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das chuvas no Brasil nos anos de (a) 2016 e (b) 2020	19
Figura 2 – Precipitação média das estações chuvosa no Ceará (2011-2024)	21
Figura 3 – Evolução do volume dos reservatórios equivalente do Nordeste entre janeiro dos anos de 2014-2024	22
Figura 4 – Volume de armazenamento dos reservatórios do Ceará entre os anos de 1995-2023	23
Figura 5 – Fluxograma do trabalho	30
Figura 6 – Sistema do processo de água.....	31
Figura 7 – Análise de Cor	36
Figura 8 – Turbidímetro	37
Figura 9 – Análise de Cloro Residual Livre.....	38
Figura 10 – Substrato cromogênio (Colilert®)	39
Figura 11 – Cartela com coloração amarela (a) indicando a presença de coliformes totais e cartela com coloração fluorescência (b) indicando a presença de <i>E. coli</i>	40
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de aprendizado de máquina.....	42
Figura 13 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro cor na água bruta.....	44
Figura 14 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro turbidez na água bruta...	46
Figura 15 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro cor na água tratada.....	47
Figura 16 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro turbidez na água tratada.....	48
Figura 17 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro cloro residual livre na água tratada.....	49

Figura 18 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro coliformes totais na água bruta.....	50
Figura 19 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro <i>Escherichia coli</i> na água bruta.....	51
Figura 20 – Eficiência de remoção de cor aparente na saída do tratamento, análise realizada no laboratório B.....	52
Figura 21 – Eficiência de remoção de turbidez na saída do tratamento, análises realizadas nos dois laboratórios.....	53
Figura 22 – Resultados do laboratório A para o parâmetro (a) coliformes totais e (b) <i>Escherichia coli</i> na saída do tratamento.....	54
Figura 23 – Dados nas seguintes etapas: (a) sem tratamento, (b) após a remoção de outliers e (c) após a normalização.....	55
Figura 24 – Modelo de regressão polinomial e XGBoost para cada produto químico.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade e valores máximos permitidos (VMP) para água bruta e tratada.....	27
Tabela 2 – Definição das etapas das ETA e seus respectivos produtos químicos.....	28
Tabela 3 – Pontos de coletas.....	32
Tabela 4 – Quantidade de análises e os parâmetros analisados no laboratório A e B....	34
Tabela 5 – Parâmetros de qualidade, método aplicado e aparelhos.....	35
Tabela 6 – Métricas estatísticas dos modelos para cada produto químico.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AARD%	Desvio Relativo Absoluto Médio
ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRL	Cloro Residual Livre
DPD	Sulfato de N, N – Dietil – p – Fenilenediamina
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IA	Inteligência Artificial
MS	Ministério da Saúde
MUG	4-Metilumbeliferil- β -D-Glicuronídeo
NMP	Número Mais Provável
ONPG	Orto-Nitrofenil- β -D-Galactopiranisídeo
PAC 23	Cloreto de Polialumínio
R ²	Coefficiente de Determinação
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SUS	Sistema Único de Saúde
THM	Trihalometano
uT	Unidade de Turbidez
uH	Unidade de Hazen
VMP	Valor Máximo Permitido

LISTA DE SÍMBOLOS

E (%)	Eficiência
%	Porcentagem
X^N	Normalização
X_i	Valor Original
X_i^{min}	Valor Mínimo
X_i^{max}	Valor Máximo
y_i^{exp}	Dados Experimentais
y_i^{cal}	Dados de Previsão
$\overline{y_t^{exp}}$	Média das Variáveis Experimentais
N	Número Total de Dados Experimentais
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	17
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Importância da Água.....	18
2.2	Cenário Hídrico no Brasil	19
2.3	Cenário Hídrico no Ceará	20
2.4	A Qualidade de Água dos Reservatórios.....	22
2.5	Parâmetros da Qualidade da Água	24
2.5.1	<i>Cor</i>	24
2.5.2	<i>Turbidez</i>	25
2.5.3	<i>Cloro Residual Livre</i>	26
2.5.4	<i>Coliformes Totais e Escherichia coli</i>	26
2.6	Legislação da Potabilidade de Água.....	27
2.7	Estação de Tratamento de Água (ETA)	28
2.8	Aprendizado de Máquina	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Processo da ETA.....	31
3.2	Processo de Amostragem	32
3.2.1	<i>Caracterização Sazonal</i>	32
3.2.2	<i>Locais de coletas</i>	32
3.2.3	<i>Procedimento para coleta de água</i>	32
3.3	Análises Laboratoriais.....	34
3.3.1	<i>Determinação de Cor aparente e verdadeira</i>	35
3.3.2	<i>Determinação de Turbidez</i>	36

3.3.3	<i>Determinação do Cloro Residual Livre</i>	37
3.3.4	<i>Determinação de Coliformes Totais e Escherichia coli</i>	38
3.4	Dosagens dos produtos químicos	40
3.5	Análise Estatística	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Influência das chuvas nos parâmetros de qualidade	44
4.2	Eficiência do tratamento	51
4.3	Predição da dosagem dos produtos químicos	55
5	CONCLUSÃO	59
6	TRABALHOS FUTUROS	60
7	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a vida, e todos devem ter acesso a um abastecimento que seja suficiente, seguro e acessível. Garantir que mais pessoas possam ter água potável de qualidade traz benefícios diretos para a saúde. Portanto, é essencial que todos os esforços sejam direcionados para tornar a água consumida o mais segura possível. (WHO, 2017). No entanto, a qualidade da água pode variar dependendo de sua origem, das condições climáticas, geográficas e geológicas, além da composição e ocupação do solo. Vale destacar que água quimicamente pura não existe na natureza, pois devido à sua condição de solvente natural, ela adquire impurezas ao longo de sua precipitação e escoamento. Essas impurezas determinam o grau de tratamento necessário conforme o uso ao qual a água se destina (CONTERATO *et al*, 2018).

Evidencia-se uma grande necessidade e relevância de uma boa gestão hídrica, considerando que o Brasil possui dimensões continentais e regiões com características distintas. Algumas áreas, como a região hidrográfica amazônica, possuem grandes bacias hidrográficas e uma menor parcela da população, enquanto outras, como o Nordeste, têm menores capacidades hídricas, mas uma demanda por água significativamente maior (SANTOS *et al.*, 2020).

O Estado do Ceará tem 93% do seu território inserido no semiárido brasileiro, caracterizado por altas temperaturas, variabilidade espacial e temporal das chuvas e escassez de água (MGSA, 2018). Está localizado em uma região hidrogeológica com 80% da área sobre rocha cristalina, o que resulta em solos rasos e poucos recursos hídricos subterrâneos. Consequentemente, a maioria dos rios são naturalmente intermitentes, secando durante a estação seca (CEARÁ, 2018). Normalmente, após o término da estação chuvosa, ocorre a redução do volume de água acumulado nos reservatórios, principalmente porque, nos meses subsequentes, não há um volume significativo de chuvas no Ceará (IPECE, 2020).

Durante o período de estiagem, a alta insolação é uma das principais causas da redução do nível de água nos reservatórios. Além disso, essa alta radiação solar afeta a qualidade da água armazenada, concentrando sais e nutrientes, o que promove a eutrofização dos reservatórios (CEARÁ, 2018). Em circunstâncias de elevados índices pluviométricos, a erosão das margens dos rios, agravada pelo uso inadequado do solo, resulta no aumento a turbidez da água. Esse aumento exige ajustes nas operações das Estações de Tratamento de Água, como mudanças nas dosagens de coagulantes e outros auxiliares (CETESB, 2022).

As dosagens são determinadas através de testes de tratabilidade (*jar-test*) com a água bruta. Esse tipo de experimento pode requerer um tempo considerável, principalmente se houver repetições (SECKLER, 2017). Uma alternativa para otimizar esse procedimento é o uso de modelos de aprendizado de máquina. De acordo com Mahesh (2020), o aprendizado de máquina é uma abordagem da inteligência artificial (IA) que se concentra no estudo científico de algoritmos e modelos estatísticos capazes de extrair conhecimento e realizar tarefas específicas com base nos dados fornecidos. Esses modelos aprendem com os dados, aprimorando suas capacidades de decisão e previsão ao longo do tempo.

As águas brutas provenientes de mananciais superficiais, destinadas ao abastecimento público, não são adequadas para consumo humano devido à falta de características estéticas mínimas exigidas e à qualidade microbiológica insatisfatória, que pode representar riscos à saúde pública. Para resolver esse problema, existem as Estações de Tratamento de Água (ETAs), que melhoram a qualidade da água bruta para atender aos padrões de potabilidade vigentes. Quando a qualidade da água dos mananciais é comprometida, é necessário sofisticar as técnicas e operações de tratamento, o que, por sua vez, aumenta os custos de construção e operação das ETAs (SECKLER, 2017).

A qualidade da água, tanto para uso humano quanto industrial, seja tratada ou in natura, é avaliada por meio da determinação de diversos parâmetros físicos, químicos, bacteriológicos e indicativos de contaminação orgânica e biológica. No Brasil, os resultados das amostras devem estar dentro dos limites permitidos pela norma vigente de potabilidade da água para consumo humano, estabelecida pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 5 de 28 de setembro de 2017 (RICHARD, 2021).

Nesse contexto, frente ao cenário de baixa qualidade da água nos mananciais, as crescentes exigências legais de qualidade da água potável e aumento da demanda, a proposta desse trabalho é avaliar o desempenho do processo de tratamento de água em uma ETA que opera por filtração direta no período entre os anos de 2020 e 2023, nas quais se pretende discutir, a influência das precipitações sobre os parâmetros de qualidade. Além disso, prever as dosagens dos produtos químicos a partir dos parâmetros da água bruta, utilizando modelos de aprendizado de máquina, visando a otimização do procedimento.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Evidenciar como as variações pluviiais durante os períodos de 2020 e 2023 afetam a qualidade da água com base em parâmetros de qualidade medidos em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Identificar a influência das precipitações no comportamento dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos nos pontos de captação e saída de uma Estação de Tratamento de Água entre os anos de 2020 até 2023.
- Verificar a eficiência do tratamento da água que é distribuída a população urbana do estado do Ceará.
- Comparar os resultados obtidos aos valores máximos permitidos (VMP) para parâmetros físicos, químicos e microbiológicos estabelecidos pela resolução do CONAMA N°357/05 e Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5 de 28 de setembro de 2017.
- Predizer as dosagens dos produtos químicos no tratamento de água, com base nos parâmetros de qualidade da água bruta utilizando modelos de aprendizado de máquina. Avaliar a eficácia desses modelos de regressão utilizando métricas de desempenho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância da Água

A água é um elemento essencial para a vida vegetal e animal. O ser humano necessita de água de qualidade e em quantidade suficiente para atender às suas necessidades, proteger sua saúde e garantir seu desenvolvimento geral. Atividades humanas, econômicas ou não, dependem de recursos hídricos para produção industrial, agropecuária, geração de energia, segurança, lazer, alimentação e higiene, ou seja, para a própria sobrevivência. Os principais usos da água têm gerado conflitos de demanda, e os sinais de escassez tornaram-se cada vez mais frequentes, causando impactos desastrosos para a sociedade (FUNASA, 2019).

No dia 8 de janeiro de 1997, foi instituída, pela Lei nº 9.433, a Política Nacional de Recursos Hídricos, que também criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). De acordo com a Lei nº 9.433, a água é um recurso natural limitado, de valor econômico e bem de domínio público. Quando esse recurso está em situação de escassez, seu uso torna-se prioritário para o consumo humano e a dessedentação de animais, cabendo à gestão dos recursos hídricos proporcionar o uso múltiplo das águas (DIAS *et al.*, 2018).

A demanda por água para consumo humano cresce a cada ano, aumentando a pressão sobre a disponibilidade dos mananciais e exigindo a busca por fontes distantes e, em alguns casos, a transposição de bacias para atender às necessidades crescentes. Fatores como o crescimento populacional, o aumento da industrialização e o grande volume de perdas nos sistemas de abastecimento de água são importantes para esse aumento da demanda (FUNASA, 2019).

Levar água potável a uma comunidade deve ser a primeira ação sanitária e social de um programa de saneamento. O abastecimento de água é central para promover o saneamento e, conseqüentemente, a saúde pública. A implantação ou melhoria dos serviços de abastecimento de água resulta em uma melhoria rápida e significativa na saúde pública e nas condições de vida de uma comunidade (FUNASA, 2019). A água para abastecimento humano deve estar dentro dos padrões de potabilidade, ou seja, deve respeitar os limites de tolerância das substâncias presentes na água, de modo a garantir suas características de água potável. Antes de ser disponibilizada à população, a água deve passar por tratamentos adequados, visando a adequação de seus padrões físicos, químicos e biológicos (CONTERATO *et al.*, 2018).

2.2 Cenário Hídrico no Brasil

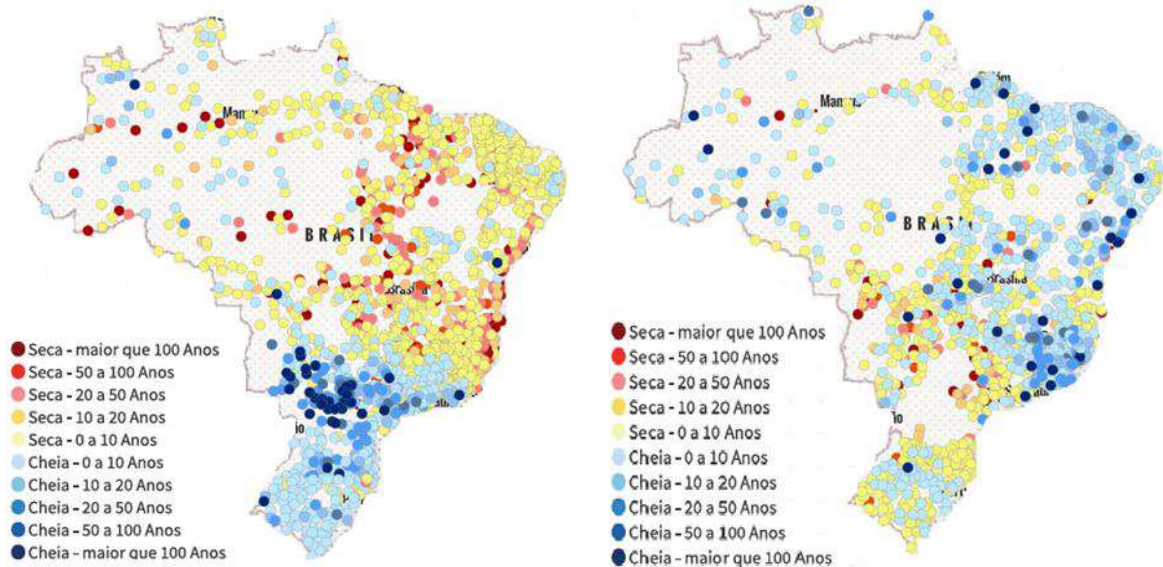
O Brasil detém cerca de 12% da água doce no planeta Terra. Contudo, esse recurso não é distribuído de forma equilibrada entre as diferentes regiões brasileiras, resultando em cenários de abundância e escassez. Há grande disponibilidade de água na macrorregião Norte, onde reside uma menor concentração da população. Em contrapartida, cerca de 69% da população vive nas regiões Sudeste e Nordeste, que dispõe de menos de 10% do volume disponível para consumo (SNIS, 2023). Estima-se que pelo território brasileiro escoam, em média, cerca de 255.000 m³/s de água, dos quais 63.000 m³/s estão localizados na bacia do rio Amazonas, restando apenas 13.500 m³/s de vazão média para os demais territórios (ANA,2024).

As bacias hidrográficas brasileiras enfrentam as alterações nos padrões de precipitação, impactando as vazões dos rios, o desenvolvimento das atividades humanas e a preservação dos ecossistemas. Em média, o regime pluviométrico anual no país é de cerca de 1.760 mm. No entanto, devido às dimensões continentais do Brasil, há uma grande variação pluviométrica, como ocorre no semiárido Nordestino, com 500 mm e a região Amazônica, com 3.000 mm. A variabilidade das chuvas no Nordeste é causada pelo aquecimento do Oceano Atlântico Tropical Norte e o fenômeno El Niño (ANA, 2024). Na Figura 1, temos o comportamento dos períodos de chuvas no território brasileiro nos anos de 2016 e 2020.

Figura 1 – Distribuição das chuvas no Brasil nos anos de (a) 2016 e (b) 2020

(a) 2016

(b) 2020



Fonte: ANA (2022).

Em 2022, a retirada total de água mensurada no território brasileiro foi de 2.035,2 m³/s ou 64,18 bilhões de m³ no ano. Os principais usos de água no Brasil foram no setor de irrigação agrícola, com 50,5% do total, seguida pelo abastecimento urbano com, com 23,9%, e pela indústria, com 9,4%. Os 16% restantes foram destinados a outras atividades, tais como uso animal (8%), termelétricas (5%), abastecimento rural (1,6%) e a mineração (1,6%) (ANA, 2024).

Em 2022, segundo informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), 84,9% da população brasileira foi atendida com abastecimento de água em suas residências, o que significa que 171,0 milhões de brasileiros tem água tratada. Entre as macrorregiões, o Norte (64,2%) teve o menor índice de atendimento, enquanto o Sul (91,6%) obteve o melhor índice registrado.

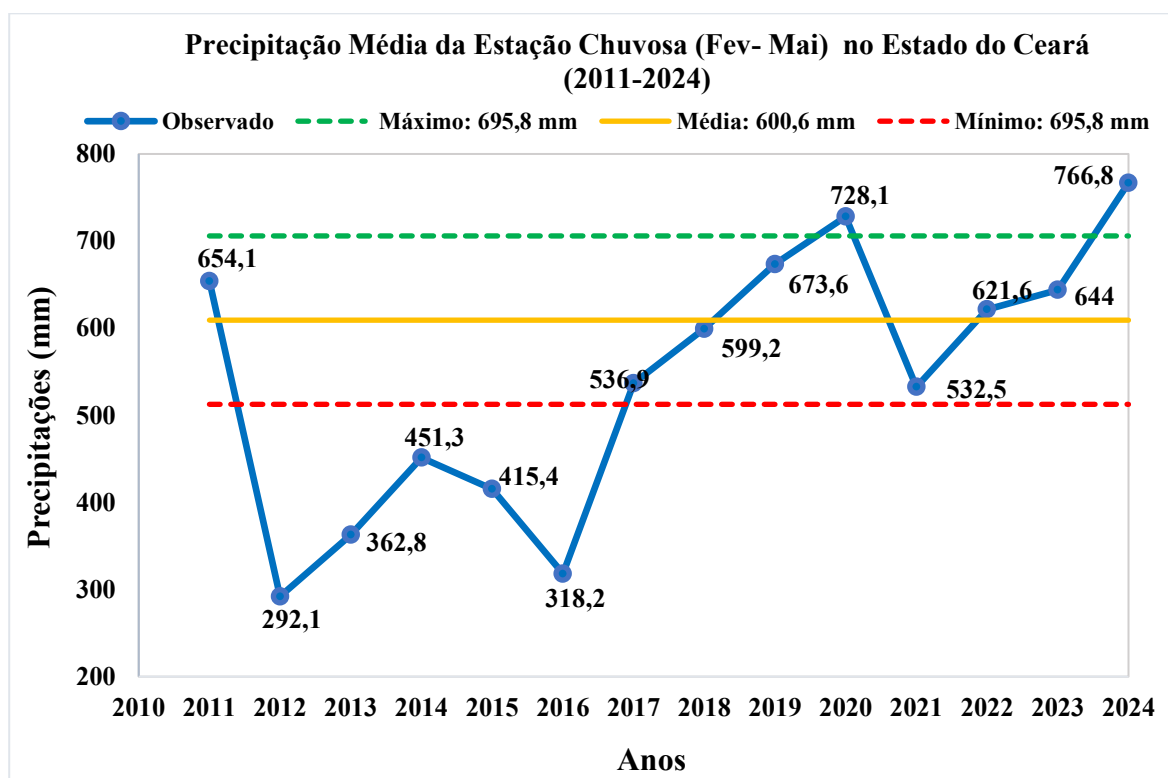
2.3 Cenário Hídrico no Ceará

O Estado do Ceará possui um território de 148.895 km², o que equivale a 9,6% da extensão geográfica do Nordeste. É constituído por 184 municípios e tem uma população total de aproximadamente 9.072 milhões de habitantes, dos quais 77,13% residem em áreas urbanas (CEARÁ, 2023).

O território cearense tem cerca de 90% de sua área integrada ao semiárido brasileiro, uma região caracterizada pela predominância de solos rasos e rochas cristalinas (IPECE, 2020). O estado está sujeito a longos períodos de estiagem, estações de chuvas irregulares, precipitações pluviométricas concentradas em um curto período (três meses ou quatro meses do primeiro semestre) e elevadas radiações solares, que resulta em altas taxas de evaporação (CEARÁ, 2023).

Segundo os dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2024), entre 2012 e 2017, a estação chuvosa do estado (fevereiro a maio) registrou padrões pluviométricos abaixo da média histórica, variando entre 292,1 a 536,9 mm, conforme indicado na Figura 2. Devido a isso, o Ceará enfrentou seis anos consecutivos (2012 a 2017) de seca, resultando em sérios prejuízos no acesso à água e impactando negativamente a economia do estado. A diminuição dos níveis de precipitação durante esse período de estiagem afetou os níveis de água dos reservatórios no estado (MGSA, 2018).

Figura 2 – Precipitação média das estações chuvosa no Ceará (2011-2024)



Fonte: Adaptado de FUNCEME (2024).

Devido as condições climáticas do Ceará, foram implantadas alternativas para aumentar a segurança hídrica, como a implantação de cisternas para armazenar as chuvas, a construção de reservatórios superficiais (açudes e barragens), a instalação de adutoras e poços, a implantação de sistemas de abastecimento de água e a transposição do rio São Francisco. (IPECE, 2020).

A demanda hídrica no Ceará é de aproximadamente 1,55 bilhões de m³ por ano, ou 49m³/s. Esse consumo é destinado aos setores de consumo humano, industrial e agropecuário. A demanda humana é mais expressiva nos grandes centros urbanos, como nas regiões do Cariri, Sobral e Fortaleza (CEARÁ, 2018). Em 2022, o consumo médio per capita de água no Estado do Ceará foi de 128,9 L/hab·dia (SNIS, 2023).

Em 2021, cerca de 5,5 milhões de cearenses utilizavam sistemas de abastecimento de água a partir de captação superficiais, enquanto 1,1 milhão de habitantes faziam uso de mananciais subterrâneos, e 0,7 milhão da população era abastecida por mananciais mistos (superficiais e subterrâneos) (ANA, 2021). Em 2022, o Estado do Ceará registrou o segundo

menor índice de abastecimento de água da região do Nordeste, com 70,3%, ficando à frente apenas do Maranhão, que apresentou 59,5% (SNIS, 2023).

2.4 A Qualidade de Água dos Reservatórios

Reservatórios são ecossistemas aquáticos artificiais formados pelo barramento de rios (REIS *et al*, 2023). Na região Nordeste do Brasil, reservatórios superficiais foram construídos como uma estratégia para combater o problema de escassez e assegurar a segurança hídrica. Esses reservatórios captam e armazenam parte da água que escoia durante os períodos chuvosos, garantindo o abastecimento de água nos períodos de seca (CAMPOS, 2015).

A Figura 3 ilustra a evolução dos níveis nos reservatórios do Nordeste ao longo dos últimos 10 anos. Entre 2017 e 2022, houve um aumento gradual nas precipitações, resultando em uma recuperação parcial dos volumes de água dos reservatórios. No início de 2024, o volume de água nos reservatórios nordestinos era de 40,86%, representando um aumento de aproximadamente 7% em comparação com o início de 2022 (ANA, 2024).

Figura 3 – Evolução do volume dos reservatórios equivalente do Nordeste entre janeiro dos anos de 2014-2024

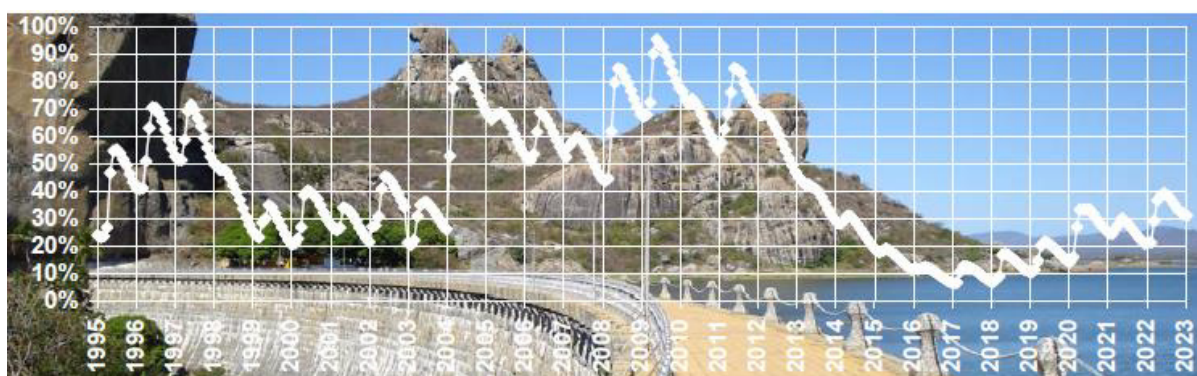


Fonte: Adaptado de ANA (2024).

De acordo com Dantas *et al.* (2017), a qualidade da água em muitos reservatórios superficiais no semiárido brasileiro foi comprometida devido à deficiência hídrica ao descarte inadequado de efluentes domésticos e industriais, além da presença de metais pesados e de microrganismos patogênicos.

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH, 2023), monitora 157 reservatórios no Estado do Ceará. Em janeiro de 2023, o volume total acumulado nesses reservatórios era de 5,826 bilhões de metros cúbicos, o que representa 31,39% da capacidade total de armazenamento do estado. A Figura 4, que ilustra o volume de armazenamento dos reservatórios do Ceará ao longo do tempo, destaca que, no final de junho 2011, a cota do vertedouro atingiu 81,16% (15.025,7 hm³). Contudo, em 2017, esse percentual decaiu para 11,93% (2.207,98 hm³), representando uma redução de 70% no volume armazenado.

Figura 4 – Volume de armazenamento dos reservatórios do Ceará entre os anos de 1995-2023



Fonte: COGERH (2023).

Precipitação abaixo da média, penetração de energia luminosa, elevadas temperaturas, maiores índices de evaporação e altas cargas poluidoras podem alterar o aspecto dos reservatórios do semiárido nordestino. Em tais condições, os reservatórios começam a desenvolver o fenômeno de eutrofização (BARBOSA, 2021). Em 2023, dos 150 reservatórios monitorados no Estado do Ceará, 77 estavam eutrofizados, representando 51,3% do total, com variações entre as condições de eutróficos e hipereutróficos (COGERH, 2024).

A eutrofização é um processo que deteriora a qualidade do ambiente aquíferos, resultando em um crescimento descontrolado de flora aquática devido ao enriquecimento de nutrientes, como o fósforo e o nitrogênio (ANA, 2024). Esse processo pode ocorrer naturalmente, por meio da lixiviação de enriquecidos com macronutrientes, ou por efeitos antrópicos, com o descarte de efluentes domésticos e industriais na água (REIS *et al*, 2023).

Durante as estações chuvosas, o escoamento superficial aumenta a quantidade de material em suspensão e poluentes nos corpos d'água. Quando a concentração de turbidez na água é elevada, o principal indicativo é a influência de chuvas, que promovem o transporte de material alóctone (ANA, 2023). A proximidade da maioria das cidades aos rios e mananciais

tem gerado o aumento da poluição, devido ao descarte inadequado de esgotos, efluentes industriais e resíduos sólidos. Dessa forma, contribui-se para a eutrofização, ao introduzir nutrientes por meio do esgotamento sanitário. (CONTERATO *et al.*, 2018; MGSA, 2018).

Para Gadelha *et al.* (2022), a eutrofização em corpos hídricos resulta em uma série de efeitos negativos, incluindo condições de anaerobiose (ausência de oxigênio dissolvido), morte de peixes e de aves, crescimento excessivo de cianobactérias e algas, toxicidade de algas, emissão de gases tóxicos e de odores desagradáveis. Além disso, a eutrofização pode contaminar a água, tornando-a imprópria para consumo humano.

Quando a estação de tratamento capta algas e cianobactérias presentes na água bruta, surgem problemas operacionais em várias etapas do tratamento. Isso inclui dificuldades na coagulação e floculação, baixa eficiência na sedimentação, obstrução dos filtros e aumento da necessidade de produtos desinfetantes. Além disso, as algas podem produzir odores e sabores indesejáveis na água, exigindo a adição de filtros de carvão ativado para remover esses odores e sabores. Esses problemas operacionais geralmente reduzem a eficiência dos processos de tratamento, comprometem a qualidade da água tratada e elevam o custo do tratamento (FUNASA, 2014).

Quando a água bruta apresenta elevadas concentrações de cianobactérias e turbidez, é realizada um tratamento complementar que inclui a pré-cloração antes das etapas de coagulação e floculação. Nesse pré-tratamento, é feita a desinfecção utilizando um oxidante para destruir ou inativar os patógenos presentes (DANTAS *et al.* 2017). No entanto, a adição de cloro (cloração) em grandes quantidades pode resultar na formação de compostos organoclorados, como Trihalometano (THM), que é associado a efeitos cancerígenos (ANA, 2023). Quanto mais contaminada a água bruta estiver, maior é a quantidade de produtos químicos e tecnologias necessárias para torná-la apta para o consumo humano, o que aumenta consideravelmente os custos do tratamento (KATAYAMA *et. al.*, 2015).

2.5 Parâmetros da Qualidade da Água

2.5.1 Cor

A cor de uma amostra é um parâmetro que indica a coloração da água, sendo associada ao grau de redução da intensidade com que a luz penetra, devido à absorção de parte da radiação eletromagnética. Essa redução ocorre pela presença de sólidos dissolvidos,

especialmente material coloidal orgânico (folhas, taninos, anilinas, lignina e celulose) e inorgânico (óxidos de ferro e manganês) (CETESB, 2022). Dentre os coloides orgânicos naturais, temos os ácidos húmicos e fúlvicos, que são os compostos responsáveis por causar uma coloração amarelo-acastanhada (APHA, 2023).

Quando ocorre a mudança na coloração da água durante o processo de desinfecção, isso pode indicar a formação de subprodutos resultantes da presença de carbono orgânico natural (WHO, 2017). Embora geralmente seja um parâmetro de natureza estética, que não representa riscos diretos à saúde, ele pode causar desconforto na população (CETESB, 2022).

A cor da água pode ser dividida em verdadeira e aparente. Quando a matéria em suspensão está presente, a cor é aparente. A cor aparente é determinada sem a centrifugação ou filtração prévia da amostra. Quando a coloração da água é devida apenas a substâncias dissolvidas e coloidais, ela é denominada cor real ou verdadeira (RICHTER, 2021). A medição desse tipo de cor, tem complicações devido a interferência de partículas coloidais e partículas suspensas que espalham a luz (APHA, 2023).

2.5.2 Turbidez

A turbidez é um parâmetro que está relacionado à presença de materiais em suspensão e/ou coloidais que provoca a redução da transparência de uma amostra aquosa/líquida (ANA, 2023). A turbidez é uma expressão da propriedade ótica que faz com que a luz seja dispersa e absorvida em vez de transmitida, sem alteração da direção ou do nível de fluxo através da amostra. Em grande em concentrações, os sólidos que absorvem luz, causam uma interferência negativa (APHA, 2023).

Elevadas concentrações de turbidez são indicativas da péssima qualidade da água bruta, tratamento ineficiente e perturbação de sedimentos e biofilmes em redes de distribuição. Além disso, ela pode causar manchas em materiais, acessórios e roupas expostas durante a lavagem. A água turva tem um aspecto que causa rejeição para os consumidores. Embora a turbidez não represente um risco direto à saúde, contudo os sólidos dissolvidos podem conter contaminantes químicos e microrganismos perigosos (WHO, 2017).

As partículas que influenciam a turbidez podem ser de origem orgânica (algas, bactérias, detritos orgânicos, etc.) ou inorgânica (silte, argila, areia, etc.). Devido à alteração na transparência, a produtividade biológica do ambiente aquático pode ser significativamente impactada (ANA, 2023).

2.5.3 *Cloro Residual Livre*

O cloro quando estiver em meio aquoso, tanto em sua forma molecular como na forma de íon hipoclorito, faz o processo de hidrólise formando o cloro residual (livre ou combinado). A presença desse parâmetro pode ser encontrada na forma de cloro molecular dissolvido (Cl_2), ácido hipocloroso (HClO) ou íon hipoclorito (ClO^-) (ANA, 2023).

O cloro é aplicado em sistemas de tratamento e distribuição de água para abastecimento público, servindo principalmente para destruir ou desativar microrganismos patogênicos. Assim como, este composto promove uma melhoria na qualidade do tratamento de água, pois reage com amônia, ferro, manganês, sulfeto, além de substâncias orgânicas presentes na água (APHA, 2023).

Contudo, a cloração pode implicar em efeitos adversos, como a formação de compostos cloroorgânicos potencialmente cancerígenos, como o clorofórmico. Além disso, quando a água estiver com concentrações elevadas de cloro, podem intensificar problemas de sabor e odor devidos a fenóis e outros compostos orgânicos (APHA, 2023).

2.5.4 *Coliformes Totais e Escherichia coli*

Os coliformes totais englobam o grupo de bactérias gram-negativo, que possuem conformação de bastonetes, não tem a capacidade de esporular, são aeróbios ou anaeróbios facultativos, que fermentam a lactose e produzem ácido, gás e aldeído durante as condições de 48h em $35,0 \pm 0,5$ °C, e podem apresentar atividade da enzima β -galactosidase. A maioria das bactérias do grupo coliforme compreende os gêneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter* e *Klebsiella*. A presença de bactérias do grupo coliformes na água pode indicar ineficiência do tratamento, um saneamento inadequado, e possível contaminação fecal e bactérias patogênicas (APHA, 2023).

A bactéria *Escherichia coli* é o principal bioindicador de contaminação fecal em águas doces. Trata-se de um coliforme termotolerante que fermenta lactose a $44,5^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$ em 24 horas e apresenta atividade das enzimas β -galactosidase e β -glucuronidase. Além disso, ela está presente em grande quantidade nos dejetos de humanos e animais de sangue quente (CETESB, 2022).

2.6 Legislação da Potabilidade de Água

A legislação federal brasileira estabelece padrões de qualidade para a água tratada destinada ao consumo humano, assegurando a saúde pública. Esses padrões são definidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 5 de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde (MS). Além disso, a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece os padrões de qualidade para corpos d'água em todo o território nacional.

A Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), dispõe a respeito da classificação, dando diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos d'água superficiais, além de estabelecer as condições e padrões para o lançamento de efluentes. Quando a água doce é utilizada em tratamento convencional com destino para consumo humano, se considera a Classe 2.

No Brasil, a legislação que garante a potabilidade e segurança das águas é a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde (MS), que reúne normas sobre ações e serviços de saúde do Sistema Único de Saúde (SUS). Esta portaria inclui o Anexo XX, que trata do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2017). A Tabela 1, descreve os valores máximos permitidos (VMP) dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos para água bruta e tratada:

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade e valores máximos permitidos (VMP) para água bruta e tratada

Parâmetro	VMP (Valor Máximo Permitido)	
	Água Bruta	Água Tratada
Turbidez	100 uT	5 uT
Cor	75 uH	15 uH
Cloro residual livre	-	0,2 - 5 mg/L
Coliformes totais	-	Ausência em 100 mL
<i>Escherichia coli</i> ou coliformes termotolerantes	≤1.000 NMP/100ml	Ausência em 100 mL

Legenda: uT - Unidade de Turbidez; uH – unidade Hazen; mg/L – Miligrama por Litro; NMP/100 ml – número mais provável por 100 mililitros.

Fonte: Adaptado do CONAMA nº357/05 e Anexo XX da Portaria de Consolidação nº5 de 2017.

De acordo com as legislações seguidas, considera-se cor verdadeira para água bruta e cor aparente para água tratada.

2.7 Estação de Tratamento de Água (ETA)

A Estação de Tratamento de Água (ETA) geralmente é instalada quando a água bruta utilizada por uma população é imprópria para consumo humano. A ETA deve ser localizada o mais próximo possível do manancial, que geralmente é um rio. Muitas vezes, é necessária uma Estação Elevatória para bombear a água até a entrada da ETA (FUNASA, 2014). As etapas da ETA e seus respectivos produtos químicos utilizados estão na Tabela 2:

Tabela 2 – Definição das etapas das ETA e seus respectivos produtos químicos

Etapa	Definição	Produtos Químicos
Coagulação	O processo de adição de produtos químicos (coagulante), tem a finalidade de desestabilizar as partículas de impurezas presentes na água.	Cloreto de polialumínio (PAC 23) e polímero catiônico líquido.
Pré - Oxidação	O processo físico-químico que consiste na adição de um agente oxidante na água bruta para remover compostos orgânicos e impurezas.	Cloro gasoso, dióxido de cloro, hipoclorito de sódio.
Fluoretação	O processo que é adicionado sais de flúor às águas de abastecimento público, com a finalidade de proporcionar o teor adequado de íon fluoreto benéfico para a prevenção da cárie dentária.	Ácido fluossilícico
Filtração direta com fluxo descendente	O processo que retém partículas sólidas de uma suspensão, através de um meio poroso. Nesse tipo de filtração, a água percorre no sentido crescente da granulometria do leito.	Não é aplicado
Desinfecção	O processo que tem a finalidade de inativar os microrganismos patogênicos, por intermédio de agentes físicos e/ou químicos.	Cloro gasoso e hipoclorito de sódio.

Decantação	Processo físico que separa partículas flocculantes em suspensão na água, utilizando as forças gravitacionais para separar partículas mais densas da água.	Não é aplicado
------------	---	----------------

Fonte: RICHTER (2021) e SECKLER (2017).

Geralmente, as dosagens dos produtos químicos são realizadas através de ensaios "*jar-test*", para que, posteriormente, possam ser implantados para a estação de tratamento de água. Nesse ensaio são testadas diferentes dosagens para uma amostra bruta a fim de determinar a dosagem ótima. Após a finalização do ensaio, caso nenhuma das amostras tenha resultados satisfatórios, realiza-se um novo teste em outra faixa de dosagem (RICHTER, 2021).

2.8 Aprendizado de Máquina

Aprendizado de Máquina ou *Machine Learning* é um ramo da inteligência artificial (IA) que utiliza algoritmos semelhantes ao processo de aprendizagem humano. O algoritmo se baseia em experiências acumuladas para tomar decisões, ou seja, esse sistema de aprendizagem encontra soluções precisas com base nos problemas anteriores. Os tipos mais comuns de algoritmos de *Machine Learning* são a classificação e regressão (PINHEIRO, 2022).

Os algoritmos de classificação, como o nome sugere, são usados para resolver problemas em que os dados possuem uma classificação prévia. O objetivo é identificar a qual categoria um novo dado não classificado pertence. Já regressão é aplicada quando uma ou mais variáveis contínuas (reais) e dependentes. Nesse caso, uma mudança em uma variável influencia em outra. Os principais modelos de regressão, são: Linear, Polinomial, Árvore de Decisão (*Decision Tree*) e Floresta Randômica ou Floresta Aleatória (*Random Forest*) (NETO e MACIEL, 2021).

Ainda segundo os autores, a regressão polinomial é um modelo que relaciona duas variáveis, onde uma altera o valor da outra continuamente, por meio de um polinômio de enésimo grau. Esse modelo é ajustado pelo grau do polinômio. O XGBoost é um algoritmo de aprendizagem de máquina estruturado em árvore de decisão e é uma extensão do *Gradient Boosting*. Esse modelo sequencial que aprende passo a passo com os erros acumulados nas interações anteriores, procurando reduzir gradativamente uma determinada função de perda. Ele se destaca por sua elevada performance, rapidez de processamento, versatilidade e pode ser aplicado em problemas de previsão e classificação (SICSÚ, 2023).

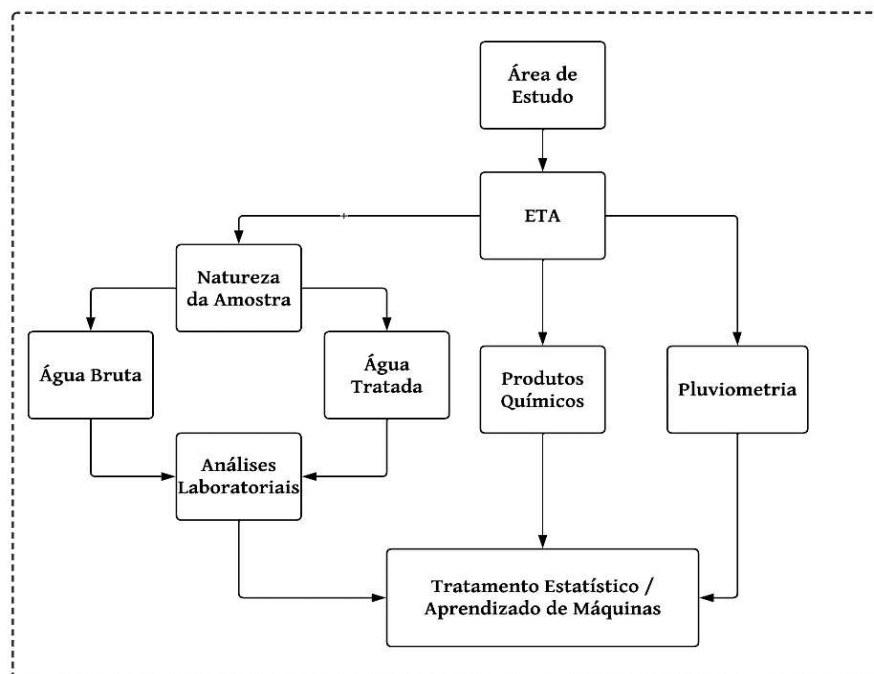
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utiliza resultados de análises laboratoriais de amostras de água, disponibilizadas por dois laboratórios, referentes a uma Estação de Tratamento de Água localizada na região metropolitana de Fortaleza, Ceará. As etapas seguidas para a realização deste estudo foram as seguintes:

- **1. Delimitação da área de estudo:** Escolha da Estação de Tratamento de Água (ETA), locais de coletas, período de estudo e parâmetros de qualidade.
- **2. Obtenção dos dados:** Recolhimento dos valores dos parâmetros de qualidade (água bruta e água tratada), dosagens dos produtos químicos adicionadas na ETA e os índices pluviométricos registrados pela FUNCEME.
- **3. Tratamento estatístico:** Análise gráfica dos dados e identificar correlações.
- **4. Aprendizado de Máquina:** Aplicação dos modelos de regressão para prever a dosagem dos produtos químicos a partir dos parâmetros da água bruta.

Estas etapas podem ser visualizadas no fluxograma da Figura 5:

Figura 5 – Fluxograma do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Processo da ETA

A Estação de Tratamento de Água, onde o trabalho foi desenvolvido, está localizada na região metropolitana de Fortaleza, Ceará. As operações unitárias realizadas nesta estação incluem: coagulação, pré-oxidação, fluoretação, filtração direta com fluxo descendente, desinfecção e decantação.

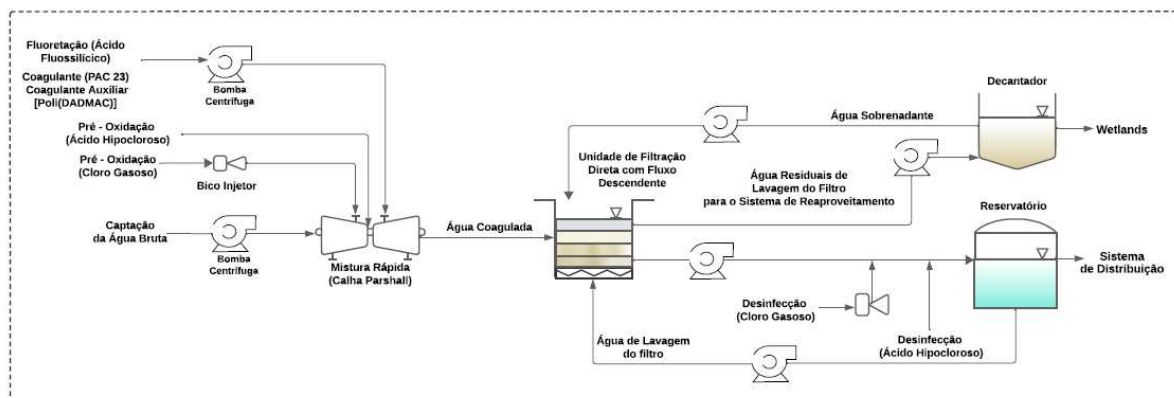
Na ETA, a água bruta é captada e direcionada até à câmara de mistura rápida, onde são adicionados os seguintes produtos: cloro gasoso, hipoclorito de sódio, dióxido de cloro para a pré-oxidação, ácido fluossilícico para a fluoretação, e PAC 23 e polímero catiônico líquido para a coagulação. Esses produtos químicos são aplicados de forma diluída por meio de bombeamento para a câmara de mistura rápida. Em seguida, a água coagulada segue para unidade de filtração direta com fluxo descendente.

Quando algum filtro apresenta perda de carga e turbidez abaixo do VMP, ocorre a lavagem dele. Parte da água filtrada é utilizada nesse processo. Após a conclusão da lavagem, a água utilizada na limpeza é encaminhada para os decantadores. Nessa unidade, o lodo da água de lavagem sedimenta, enquanto o sobrenadante retorna para os filtros. O lodo gerado no processo de decantação é descartado para o wetland de descargas.

Após a filtração, a água recebe mais desinfetantes e segue para os reservatórios, e depois é distribuída para os sistemas de adução.

Na Figura 6, temos uma simplificação do processo de tratamento de água.

Figura 6 – Sistema do processo de tratamento de água



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Processo de Amostragem

3.2.1 Caracterização Sazonal

O monitoramento pluviométrico no Estado do Ceará é realizado pela Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME. A fundação registra as precipitações que ocorrem diariamente e mensalmente em todos os postos pluviométricos instalados do Estado do Ceará. A partir desses dados, foram reunidos os índices de chuvas mensais nos últimos 4 anos (2020-2023) em RMF.

3.2.2 Locais de coletas

Nesse trabalho, foram considerado os pontos de coletas do manancial superficial e da saída do tratamento. De acordo com Anexo XX da Portaria de Consolidação nº5 de 2017, em um sistema de abastecimento com manancial do tipo superficial, os parâmetros de turbidez, cloro residual livre, cor aparente, pH e fluoreto são analisados a cada duas horas. Para a saída do tratamento, o procedimento segue o mesmo intervalo de tempo. Os pontos de coletas estão na Tabela 3:

Tabela 3 – Pontos de coletas

Tipo de Água	Natureza da Amostra	Ponto de Amostragem
Bruta	Manancial Superficial	Captação
		Torneira de Água Bruta
Tratada	Saída do Tratamento	Torneira de Água Tratada do Laboratório
		Torneira de Saída do Tratamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Procedimento para coleta de água

As coletas das amostras foram seguidas de acordo o Guia Nacional De Coleta e Preservação De Amostra, de autoria da ANA. Foram coletadas duas amostras: uma de 1000 ml para análises físico-químicas, armazenada em frascos plásticos, e outra de 100 ml para análise

microbiológica, reservadas em frascos de polipropileno esterilizado, contendo tiosulfato de sódio.

- Manancial Superficial

Inicialmente, são medidos os parâmetros de campo (CRL, pH e temperatura), para isso, é lavado o frasco plástico com a própria amostra, depois coleta-se uma alíquota para medir e por fim, registra-se os resultados na cadeia de custódia. Depois disso, com um frasco de polipropileno, coleta-se a amostra para análise microbiológica, tomando cuidado para evitar a contaminação da amostra pelos dedos. Segurando o frasco pela base, deve-se colocá-lo com a boca voltado para baixo, cerca de 30 centímetros abaixo da superfície da água. Em seguida, vira-se lentamente o frasco para que a boca fique voltada contra a corrente (quando não houver corrente, movimenta-se o frasco horizontalmente).

O frasco deve ser preenchido com a amostra, deixando cerca de 2,5 centímetros de espaço vazio para homogeneização. Logo após, o frasco é fechado ainda dentro da água, identificado com uma etiqueta e armazenado em isopor ou bolsa térmica com gelo (2 a 10 °C), separadamente das demais amostras, até a chegada ao laboratório. As amostras do grupo coliformes devem ser analisadas em um prazo máximo de 30 horas após a coleta.

O procedimento para as análises físico-químicas segue as mesmas etapas anteriores, alterando apenas o tipo de frasco utilizado para a coleta. As amostras devem ser armazenadas em uma caixa térmica com gelo ($>0^{\circ}\text{C}$ a $\leq 6^{\circ}\text{C}$), e o prazo máximo de análise é de 48 horas após a coleta.

- Saída do Tratamento

A coleta de água tratada inicia-se com a abertura da torneira por dois a três minutos para eliminar a água estagnada nas tubulações. Após isso, coleta-se uma alíquota para realizar os ensaios de CRL, pH e temperatura. Com o fechamento da torneira, os resultados de CRL, pH e temperatura são registradas na cadeia de custódia.

Em seguida, as mãos são lavadas com água e sabão e higienizadas com uma solução de álcool 70%. Após isso, higieniza-se a torneira por fora e por dentro, primeiro utilizando um chumaço de algodão embebido com álcool 70% e, depois, com a solução de hipoclorito de sódio. A torneira é aberta novamente e mantida aberta por um a dois minutos. Em seguida, fecha-se a torneira parcialmente, mantendo um escoamento contínuo de água. Posiciona-se o frasco de maneira que não tenha contato com a torneira, para evitar possíveis contaminações, enchendo-o com a amostra e deixando cerca de 2,5 centímetros de espaço vazio para permitir a homogeneização. Logo após, o frasco é tampado, identificado com uma etiqueta e armazenado

separadamente das demais amostras em uma bolsa térmica com gelo (2 a 10 °C) até a chegada ao laboratório. As análises de bactérias do grupo coliformes devem ser realizadas no máximo em 30 horas após a coleta.

Logo após, coleta-se a amostra do físico-químico. O frasco plástico é lavado com a própria amostra e, em seguida, ela é coletada, finalizando com o fechamento do frasco. A amostra é armazenada em caixa térmica com gelo descartável ($>0^{\circ}\text{C}$ a $\leq 6^{\circ}\text{C}$) e deve ser analisada no máximo até 48 horas.

Quando a amostra é de água bruta e o ponto de amostragem é em uma torneira, adota-se o procedimento de coleta da água tratada.

3.3 Análises Laboratoriais

A realização das análises laboratoriais ocorreu ao longo de quatro anos (2020, 2021, 2022 e 2023). Os ensaios foram conduzidos nos laboratórios A e B que controlam a qualidade da água. Durante esse período, foram analisados os parâmetros: cor aparente, cor verdadeira, turbidez, cloro residual livre, coliformes totais e *Escherichia coli*.

Os laboratórios A e B realizaram análises das amostras de água bruta e tratada. No laboratório A, foram feitas análises das amostras de água bruta para uma única coleta, considerada representativa para o mês, enquanto as amostras de água tratada foram realizadas diariamente (exceto aos sábados e domingos) entre os anos de 2020 e 2023. As amostras da água bruta e tratada do laboratório B, foram analisadas diariamente. A Tabela 4 apresenta a quantidade de análises e os parâmetros que foram realizadas por cada laboratório:

Tabela 4 – Quantidade de análises e os parâmetros analisados no laboratório A e B

Tipo de Água	Laboratório	Período	Parâmetro	Quantidade de Análises
Bruta	A	Mensal	Cor	45
			Turbidez	47
			Coliformes Totais	50
			<i>Escherichia coli</i>	50
	B	Diário	Cor	1462
			Turbidez	1462
			Cor	674
			Turbidez	675
Tratada	A	Diário	Cloro Residual Livre	785
			Coliformes Totais	778
			<i>Escherichia coli</i>	778

B	Diário	Cor	1462
		Turbidez	1462
		Cloro Residual Livre	1462

Fonte: Elaborado pelo autor.

As metodologias analíticas para a determinação dos parâmetros mencionados têm como base o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 24 ed. Washington, DC, 2023, de autoria das instituições AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION.

Na Tabela 5, constam os parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos avaliados nessa pesquisa, seus respectivos métodos e os equipamentos utilizados:

Tabela 5 – Parâmetros de qualidade, método aplicado e aparelhos

Parâmetro	Método	Aparelho
Cor	2120 B, SMEWW 24RD ED., 2023	Tubos de Nessler
Turbidez	1030 B-2 E 2130 B, SMEWW 24RD ED., 2023	Turbidímetro Hach 2100Q
Cloro Residual Livre	4500-CL F, SMEWW 23RD ED., 2024	Calorímetro portátil (Pocket Colorimeter Hach - 528 nm)
Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i>	9223, SMEWW 24RD ED., 2023	Seladora, Estufa Incubadora, Câmara ultravioleta

Fonte: SMEWW 24RD ED (2023).

3.3.1 Determinação de Cor aparente e verdadeira

As análises de cor seguem o método de comparação visual (2120 B). Esse método baseia-se na comparação visual das amostras com soluções padrão de platina-cobalto, resultando em medidas expressas em unidades de cor, também conhecidas como unidade Hazen (uH). As soluções padrão são diluições em série da substância de platina-cobalto, no qual variam entre 2,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 e 70 uH. Todas as soluções padrão são armazenadas em frasco de vidro âmbar.

O procedimento para determinação de cor começa com o preenchimento dos tubos de Nessler de 50 mL com as soluções padrão. Antes de adicionar a amostra ao compartimento, este deve ser lavado com água reagente e com a amostra homogeneizada. Em seguida, transfere-

se uma alíquota para o tubo Nessler, até a marca, e as paredes do recipiente devem ser enxugadas. O tubo da amostra é posicionado entre dois padrões sobre uma superfície branca ou iluminada, de forma que o feixe atravesse os tubos igualmente. A comparação é feita visualmente, observando-se no sentido longitudinal. Se a cor ultrapassar 70 uH, a amostra deve ser diluída com água destilada em proporções conhecidas até que sua cor se enquadre nos padrões estabelecidos. A cor obtida é então anotada, sendo essa cor denominada cor aparente. A Figura 7 mostra como é realizada a análise de cor:

Figura 7 - Análise de Cor



Fonte: Próprio autoria.

A análise da cor verdadeira é realizada quando a amostra apresenta alta concentração de turbidez. Nesse caso, uma alíquota da amostra passa previamente por um sistema de filtração para remover a turbidez. Em seguida, é feita a comparação visual com as soluções padrão, seguindo o mesmo procedimento utilizado para a determinação da cor aparente.

3.3.2 Determinação de Turbidez

As análises de turbidez são realizadas pelo método nefelométrico. Esse método envolve a comparação da luz dispersada por uma amostra, sob condições específicas, com a intensidade da luz espalhada por um padrão (formazina) de referência, nas mesmas condições. Essa análise é feita utilizando um turbidímetro (Figura 8), e o resultado é expresso em Unidade de Turbidez (uT).

Nessa análise, a cubeta deve ser lavada com água destilada e preenchida com a amostra homogeneizada. Em seguida, as paredes externas do compartimento devem ser enxugadas com papel macio. A cubeta é então preenchida com uma alíquota da amostra, evitando a formação de bolhas. Novamente, as paredes externas são secadas com papel macio. Ao inserir a cubeta no equipamento, deve-se alinhar as marcas da cubeta e do turbidímetro. Pressiona-se a tecla de leitura e aguarda-se o resultado no visor. Por fim, registra-se o resultado no formulário do parâmetro turbidez.

Figura 8 - Turbidímetro



Fonte: Próprio autoria.

3.3.3 *Determinação do Cloro Residual Livre*

O cloro residual livre (CRL) é determinado por meio do método colorimétrico. Nesse método, a solução de sulfato de N, N – dietil – p – fenilenediamina (DPD) reage com o cloro residual livre presente na amostra, resultando em uma solução de coloração avermelhada.

Após a coleta da amostra, deve-se lavar a cubeta com água reagente e secá-la. Em seguida, adicionam-se dez gotas de solução tampão de fosfato e de solução DPD na

cubeta. Depois disso, a cubeta é preenchida com a amostra até a marca, homogeneizada e limpa com papel absorvente macio. Em seguida, a cubeta é introduzida no compartimento óptico e o botão verde é acionado para determinar a concentração de CRL. Por fim, registra-se o resultado de cloro residual livre na cadeia de custódia e a etiqueta o frasco. A Figura 9, mostra a análise de cloro residual livre:

Figura 9 – Análise de Cloro Residual Livre

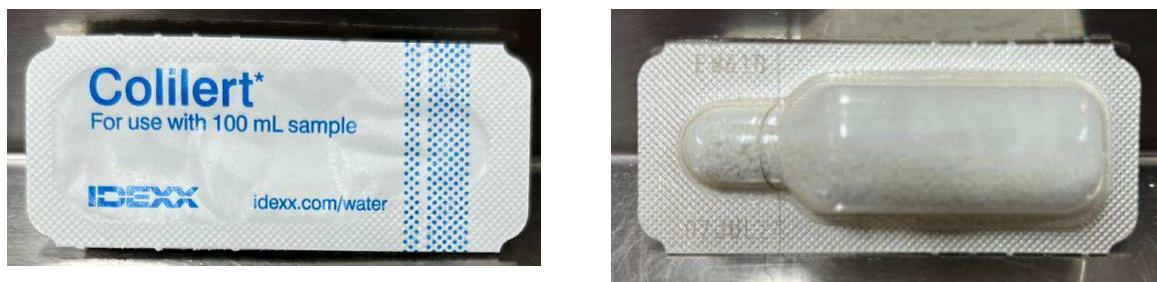


Fonte: Próprio autoria.

3.3.4 Determinação de Coliformes Totais e *Escherichia coli*

Para a água tratada, as análises microbiológicas são realizadas utilizando o método cromogênio qualitativo. Essa técnica tem o objetivo de detectar a presença ou ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* na água tratada. Esse tipo de análise utiliza o substrato cromogênio Colilert® (Figura 10), que é adicionado ao frasco estéril contendo 100 mL da amostra. Após isso, a amostra é homogeneizada e incubada em estufa bacteriológica a $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5$ por um período de 24+4 horas.

Figura 10 – Substrato cromogênio (Colilert®)



Fonte: Próprio autoria.

Ao final do período de incubação, realiza-se a leitura dos resultados. A presença de coliformes totais é confirmada para quando a amostra exibe coloração amarela, indicando a atividade da enzima β -galactosidase na metabolização do nutriente ONPG (orto-nitrofenil- β -D-galactopiransídeo). Para detectar *E. coli*, utiliza-se uma lâmpada ultravioleta (115 volts, 6hz, 20 AMPS) que é incidida sobre a amostra. Caso o resultado seja positivo, observa-se fluorescência no conteúdo da amostra, causada pela atividade da enzima β -glucuronidase na metabolização do substrato MUG (4-metilumbeliferil- β -D-glicuronídeo)

No caso da água bruta, as análises microbiológicas são realizadas utilizando o método cromogênio quantitativo. Essa técnica tem como objetivo a quantificação de coliformes totais e *Escherichia coli* em amostras de águas brutas e residuais. Para realizar o procedimento, em um frasco estéril contendo 100 mL da amostra de água a ser analisada, adiciona-se assepticamente uma ampola do substrato Colilert ®. A mistura é homogeneizada e transferida para uma cartela que contém 49 cavidades grandes e 48 pequenas. A cartela é então selada utilizando uma seladora específica e incubada a $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5$ por um período de 24+4 horas.

Ao final do período de incubação, a leitura dos resultados é realizada pela contagem das cavidades que apresentaram reação positiva. Para coliformes totais, a coloração amarela indica presença, enquanto a fluorescência sob a luz UV confirma presença de *E. coli*, como é mostrado na Figura 11. O número de poços positivos, ou seja, os que apresentaram coloração amarela e/ou fluorescência, é então convertido em Número Mais Provável (NMP) por meio de uma tabela de conversão específica. Essa tabela fornece contagens que variam de menor que 1 até maior que 2.419 NMP/100 mL, permitindo a quantificação dos microrganismos presentes na amostra.

Nos métodos qualitativo e quantitativo, os resultados de coliformes totais e *E.coli* são registrados na cadeia de custódia, que são expressos em NMP por 100 mL de amostra.

Figura 11 – Cartela com coloração amarela (a) indicando a presença de coliformes totais e cartela com coloração fluorescência (b) indicando a presença de *E. coli*

(a) Presença de coliformes totais

(b) Presença de *E. coli*



Fonte: Próprio autoria.

3.4 Dosagens dos produtos químicos

A dosagem dos produtos químicos é determinada por meio de ensaios de *Jar Test* (teste de jarros). Esses ensaios laboratoriais são realizados em bancadas, durante um período previamente estabelecido, para encontrar dosagem ideal dos produtos químicos.

De acordo com Richter, (2021), inicialmente é determinado como está a concentração dos parâmetros da água bruta. Depois a água bruta é adicionada seis jarros (béqueres) e é homogeneizada em um sistema de agitação na rotação máxima. Logo após, são adicionados em cada béquer diferentes doses dos produtos químicos, sendo agitado por 1 min. Após esse tempo, é reduzida a rotação e continua agitando por 15 min. Por fim as amostras são filtradas e determinado as concentrações dos parâmetros de qualidade. A amostra que produzir a maior redução de turbidez e cor corresponde à dosagem ótima dos produtos químicos utilizados. Após a determinação das dosagens, o operador controla as vazões dos produtos.

3.5 Análise Estatística

Na primeira etapa do trabalho, foram correlacionados os dados dos parâmetros de qualidade das águas bruta e tratada com índices pluviométricos. Para isso, utilizou-se o *Software Excel* no tratamento preliminar do conjunto de dados, visando agrupa-los graficamente. Fez uso de gráficos de combinação, para analisar o comportamento de dois parâmetros ao mesmo tempo. Os índices pluviométricos e os parâmetros de qualidades foram agrupados, respectivamente, em colunas e linhas.

Na segunda etapa da pesquisa, avaliou-se o desempenho da ETA a partir das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente na saída do tratamento. Para calcular a eficiência (E) do tratamento, considerou-se os resultados dos parâmetros na água bruta em relação aos obtidos águas tratadas, utilizando a Equação 1:

$$E(\%) = \frac{P(AB) - P(AT)}{P(AB)} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde P (AB) são os parâmetros da água bruta e P (AT) são os parâmetros da água tratada. A eficiência da remoção dos parâmetros foi plotada graficamente ao longo do tempo.

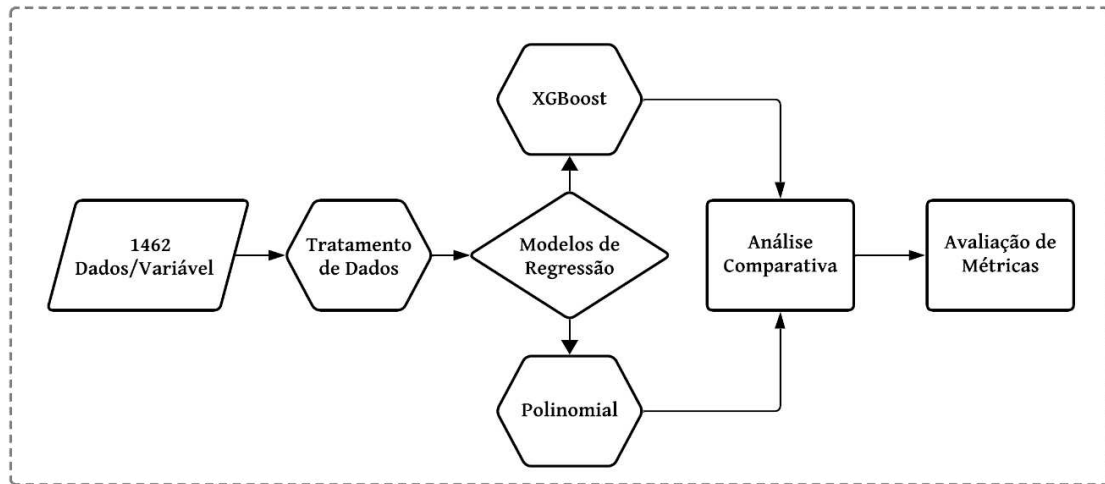
Utilizou-se gráficos de colunas empilhadas para avaliar os parâmetros microbiológicos na saída do tratamento. Esse gráfico mostra a quantidade de análises realizadas a cada mês, indicando quais amostras apresentaram ausência (coluna azul) ou presença (coluna laranja) de contaminação.

Na terceira etapa do trabalho, foram correlacionados os parâmetros de qualidade da água bruta com a dosagem dos produtos químicos aplicados na ETA, utilizando técnicas de aprendizado de máquina. Para realizar isso, utilizaram-se de dois modelos de regressão: Polinomial e XGBoost. O tratamento dos dados e a implementação dos algoritmos foram realizados utilizando a linguagem de programação *Python*, por meio da plataforma Visual Studio Code.

Os parâmetros considerados para a água bruta foram a cor e a turbidez do laboratório B, além dos parâmetros coliformes totais e *E.coli* do laboratório A. Em relação aos produtos químicos, utilizou-se os dados de cloro gasoso, hipoclorito de sódio, dióxido de cloro, cloreto de polialumínio (PAC 23) e polímero catiônico líquido. O conjunto de dados é composto por 1462 registros para cada parâmetro e produto químico, analisados entre janeiro de 2020 a dezembro de 2023.

O algoritmo de aprendizado de máquina segue as seguintes etapas (Figura 12):

Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de aprendizado de máquina



Fonte: Próprio autoria.

- **Tratamento de dados**

De acordo com Murphy (2021), quando um conjunto de dados contém muitos valores, é possível que alguns desviem significativamente da maioria, sendo estes conhecidos como *outliers*. Caso esses valores não sejam filtrados, podem levar a interpretações incorretas. Então, foram removidos os dados que não convergiam com a maioria. Cada variável, seja parâmetro ou produto químico, está distribuída em diferentes escalas. Para garantir que os dados de entradas estejam em escala equivalentes, foi realizada uma normalização. A Equação 2, que descreve o processo de normalização (X^N):

$$X^N = \frac{X_i - X_i^{min}}{X_i^{max} - X_i^{min}} \quad (2)$$

Onde X_i , X_i^{min} e X_i^{max} são respectivamente, valor original, valor mínimo e valor máximo do conjunto de dados. Os dados foram normalizados entre 0 e 1.

- **Otimização dos hiperparâmetros**

Quando é alterado o valor do hiperparâmetro ou conjuntos de hiperparâmetros torna-se possível estimar o valor ou combinação de valores que otimiza os resultados do

algoritmo, quando aplicado àquela base de dados. O operador deve verificar inicialmente qual combinação de valores desses hiperparâmetros resulta na melhor solução. Após a limpeza e o tratamento dos dados, o ajuste dos hiperparâmetros foi realizada por meio da função GridSearchCV. Essa função organiza os hiperparâmetros em uma lista, depois disso, testa várias combinações no espaço até estimar o conjunto mais adequado (SICSÚ, 2023).

Nesse trabalho, foram aplicados dois modelos de regressão: Regressão Polinomial e XGBoost. Para cada modelo, foi realizada a otimização dos hiperparâmetros. No caso da regressão polinomial, a otimização consistiu em ajustar o melhor grau da função. Já modelo XGBoost possui vários hiperparâmetros, mas dois se destacaram por sua importância: o número de estimadores (n-estimators) e o número mínimo de observações em um nó terminal (min_child_weight) (SICSÚ, 2023).

- **Métrica de Avaliação**

Dentre os diversos parâmetros estatísticos utilizados para avaliar a precisão de um modelo, dois são amplamente aplicados: coeficiente de determinação (R^2) e o desvio relativo absoluto médio (AARD%). O coeficiente de determinação (R^2) demonstra a qualidade do ajuste do modelo, sendo que valores próximos a 1 indicam um ajuste mais preciso. Geralmente, o R^2 é calculado através da Equação 3 (ROSTAMI *et al*, 2019):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{exp.} - y_i^{cal.})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i^{exp.} - \bar{y}^{exp.})^2} \quad (3)$$

O cálculo do valor do desvio relativo absoluto médio (AARD%) mede a magnitude total do erro de estimativa em relação aos dados experimentais. Valores mais altos de AARD%, indicam uma menor precisão do modelo. O AARD% é obtido a partir da Equação 4 (ROSTAMI *et al*, 2019):

$$AARD\% = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{(y_i^{exp.} - y_i^{cal.})^2}{y_i^{exp.}} \right| \right) \quad (4)$$

Onde, $y_i^{exp.}$, $y_i^{cal.}$, $\bar{y}^{exp.}$ e N são respectivamente, os dados experimentais, dados de previsão, média das variáveis experimentais e o número total de dados experimentais.

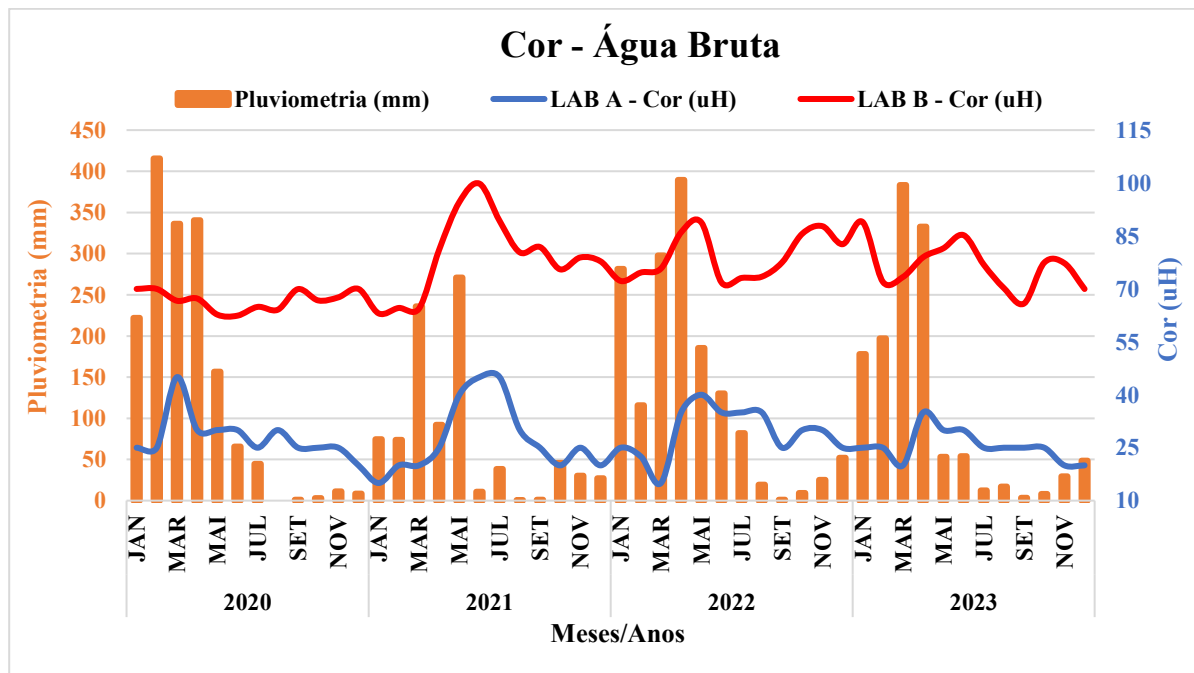
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Influência das chuvas nos parâmetros de qualidade

Durante o período de 2020 e 2023, os resultados dos parâmetros de qualidade foram relacionados graficamente com o índice pluviométrico. Esses gráficos permitiram examinar a distribuição da concentração de cada parâmetro. Foi considerado a média mensal de chuvas da RMF, pois a ETA está localizada nessa região. Os parâmetros da água bruta do laboratório A e B são valores, respectivamente, mensais e médias mensais. Já os parâmetros da água tratada, devido à maior quantidade de dados disponíveis por mês, os dados do laboratório A e B foram agrupados em médias mensais.

A Figura 13 mostra a correlação entre o parâmetro cor da água bruta e o índice de pluviometria, sendo monitorado ao longo do período de 2020 e 2023. Durante os anos estudados, os resultados de cor para água bruta realizadas nos dois laboratórios foram diferentes. No laboratório A, os valores de cor variaram entre 15 a 45 uH, enquanto o laboratório B obteve valores na faixa de 60 e 100 uH.

Figura 13 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro cor na água bruta



Fonte: Próprio autoria.

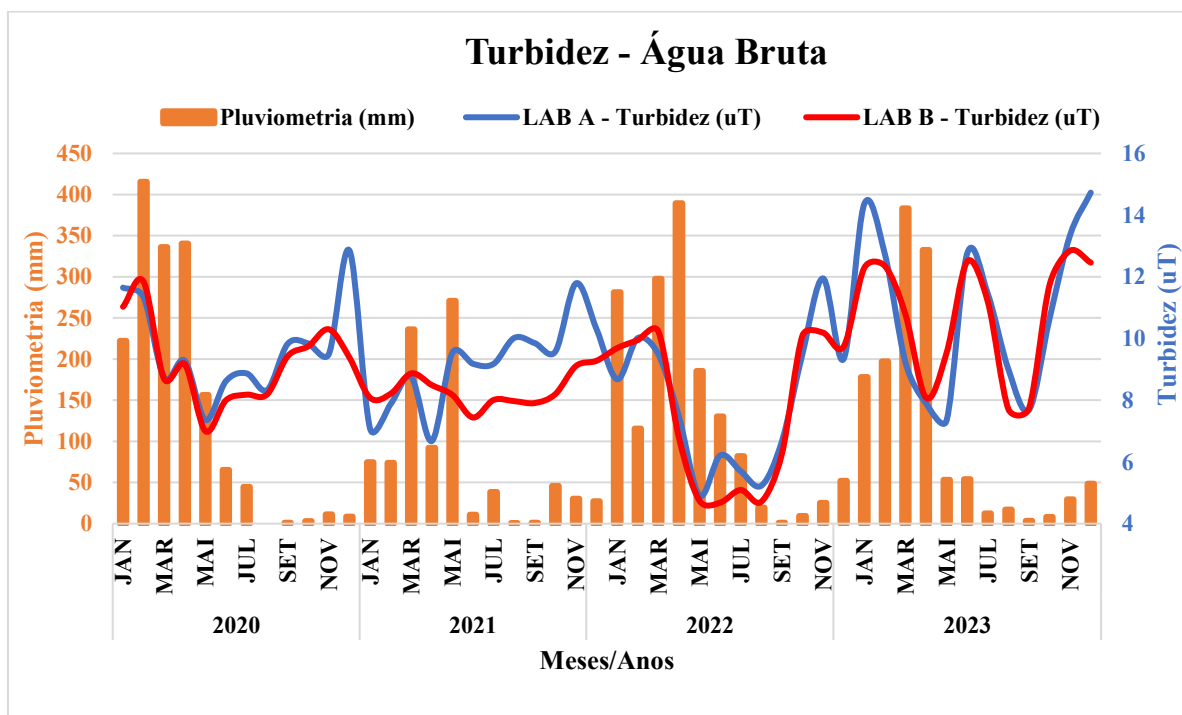
Essa discrepância de resultados entre os laboratórios é devido ao procedimento e a finalidade da análise para cada ambiente: o laboratório A realiza a cor verdadeira (filtração da água bruta) e preza pela sanitização, enquanto o laboratório B considera apenas a cor aparente (não há filtração da água bruta) e está interessado em avaliar a eficiência operacional antes e depois do tratamento. Os valores de cor verdadeira analisados no laboratório A permaneceram abaixo de 75 uH, o valor máximo permitido (VMP) conforme a Resolução do CONAMA N°357/05.

Em relação ao efeito sazonal, os resultados do parâmetro cor no laboratório A, foram registradas elevadas concentrações em alguns meses do primeiro semestre de cada ano, esse período geralmente é marcado por alta demanda de chuvas na RMF. O aumento da concentração do parâmetro cor em eventos chuvosas é relacionado ao escoamento superficial que carrega as substâncias húmicas e esgoto doméstico para o manancial.

No laboratório B, os resultados de cor tendem a aumentar gradativamente conforme se inicia a estação chuvosa, atingindo seu pico máximo nos meses de maio (2022) ou junho (2021 e 2023), seguindo com o decaimento das concentrações nos meses posteriores. Após esse período, só em novembro e dezembro que é observado maiores concentrações de cor, que pode ser devido as chuvas. Em 2020, o laboratório B obteve maiores níveis de cor no segundo semestre, que possivelmente é provocado pelo lançamento de efluentes domésticos no manancial.

A Figura 14 apresenta os valores de turbidez da água bruta em relação a pluviometria para o período de estudo, no qual os resultados têm similaridade. Os valores de turbidez das amostras de água bruta variaram entre 4 a 15 uT nos dois laboratórios, mostrando que todos estão dentro do padrão de potabilidade, cujo o VMP pela Resolução CONAMA N°357/05 é de 100 uT.

Figura 14 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro turbidez na água bruta

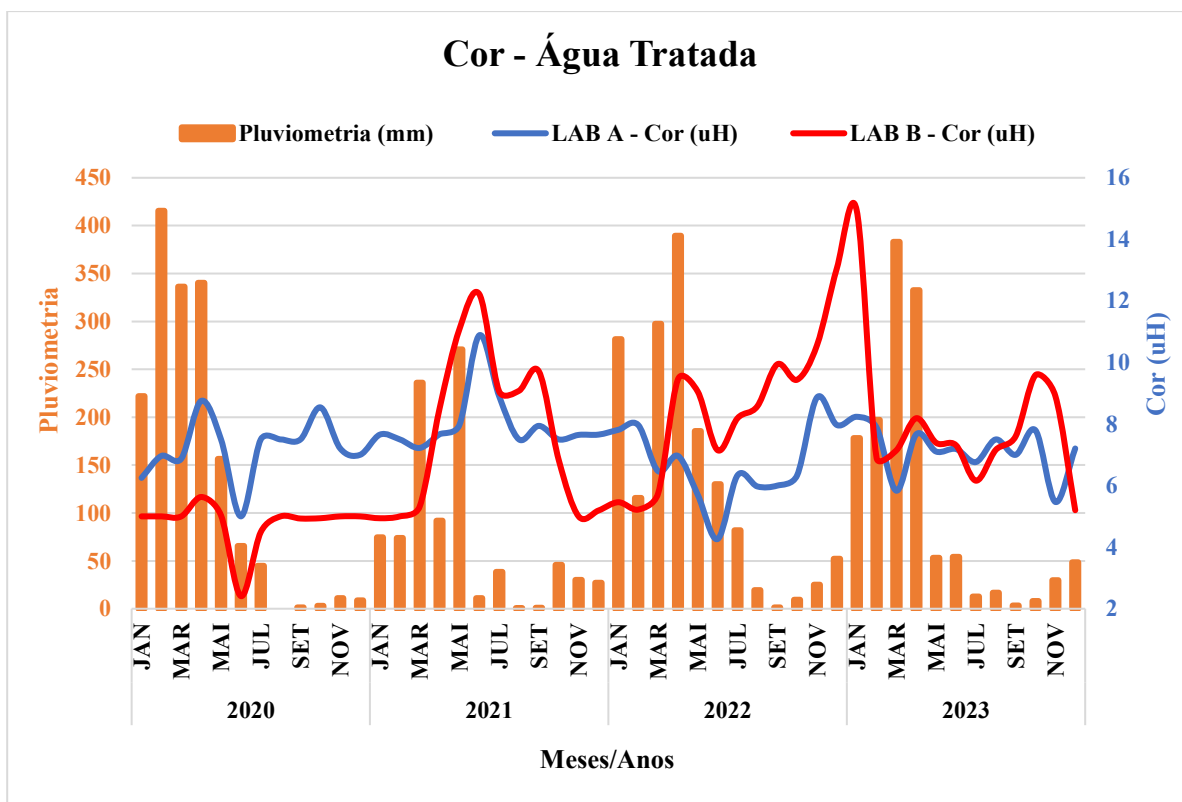


Fonte: Própria autoria.

Plotando os dados, vemos que em algumas situações há uma relação do aumento da turbidez em eventos de chuvas, que pode ser decorrente do escoamento superficial que transporta detritos para o interior do manancial superficial. Em contrapartida, em alguns meses a turbidez reduziu em épocas de chuvas e registrou maiores índice na estação seca. Santos e Sampaio, (2010) pontua que a redução da turbidez da água bruta na estação chuvosa está relacionada com níveis baixos do pH, que causam à dissolução das partículas suspensas. E ainda segundo os autores, o aumento da turbidez no manancial durante o segundo semestre é devido alta radiação solar da região que favorece o crescimento excessiva de flora.

Já a Figura 15 mostra a variação da cor aparente na saída do tratamento e do índice de precipitação entre um intervalo de tempo. Durante o período analisado, a média dos dados variaram entre 2 e 15 uH nos dois laboratórios. Em ambos os casos, os resultados não superaram o VMP de 15 uH, conforme estabelecido no Anexo XX Portaria de Consolidação N° 5/2017.

Figura 15 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro cor na água tratada

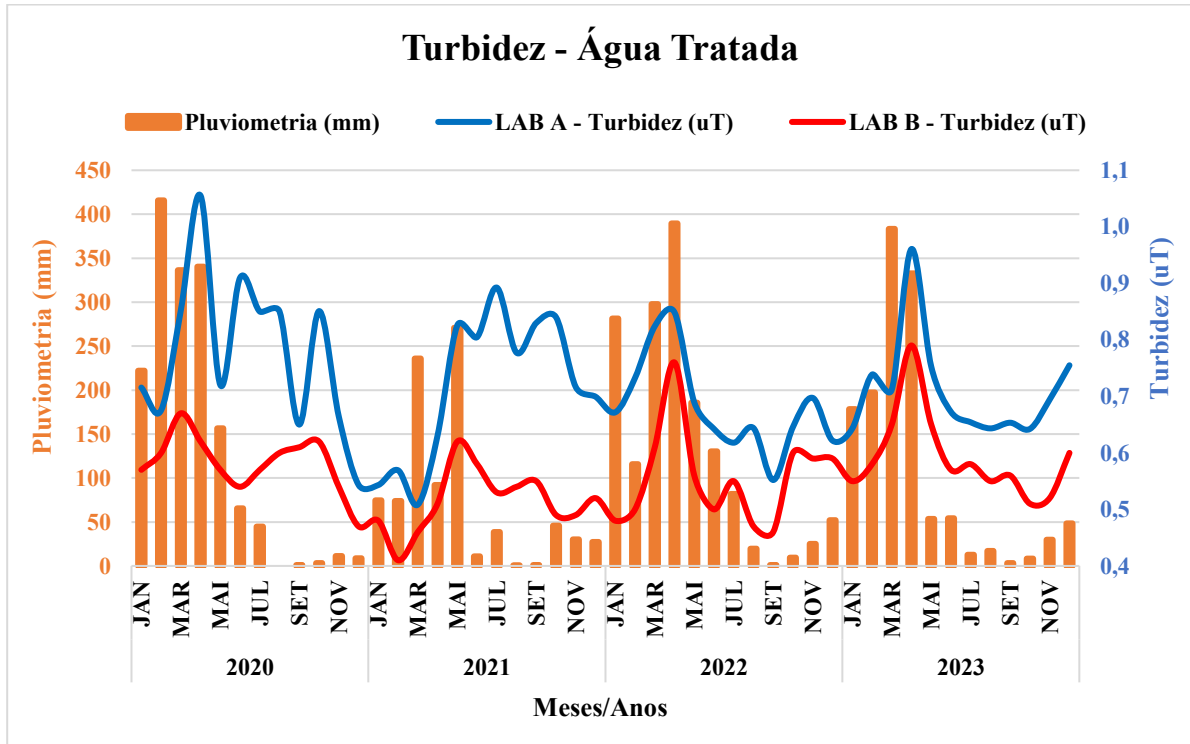


Fonte: Própria autoria.

Como pode-se observar, os dados não seguem uma distribuição normal exata. No laboratório A, a maioria dos valores da cor aparente permaneceu estável, com variações de concentrações entre 6 e 9 uH, indicando que a interferência da precipitação é mínima e que a água tratada está esteticamente livre de substâncias dissolvidas após tratamento. Já o laboratório B, registrou-se maiores concentrações de cor aparente na saída do tratamento em alguns meses com chuvas, como por exemplo, maio (2021), abril (2022) e janeiro (2023). A baixa concentração de cor em meses que costumam chover, pode ser relacionada à adição de maiores dosagens de produtos químicos, como coagulantes e derivados de cloro, utilizados para melhorar o processo de tratamento da água. Esses produtos são aplicados em maior quantidade para impedir o aumento de impurezas, como matéria orgânica.

Avaliou-se o comportamento da turbidez da água tratada na saída do tratamento levando em conta a precipitação de chuva (Figura 16). Os resultados do parâmetro turbidez nos dois laboratórios estão compreendidos entre 0,4 e 1,1 uT. Logo, a turbidez na saída do tratamento tem obtido resultados que estão distantes de atingir 5 uT, que é o VMP no Anexo XX Portaria de Consolidação N° 5/2017.

Figura 16 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro turbidez na água tratada



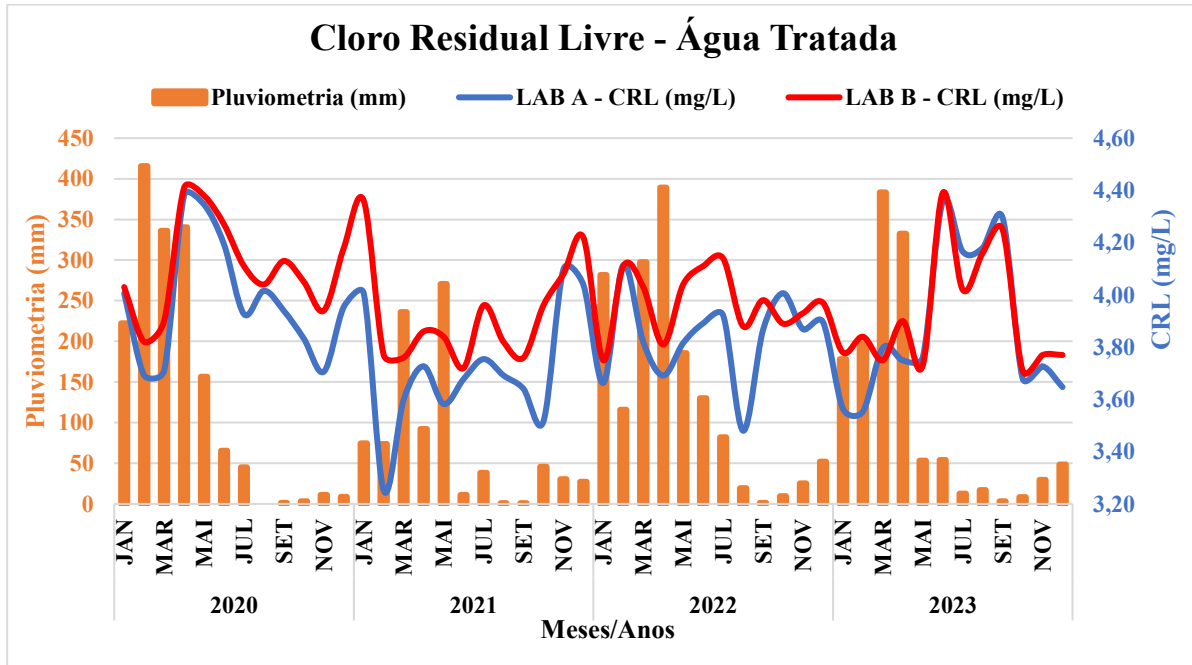
Fonte: Própria autoria.

Observa-se uma semelhança entre os comportamentos registrados em 2022 e 2023, onde os níveis de turbidez da água tratada foram mais elevados durante o primeiro semestre de ambos os anos, mesmo após o processo de tratamento. Além disso, no segundo semestre de 2020, tanto o laboratório A quanto o B detectaram níveis altos de turbidez, o que também foi verificado na estação seca de 2021 para o laboratório A.

Segundo ANA (2023), esse perfil com variações aleatórias observada nos parâmetros cor e turbidez da água tratada, são resultantes dos lançamentos de poluentes em corpo d'água ou do efeito de lixiviação de escoamento superficial provocado por chuvas.

A Figura 17 apresenta os dados do parâmetro cloro residual livre (CRL) da água tratada para ETA, relacionados com a precipitação de chuvas. Observa-se que as concentrações de CRL na água tratada, analisadas nos laboratórios A e B, situaram-se na faixa 3 e 4,5 mg/L. Ambos os laboratórios registraram elevadas concentrações de cloro em períodos com alta e baixa precipitação de chuva, indicando que a dosagem de cloro aplicada no tratamento de água deve ser ajustada levando em conta as diferentes condições climáticas.

Figura 17 – Resultados dos laboratórios A e B para o parâmetro cloro residual livre na água tratada

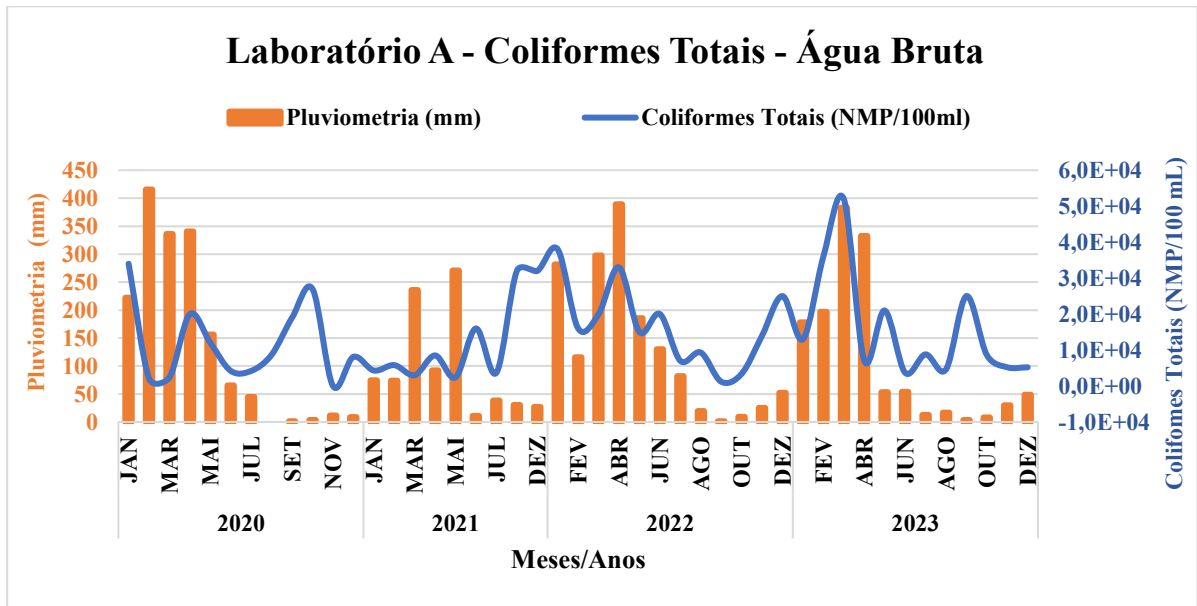


Fonte: Própria autoria.

Destaca-se que a concentração de CRL na saída do tratamento durante os anos analisados esteve acima de 3 mg/L, indicando as altas dosagens de cloro na etapa desinfecção, visando à eliminação de microrganismos patogênicos. Os resultados mostraram um bom desempenho da ETA em relação a esse parâmetro, já que nenhum dos laboratórios registou concentrações de cloro abaixo de 0,2 mg/L ou acima de 5 mg/L.

Analisando graficamente os resultados das análises do laboratório A, referentes às amostras de água bruta captada pela ETA, observando o parâmetro de coliformes totais em relação ao índice pluviométrico registrado na RMF durante o período de estudo (Figura 18), é possível identificar uma alta quantidade de microrganismos tanto em estações de chuva (primeiro semestre de 2022 e 2023) quanto em estações de seca (segundo semestre de 2020 e 2021). A contaminação por coliformes totais variou entre 5 e $5,2 \times 10^4$ NMP/100mL aos longos dos anos de estudo.

Figura 18 – Resultados do laboratório A para o parâmetro coliformes totais na água bruta

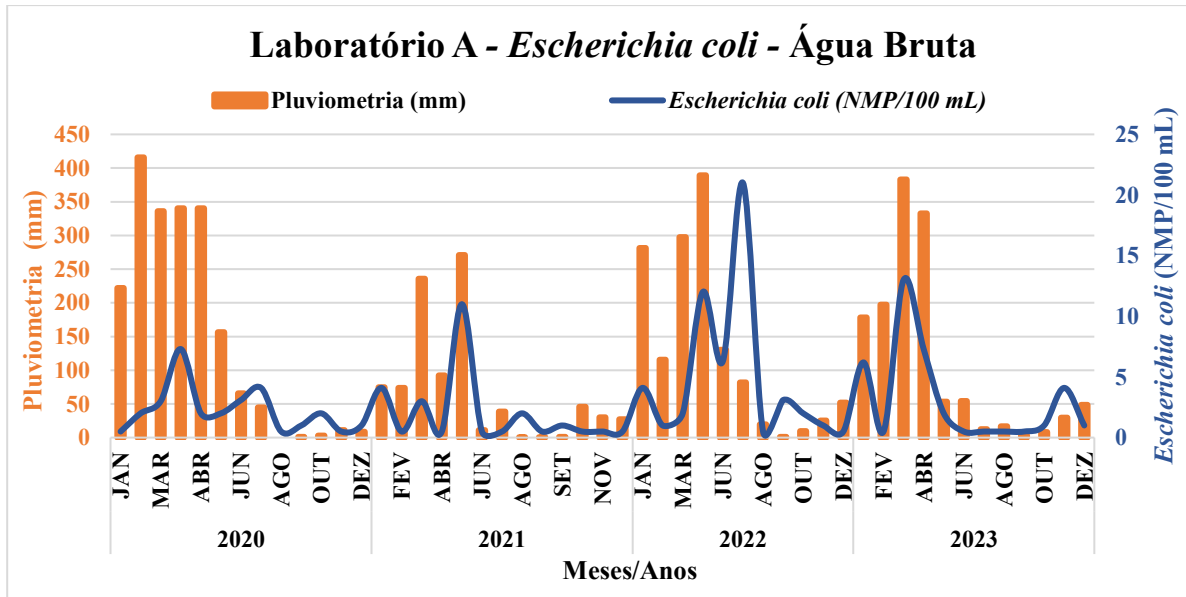


Fonte: Própria autoria.

Durante o período chuvoso, a contaminação por coliformes totais é causada pela descarga de sedimentos do solo ou efluentes no manancial superficial, transportando consigo microrganismos desse grupo. Já a presença de microrganismos do grupo coliforme totais no segundo semestre pode ser decorrente ao descarte de efluentes. De acordo com o regulamento da Resolução CONAMA 357/05, não há limite máximo estabelecido para coliformes totais em corpos de água.

As amostras da água bruta analisadas pelo laboratório A identificaram a presença de coliformes termotolerantes, e a partir desses resultados, foi feita uma relação gráfica com período das chuvas durante os anos de estudo (janeiro de 2020 até dezembro de 2023), conforme representado na Figura 19. Os resultados ao longo do período analisado variaram entre <1 a 21 NMP/100 mL, com a maioria apresentando baixa quantidade de *Escherichia coli*. Nota-se que, apesar de em baixa proporções, a contaminação por *Escherichia coli* foi identificado na maioria das vezes no primeiro semestre de cada ano.

Figura 19 – Resultados do laboratório A para o parâmetro *Escherichia coli* na água bruta



Fonte: Própria autoria.

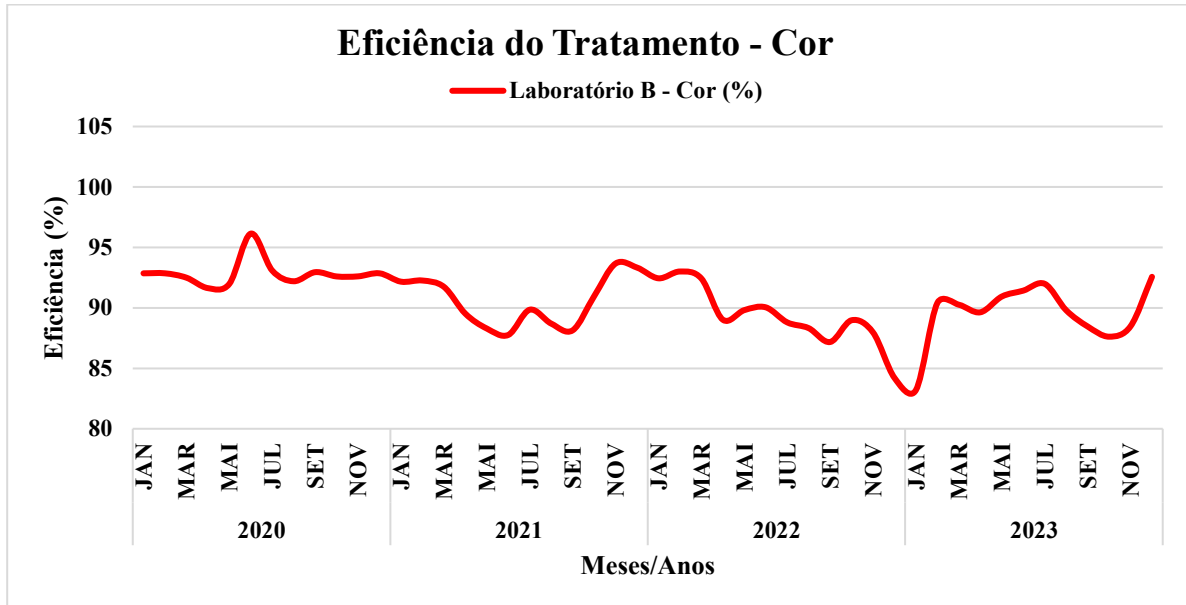
A contaminação por coliformes termotolerantes durante o período de chuvas está relacionado as atividades antrópicas próximas ao manancial superficial. Quando ocorrem chuvas intensas, o escoamento superficial transporta resíduos, como esgoto não tratado e excrementos de animais, que acabam sendo lançados nos corpos d'água. Esses poluentes contribuem significativamente para a degradação da qualidade da água bruta, aumentando a presença de coliformes termotolerantes.

Embora tenha sido detectada a presença de coliforme termotolerante em todos os pontos de coleta, os resultados ainda estão abaixo do VMP estabelecido pela Resolução n° 375 do CONAMA 357/2005, que é de 1000 NMP/100 mL.

4.2 Eficiência do tratamento

A Figura 20 apresenta o desempenho da ETA com relação à eficiência de remoção de cor aparente na saída do tratamento. Nesse gráfico, estão apenas os valores do laboratório B, pois a água bruta não passou um sistema de filtração. Sem esse pré-tratamento, é possível avaliar com mais precisão o desempenho na remoção da cor após a etapa de desinfecção. Verifica-se, no geral, eficiência de remoção de cor aparente próximo ou superior a 90% na saída do tratamento durante os anos estudados, com algumas exceções, como em janeiro de 2023, quando a remoção foi inferior a 85%.

Figura 20 – Eficiência de remoção de cor aparente na saída do tratamento, análise realizada no laboratório B

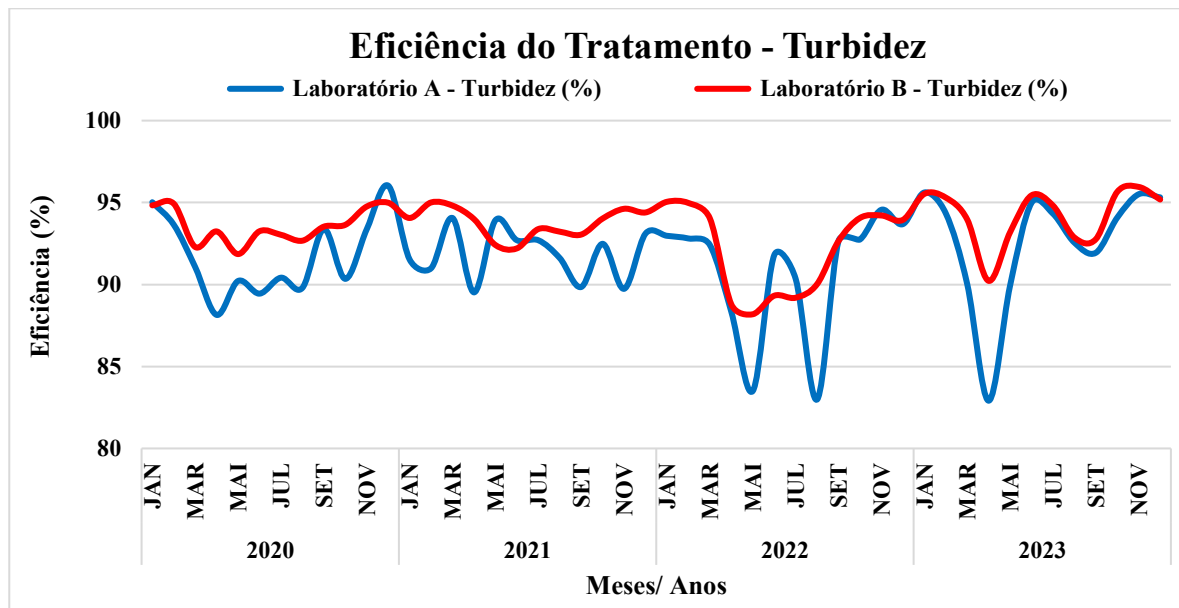


Fonte: Própria autoria.

A Figura 21 mostra a eficiência de remoção de turbidez na saída do tratamento. No caso do laboratório A (curva azul), relacionou-se o resultado do parâmetro turbidez na água bruta com a turbidez da água tratada para o mesmo dia, durante os quatro anos de pesquisa. Já o laboratório B (curva laranja) considerou a média mensal das análises de turbidez realizadas ao longo dos anos de estudo para determinar a eficiência de remoção do parâmetro.

Nota-se que, de acordo com os dados do laboratório A, a eficiência de remoção de turbidez na saída do tratamento é próxima a 90%, e em algumas vezes até superior. No entanto, houve exceção de alguns meses, como maio e setembro de 2022 e abril de 2023, nos quais registraram eficiência de remoção abaixo de 85%. Enquanto isso, os resultados do laboratório B mostraram uma eficiência de remoção de turbidez superior a 90% na maioria dos anos, com exceção de alguns meses (abril, maio, junho e julho de 2023), apresentando um desempenho de remoção de turbidez abaixo de 90%.

Figura 21 – Eficiência de remoção de turbidez na saída do tratamento, análises realizadas nos dois laboratórios



Fonte: Própria autoria.

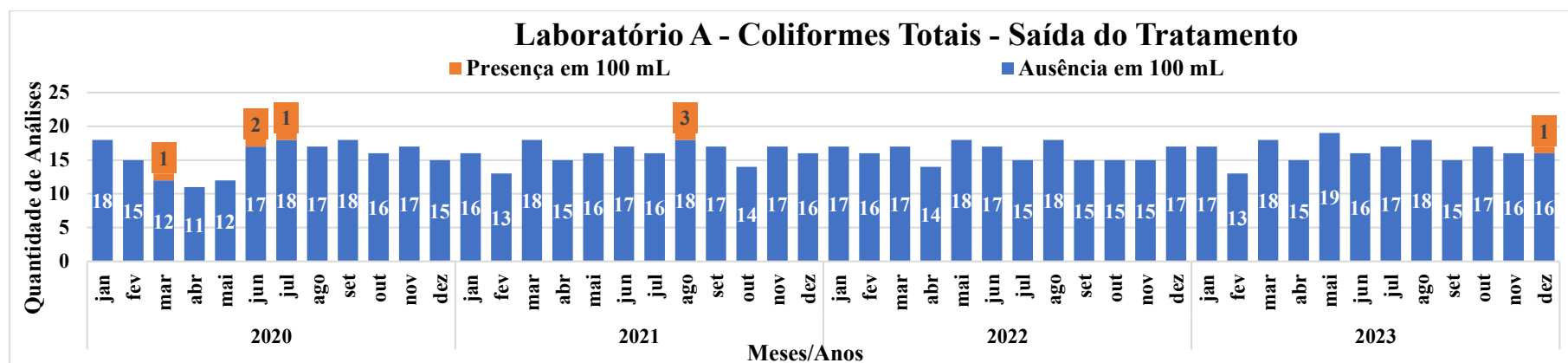
Os meses em que a eficiência de remoção dos parâmetros cor e turbidez ficou abaixo de 90% podem ser explicados pela dosagem e concentração insuficiente dos produtos químicos aplicados durante o tratamento, que não foram suficientes para tratar adequadamente a água bruta. Além disso, alta intensidade de chuvas nesses períodos afetaram negativamente a qualidade da água bruta, refletindo nos resultados da água tratada.

De acordo com a Figura 22 (a), foram identificadas as contaminações por bactérias do grupo coliformes totais no ponto de coleta da torneira do laboratório nos seguintes períodos: uma presença em março, duas em junho e uma em julho de 2020; três presenças em agosto de 2021; e uma presença em dezembro de 2023. Vale ressaltar, que a presença de coliformes totais não indica necessariamente a ocorrência de contaminação fecal, pois esses microrganismos podem ser encontrados no ambiente, como no solo, na água e nas plantas. Dessa forma, essas contaminações podem estar relacionadas à ineficiência na etapa de desinfecção ou à contaminação pós-tratamento. Provavelmente, foram adotadas medidas preventivas e corretivas para solucionar o problema e evitar novas ocorrências (BRASIL, 2017).

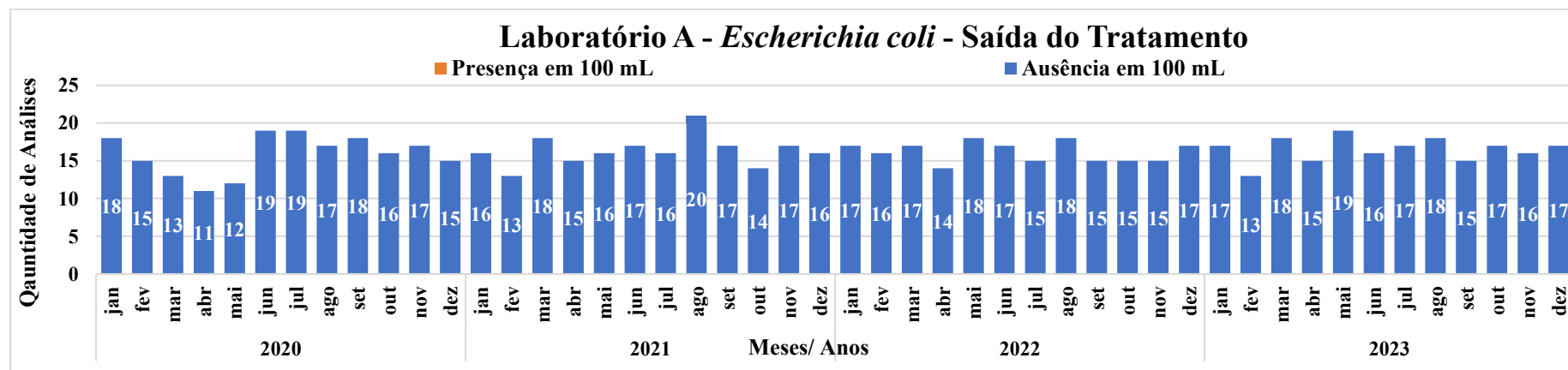
Conforme mostrado na Figura 22 (b), a bactéria *E.coli* não foi detectada na saída do tratamento, o que indica a eficácia do processo de desinfecção.

Figura 22 – Resultados do laboratório A para o parâmetro (a) coliformes totais e (b) *Escherichia coli* na saída do tratamento

(a) Coliformes Totais



(b) *Escherichia coli*



Fonte: Própria autoria.

4.3 Predição da dosagem dos produtos químicos

Os testes de tratabilidade demandam tempo de análise e requerem a presença de um analista para determinar a dosagem ótima. Uma alternativa para simplificar e otimizar esse procedimento é o uso de modelos de aprendizado de máquina, permitindo que o próprio analista possa prever as dosagens dos produtos químicos por algoritmo. Nessa seção, apresento dois modelos de aprendizado de máquina para prever as dosagens dos produtos químicos.

Inicialmente, os dados dos parâmetros da água bruta e os produtos químicos foram adicionados na ferramenta *Python*. A Figura 23 apresenta os dados antes do tratamento e após remoção dos *outliers* e a normalização:

Figura 23 – Dados nas seguintes etapas: (a) sem tratamento, (b) após a remoção de outliers e (c) após a normalização

(a) Sem tratamento dos dados

	TURBIDEZ	COR	Coliforme Totais	Escherichia coli	DIÓXIDO DE CLORO	POLÍMERO CATIÔNICO LÍQUIDO	CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC-23)	CLORO GASOSO	CLORO ATIVO
count	1456.000000	1456.000000	1456.000000	1456.000000	1456.000000	1456.000000	1456.000000	1456.000000	1456.000000
mean	8.987980	75.434368	26859.941552	11.632589	542.061957	1817.560440	4720.388736	1729.021044	4697.987328
std	2.139710	9.884413	51379.598857	58.912565	153.626153	444.730581	436.850636	407.493379	635.622125
min	3.929167	56.666667	5.830000	0.500000	171.410000	882.000000	2992.000000	720.000000	3010.570000
25%	7.843125	70.000000	4600.000000	0.500000	439.922500	1419.000000	4455.000000	1440.000000	4317.752500
50%	8.980000	74.166667	9300.000000	1.250000	604.800000	1845.500000	4658.000000	1680.000000	4713.895000
75%	10.307292	80.000000	25000.000000	4.100000	661.632500	2172.000000	4932.000000	2020.000000	5142.910000
max	14.000000	100.000000	250000.000000	410.000000	812.160000	3018.000000	6936.000000	3600.000000	6603.960000

(b) Remoção dos outliers

	TURBIDEZ	COR	Coliforme Totais	Escherichia coli	DIÓXIDO DE CLORO	POLÍMERO CATIÔNICO LÍQUIDO	CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC-23)	CLORO GASOSO	CLORO ATIVO
count	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000
mean	9.128599	74.952161	17113.290368	3.046728	537.066581	1777.601471	4715.255147	1724.973507	4708.241890
std	2.100073	9.897442	22203.877202	4.085021	157.258896	426.298261	415.838513	396.247819	649.948704
min	3.961667	56.666667	5.830000	0.500000	171.410000	882.000000	2992.000000	720.000000	3010.570000
25%	7.905417	70.000000	4600.000000	0.500000	431.750000	1396.000000	4456.750000	1440.000000	4317.220000
50%	9.102083	73.333333	8800.000000	1.250000	596.425000	1816.000000	4658.000000	1680.000000	4759.380000
75%	10.404167	80.000000	21000.000000	4.100000	665.280000	2111.000000	4932.000000	2020.000000	5147.055000
max	14.000000	100.000000	140000.000000	21.000000	812.160000	3018.000000	6302.000000	3000.000000	6603.960000

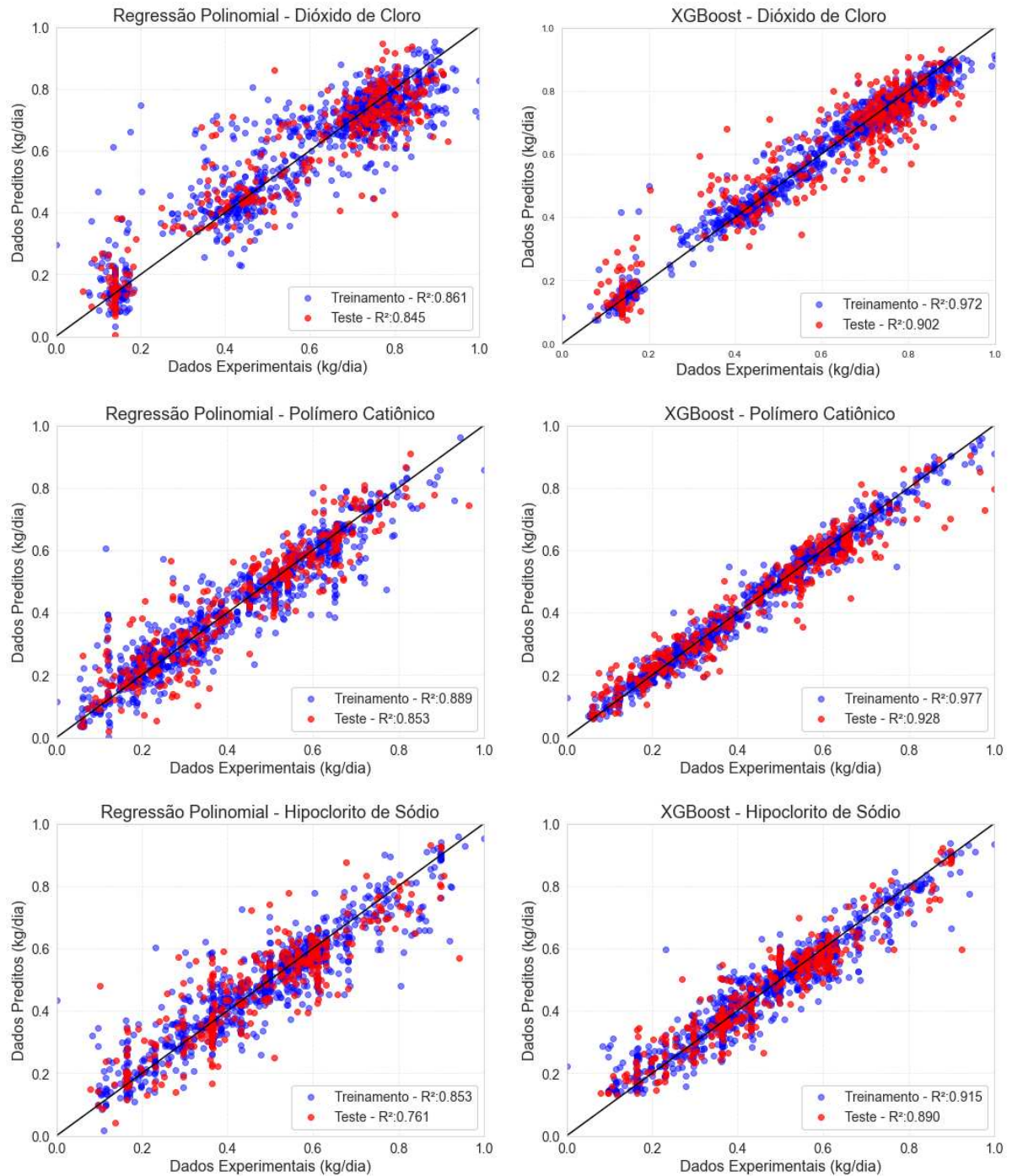
(C) Normalização dos dados

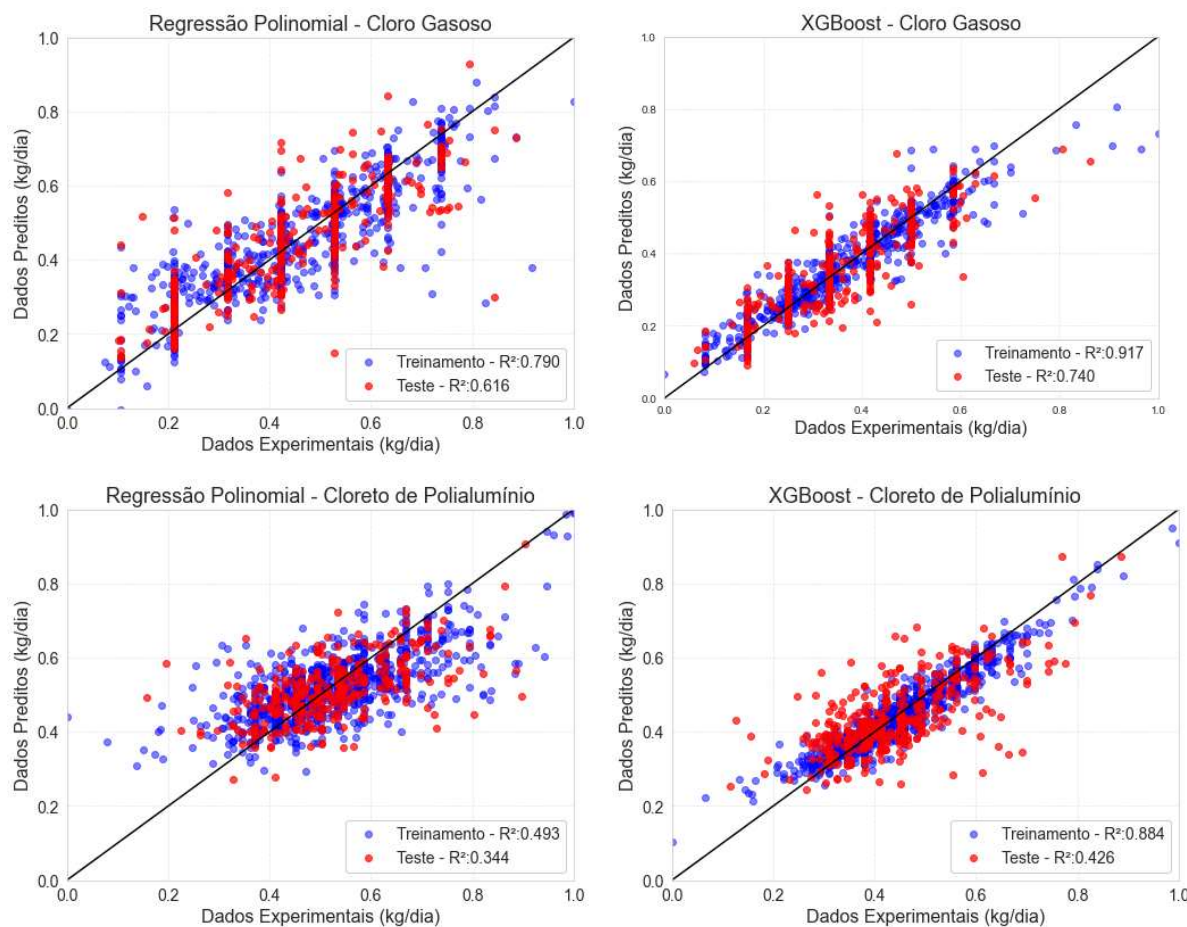
	TURBIDEZ	COR	Coliforme Totais	Escherichia coli	DIÓXIDO DE CLORO	POLÍMERO CATIÔNICO LÍQUIDO	CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC-23)	CLORO GASOSO	CLORO ATIVO
count	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000	1360.000000
mean	0.511776	0.437578	0.197761	0.199385	0.556536	0.435431	0.516497	0.452622	0.477954
std	0.167364	0.182722	0.126885	0.159415	0.196344	0.159662	0.100505	0.139034	0.144699
min	0.100000	0.100000	0.100000	0.100000	0.100000	0.100000	0.100000	0.100000	0.100000
25%	0.414295	0.346154	0.126253	0.100000	0.425044	0.292509	0.454018	0.352632	0.390901
50%	0.509663	0.407692	0.150254	0.129268	0.630647	0.449813	0.502659	0.436842	0.489339
75%	0.613432	0.530769	0.219972	0.240488	0.716615	0.560300	0.568882	0.556140	0.575648
max	0.900000	0.900000	0.900000	0.900000	0.900000	0.900000	0.900000	0.900000	0.900000

Fonte: Própria autoria.

A Figura 24 apresenta os gráficos de dispersão de cada produto químico, obtidos por meio do modelo de regressão polinomial e XGBoost. Dessa forma, é possível observar o comportamento da dispersão em torno da reta bissetriz e a eficiência do modelo através das métricas.

Figura 24 – Modelo de regressão polinomial e XGBoost para cada produto químico





Fonte: Própria autoria.

No caso da Regressão Polinomial (PR), o desempenho está diretamente associado à ordem do polinômio. Os gráficos desse modelo comparam a dosagem ótima prevista com os valores experimentais. Vale ressaltar que, por ser um algoritmo mais simples, os valores de R^2 obtidos não apresentam uma previsão satisfatória para as dosagens dos produtos químicos.

Por outro lado, o modelo XGBoost, baseado em árvore de decisão, permite a otimização dos hiperparâmetros, resultando em previsões mais adequadas. Nota-se que valores de R^2 para os conjuntos de treinamento e teste são bastante semelhantes e satisfatórios na maioria dos testes, com algumas exceções. Isso sugere que o conjunto de dados está impactando diretamente o desempenho do modelo. Logo, conclui-se que o modelo XGBoost apresenta uma concordância ligeiramente melhor em comparação ao modelo regressão polinomial, no qual ele se adaptou melhor ao conjunto de dados de testes.

A Tabela 6 apresenta as métricas estatísticas dos modelos de regressão para cada produto químico. Valores baixos de AARD% e altos de R^2 (ou seja, mais próximo de 1) são preferíveis. Observa-se que o coeficiente de determinação utilizando ambos os modelos

apresentaram o melhor resultado para o polímero catiônico, com R^2 de 0,853 para a regressão polinomial e 0,928 para o XGBoost. Em contrapartida, o cloreto de polialumínio obteve menor precisão no coeficiente de correlação, com R^2 de 0,344 para regressão polinomial e 0,426 para XGBoost.

Quanto ao desvio absoluto relativo médio (AARD%) utilizando o modelo polinomial, os valores para cloreto de polialumínio apresentaram a melhor precisão, com 15,21%, enquanto o pior desempenho foi o do cloro gasoso, com 21,29%. Já com o modelo XGBoost, o AARD% com melhor ajuste foi hipoclorito de sódio, com 11,78%, enquanto o pior desempenho foi o cloreto de polialumínio.

Tabela 6 – Métricas estatísticas dos modelos para cada produto químico

Produto Químicos	Métricas (Teste)	Modelo de Regressão	
		Polinomial	XGBoost
Dióxido de Cloro	R^2	0,845	0,902
	AARD%	17,34	14,14
Polímero Catiônico	R^2	0,853	0,928
	AARD%	18,97	13,40
Hipoclorito de Sódio	R^2	0,761	0,890
	AARD%	17,19	11,78
Cloro Gasoso	R^2	0,616	0,740
	AARD%	21,29	16,56
Cloreto de Polialumínio	R^2	0,344	0,426
	AARD%	15,21	16,66

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os modelos avaliados, o XGBoost destacou-se como o mais eficiente, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,85 para a maioria dos produtos químicos, com exceção do cloro gasoso e do cloreto de polialumínio. Isso significa que o modelo XGBoost foi capaz de explicar mais de 85% da variação observada para a maioria dos produtos químicos, comprovando a precisão e bom desempenho do modelo. Apesar do alto percentual de desvio absoluto relativo médio (AARD%), o modelo XGBoost demonstrou o melhor desempenho, com 11,78% para o hipoclorito de sódio e 13,40% para polímero catiônico.

Mesmo com a bom desempenho do modelo XGBoost, ainda é possível melhorar a precisão do modelo ajustando os hiperparâmetros. No entanto, a menor precisão observada para alguns produtos químicos sugere que os dados podem não se ajustar bem aos modelos propostos. Isso indica a necessidade de utilizar modelos mais avançados para obter uma previsão mais adequada.

5 CONCLUSÃO

Os parâmetros de qualidade foram correlacionados com os índices pluviométricos e analisados ao longo do período de estudo. As altas concentrações dos parâmetros, registradas durante os eventos de chuvas, comprovaram a influência direta das precipitações. No entanto, as atividades antrópicas também provocam efeitos devastadores na qualidade das águas. A distribuição aleatória dos dados reforça tanto a influência das chuvas quanto o impacto dos despejos irregulares de esgotos nos corpos hídricos.

Embora água bruta tenha apresentado níveis elevados de cor, turbidez, coliformes totais e *Escherichia coli*, esses parâmetros ainda estão abaixo do valor máximos permitidos (VMP) estabelecidos pela resolução do CONAMA nº357/05. Na saída do tratamento, os parâmetros turbidez, cor e cloro residual livre também apresentaram valores abaixo do VMP, conforme estabelecido no Anexo XX Portaria de Consolidação Nº 5/2017, garantindo a segurança de consumo para a população.

Em relação à eficiência de remoção de turbidez e cor aparente, o processo de tratamento apresentou um desempenho positivo, com remoção eficaz de materiais em suspensão e dissolvidos. No entanto, as análises microbiológicas revelaram contaminações pontuais por coliformes totais na água coletada na torneira do laboratório, sugerindo falhas na etapa de desinfecção ou possíveis contaminações pós-tratamento. Diante desses resultados, uma investigação foi iniciada para identificar a causa raiz do problema e implementar as devidas medidas corretivas.

Nesse trabalho, aplicou-se o aprendizado de máquina para prever as dosagens de produtos químicos necessários no tratamento de água, com objetivo de otimizar o processo e reduzir o esforço operacional. Foram correlacionados os dados dos parâmetros de qualidade da água bruta com as dosagens dos produtos químicos, utilizando dois modelos de regressão: Polinomial e XGBoost. Entre eles, o XGBoost destacou-se como o mais eficiente, gerando resultados satisfatórios para três produtos químicos, conforme comprovado pelas métricas de coeficiente de determinação (R^2) e do desvio relativo absoluto médio (AARD%). A imprecisão das métricas observada para alguns produtos químicos sugere a necessidade de explorar modelos mais avançados de aprendizado de máquina, como árvore de decisão e floresta aleatória. Mesmo assim, o desempenho do XGBoost na previsão das dosagens foi notável, demonstrando ser uma ferramenta valiosa para reduzir o tempo dos testes de tratabilidade.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como próximos passos, pretende-se avaliar os efeitos das variações sazonais para outros parâmetros de qualidade, como fluoreto, ferro e alumínio, com o objetivo de verificar o comportamento desses dados por meio de análises estatísticas.

Utilizando novos dados de parâmetros de água bruta, essas informações serão usadas para prever, por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, a dosagem de produtos químicos, como o ácido fluossilícico, que ainda não foi testado. Além disso, serão verificados novos modelos de aprendizado de máquina. Esses modelos serão avaliados não apenas com as métricas de desempenho já utilizadas, como o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio relativo absoluto médio (AARD%), quanto novas métricas, como o erro quadrático médio (MSE) e o desvio relativo absoluto (ARD%), proporcionando uma ampliação da eficiência dos modelos.

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/08/ANA-ATLAS-Aguas-AbastecimentoUrbano2021-compressed.pdf>. Acesso em: 03 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas**, 2ª Edição Brasília: ANA, 2023. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/102373 Acesso em: 05 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos Recursos Hídricos 2023**: Relatório Pleno. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf>. Acesso em: 05 maio 2024.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. In: Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24th ed. Washington DC: APHA Press; 2023.

BARBOSA, Karoline Carvalho. **ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO ADAPTADO AOS RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO CEARENSE**. 2021. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Crateús - Ce, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/58526/1/2021_tcc_kcarbosa.pdf. Acesso em: 24 março 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U. 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_ltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 17 maio 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Disponível em: http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf. Acesso em: 05 maio 2024.

CAMPOS, J. N. B. **Paradigms and public policies on drought in Northeast Brazil: a historical perspective**. Environmental Management, New York, v. 55, n. 5, p. 1052-1063, 2015. DOI: 10.1007/s00267-015-0444-x. Acesso em: 30 maio 2024

CEARÁ. **Estudo Setorial Especial Recursos Hídricos**: Ceará 2050. Governo do Estado do Ceará. 2018. Disponível em: <http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wpcontent/uploads/2018/10/ceara-2050-estudo-setorial-especial-recursos-hidricos.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2024

CEARÁ 2050. **MÚLTIPLAS VISÕES SOBRE UM SÓ CEARÁ**. Fortaleza: CEARÁ, 2023. Disponível em: https://www.mpce.mp.br/wp-content/uploads/2023/08/ceara-2050-relatorio-ceara-2050_07022022_alta-resolucao-para-impressao-2.pdf Acesso em: 05 abril 2023.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. 2016. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2021/09/Apendice-C-Significado-ambiental-e-sanitario-das-variaveis-de-qualidade-das-aguas-e-dos-sedimentos-metodologias-analiticas-e-de-amostragem.pdf>. Acesso em: 05 maio 2024.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. Portal Hidrológico do Ceará. **Avaliação Mensal da Situação dos Açudes pela COGERH**. Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2022/12/avaliacao-mensal-da-situacao-dos-acudes-set-22.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. Diretoria de Operações Gerência de Desenvolvimento de Monitoramento Qualitativo e Quantitativo (GEMON). **Qualidade das águas dos açudes monitorados pela COGERH – campanha de novembro/2023**. Fortaleza, 2024. Disponível em: https://cdn.funceme.br/hidroce/uploads/documentos/Relat%C3%B3rio%20IET%20nov%202023_novo_final.pdf. Acesso em: 15 maio 2024.

CONTERATO, Eliane; STEIN, Ronei T.; ESPARTEL, Lélis; e outros. **Saneamento**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788595024779. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595024779/>. Acesso em: 06 jul. 2024.

DANTAS, A. D. B., DI BERNARDO, L., VOLTAN. P. E. N., KOYAMA, M. H. *et al.* **Avaliação da eficiência do cloro gerado a partir de sal nas etapas de pré e pós-cloração da água do rio Piracicaba**. Congresso ABES FENASAN (2017). Disponível em: http://evolvedoc.com.br/aesabesp/detalhes-2514_avaliacao-da-eficiencia-do-cloro-gerado-a-partir-de-sal-nas-etapas-de-pre-e-pos-cloracao-da-agua-do-rio-piracicaba. Acesso em: 5 maio 2024.

DIAS, Ana Carla Holanda et al. **Perfuração Indiscriminada de Poços em Iracema/CE: Um Estudo Sobre o Paradoxo da Atual Crise Hídrica**. Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas, 2018. Editora Universidade, p.335-372, 2018. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29167/18875>. Acesso em: 25 maio 2024.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS**. 1ª Edição. Brasília, 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4321633/mod_resource/content/1/Manual%20cont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf. Acesso em: 25 maio 2024.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 5ª Edição. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica>. Acesso em: 20 maio 2024.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Fortaleza: FUNCEME, 2024. Disponível em: < <https://chuvas.funceme.br/> >. Acesso em: 20 maio 2024

GADELHA, J. E. F, S.; FERREIRA, K. F.; MARCIONÍLIO, S. M.L.O.; CASTRO. R.M.; *et al.* **CONSEQUÊNCIAS DA EUTROFIZAÇÃO EM CORPOS HÍDRICOS**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.3, ISSN. 2178-6925, mar, 2022. Disponível em: https://revistas.unipacto.com.br/storage/publicacoes/2022/895_consequencias_da_eutrofizacao_em_corpos_hidricos.pdf. Acesso em: 12 maio 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Índice Municipal de Alerta (IMA)**. Fortaleza: IPECE, 2020. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2021/10/IMA_2021.pdf. Acesso em: 25 maio 2024.

KATAYAMA, V.T.; MONTES, C.P. FERRAZ, T.H.; MORITA, D.M. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. Rev.Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 4, p. 559-569, 2015. Disponível em: http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf. Acesso em: 05 maio 2023.

MARCO DE GESTÃO SOCIOAMBIENTAL DO PROJETO. **Projeto de Apoio à Melhoria da Segurança Hídrica e Fortalecimento da Inteligência na Gestão Pública do Estado do Ceará – Projeto**. Ceará: MGSA, 2018. Disponível em: http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf. Acesso em: 05 maio 2023.

MAHESH, B. **Machine Learning Algorithms - A Review**. *International Journal of Science and Research (ISJR)*, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/VqTdZyTDtrqhZySpQ4FTpZk/> Acesso em: 15 maio 2024.

MURPHY, Kevin P. **Probabilistic Machine Learning: An Introduction**, 2021.

NETO, Amílcar; MACIEL, Francisco. **Python para Data Science e Machine Learning Descomplicado**. Rio de Janeiro: Editora Alta Livros, 2021. *E-book*. ISBN 9786555203172. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555203172/>. Acesso em: 07 agosto 2024

PINHEIRO, Larissa Souza. **AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ÁGUA GELADA PARA REFINARIAS DE ÓLEO VEGETAL UTILIZANDO MINERAÇÃO DE DADOS**. 2022. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/70204/3/2022_tcc_lspinheiro.pdf. Acesso em: 5 julho 2024.

REIS, L.R; MEDONÇA, A.S.F; REIS, J.A.T. *et al.* **Eutrofização em reservatórios apresentando baixos tempos de detenção – estudo de caso: uhe mascarenhas**. *Contribuciones A Las Ciencias Sociales*, [S.L.], v. 16, n. 10, p. 18972-18989, 2 out. 2023. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.55905/revconv.16n.10-016>

RICHTER, C.A., **Água: Métodos e tecnologia de tratamento**, 5ª Edição. São Paulo, Blucher, 2021.

ROSTAMI, Alireza; SHOKROLLAHI, Amin; SHAHBAZI, Khalil; GHAZANFARI, Mohammad Hossein. Application of a new approach for modeling the oil field formation damage due to mineral scaling. **Oil & Gas Science And Technology – Revue D'ifp Energies Nouvelles**, [S.L.], v. 74, p. 62, 2019. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.2516/ogst/2019032>.

SANTOS, Alessandra C.; REIS, Alan; MENDIONDO, Eduardo M. **Segurança hídrica no Brasil: situação atual, principais desafios e perspectivas futuras**. Revista DAE, v. 68, n 225, pp 167-179, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343953130_Seguranca_hidrica_no_Brasil_situacao_atual_principais_desafios_e_perspectivas_futuras. Acesso em: 05 maio 2024.

SANTOS, G. O., & SAMPAIO, G. M. M. S. (2010). **Interrelações entre as chuvas, a qualidade da água bruta e o tratamento da água**: estudo de caso. *Revista Tecnologia*, 30(2). Recuperado de <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/1050>

SECKLER, Sidney. **Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788595153851. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153851/>. Acesso em: 08 agosto. 2024.

SICSÚ, Abraham L.; SAMARTINI, André; BARTH, Nelson L. **Técnicas de aprendizado de máquina**. São Paulo: Editora Blucher, 2023. E-book. ISBN 9786555063974. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555063974/>. Acesso em: 07 conjuntos. 2024.
WHO. **Guidelines for drinking-water quality**, fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization; 2017 Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/en/. Acesso em: 17/06/2024

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. Brasília: SNIS, Dez/2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 22 maio 2024.