



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LUANE LINS DA SILVA

AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE EFLUENTES EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS NA BACIA DO RIO IPOJUCA

RECIFE – PE
JULHO/2023

LUANE LINS DA SILVA

AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE EFLUENTES EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS NA BACIA DO RIO IPOJUCA

Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Controle e Remediação da Poluição

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva

Coorientador: Prof. Dr. Valmir Cristiano M. de Arruda

RECIFE – PE
JULHO/2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586a Silva, Luane Lins
Avaliação de qualidade de efluentes em estações de tratamento de esgotos na bacia do rio Ipojuca / Luane Lins Silva. -
2023.
79 f. : il.
- Orientador: Vicente de Paulo Silva.
Coorientador: Valmir Cristiano Marques de Arruda.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, Recife, 2023.
1. Estatística descritiva. 2. esgoto. 3. multivariada. 4. tratamento. I. Silva, Vicente de Paulo, orient. II. Arruda,
Valmir Cristiano Marques de, coorient. III. Título

CDD 620.8

LUANE LINS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE EFLUENTES EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS NA BACIA DO RIO IPOJUCA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Controle e Remediação da Poluição.

Aprovada em _____/_____/_____

Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva
Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Leocádia Terezinha Cordeiro Beltrame
Membro Externo

Prof. Dr. Alex Souza Moraes
Membro Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o criador de tudo e a minha família pelo apoio e incentivo incondicional. Meus pais pelo estímulo e persistência e minha irmã incentivo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo despertar dos estudos científicos, meu primeiro laboratório. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental pela oportunidade.

À COMPESA pela oportunidade confiada para o desenvolvimento do projeto; a Gerência de Programas Especiais, em específica a Ericka Brasil Wandeley pelo apoio técnico e subsídios para a continuidade do estudo; a Gerência de Controle de Qualidade por todos os subsídios e elucidação de dúvidas, especialmente à Dra. Valderice Alves Baydun, Engenheira Edyjane Ramos e Msc. Silvio Pereira Filho.

Ao orientador Prof. Vicente de Paulo Silva pelo estímulo, paciência e persistência e ao coorientador Prof. Valmir Cristiano Marques de Arruda pelos ensinamentos.

SILVA, Luane Lins. Avaliação de qualidade de efluentes em Estações de Tratamento de Esgotos na bacia do Rio Ipojuca. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023. 79 p.

RESUMO

O crescimento acelerado da população mundial, junto ao crescente volume de esgotos sanitários produzidos, e ao mesmo tempo sendo despejados nos recursos hídricos e no solo, com pouco ou nenhum tipo de tratamento, vem contribuindo para a degradação do meio ambiente e causando graves problemas ambientais e sociais. Nesse sentido, a busca crescente por soluções de saneamento ambiental e tecnologias de tratamento de esgotos é parte fundamental do processo de recuperação e manutenção da qualidade de vida da população e do meio ambiente. Em Pernambuco, o Programa de Saneamento Ambiental do Rio Ipojuca, foi concebido com o intuito de promover o saneamento ambiental da bacia a partir da implantação de sistemas de esgotamento sanitário, ampliação da cobertura dos sistemas existentes e melhoria nos índices de tratamento de esgoto, objetivando melhorar a qualidade ambiental e aumento da disponibilidade da água de boa qualidade. Este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros físico-químico e microbiológico das Estações de Tratamento de Esgoto (Tacaimbó, Rendeiras e Gravatá) sob a análise da estatística multivariada com aplicação de ferramenta computacional. Os parâmetros analisados foram fornecidos pela COMPESA, todas as amostras foram coletadas no ano de 2020, em todos os meses do ano. Os resultados das análises foram comparados aos valores recomendados pela legislação ambiental vigente nas esferas federal e estadual. Pela análise da estatística descritiva dos parâmetros de qualidade dos efluentes, conclui-se de forma geral, as ETEs estudadas, atendem aos requisitos definidos pelos órgãos ambientais, notadamente no quesito de remoção de matéria orgânica. Através da estatística multivariada, foi possível concluir que a maior variação dos dados, estão relacionadas aos parâmetros que representam a poluição (matéria orgânica). Esta fato pode tanto representar falhas nos procedimentos de coleta e armazenagem, ou operação ineficiente em determinados períodos do ano.

Palavras-Chave: Estatística descritiva; esgoto; multivariada; tratamento.

SILVA, Luane Lins. **Quality evaluation of effluents in sewage treatment station in the Ipojuca River Basin**. Thesis (Master's Program in Environmental Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco, Recife, 2023. 79 p.

ABSTRACT

The accelerated growth of the world population, joined with the increasing volume of sanitary sewage produced, and at the same time being dumped in water resources and in the soil, with no or less treatment, has been contributing to the degradation of the environment and causing serious environmental and social problems. In this sense, the growing search for environmental sanitation solutions and sewage treatment technologies is a fundamental part of the process of recovering and maintaining the quality of life of the population and the environment. In Pernambuco, the Ipojuca River Environmental Sanitation Program was conceived with the aim of promoting environmental sanitation in the basin based on the implementation of sanitary sewage systems, expansion of the coverage of existing systems and improvement in sewage treatment rates, with the aim of improve environmental quality and increase the availability of good quality water. This work aims to evaluate the physical-chemical and microbiological parameters of Sewage Treatment Stations (Tacaimbó, Rendeiras and Gravatá) under the analysis of multivariate statistics with application of computational tool. The analyzed parameters were provided by COMPESA, all samples were collected in the year 2020, in all months of the year. The results of the analyzes were compared to the values recommended by current environmental legislation at the federal and state levels. By analyzing the descriptive statistics of the effluent quality parameters, it is generally concluded that the Stations studied meet the requirements defined by the environmental agencies, notably in terms of removal of organic matter. Through multivariate statistics, it was possible to conclude that the greatest variation in the data is related to the parameters that represent pollution (organic matter). This fact may either represent flaws in collection and storage procedures, or inefficient operation at certain times of the year.

Keywords: Descriptive Statistic; multivariate; treatment; sewage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa hidrográfico do estado de Pernambuco	15
Figura 2 - Diagrama Unifilar dos pontos de lançamento de efluentes e captação de água no rio Ipojuca	16
Figura 3 - Mapa de localização da bacia do rio Ipojuca.....	17
Figura 4 - Representação esquemática de um reator UASB convencional	21
Figura 5 - Níveis do tratamento de efluentes	25
Figura 6 - Estação de Tratamento de Esgotos de Tacaimbó e suas respectivas etapas de tratamento ...	42
Figura 7 - ETE Rendeiras e suas etapas de tratamento	43
Figura 8 - Estação de Tratamento de Esgotos de Gravatá (ETE – Gravatá)	44
Figura 9 - Valores de pH do efluente nas ETE2 e ETE3	54
Figura 10 - Valores de pH do efluente na ETE1	55
Figura 11 - Valores de Oxigênio Dissolvido nos efluentes das ETE1, ETE2 e ETE3	56
Figura 12 - Valores de Sólidos Totais nos efluentes das ETES	57
Figura 13 - Valores de Sólidos Fixos nos efluentes das ETES	58
Figura 14 - Valor de DBO no efluente da ETE3.....	59
Figura 15 - Valores de DBO nos efluentes das ETE1 e ETE2	59
Figura 16 - Valores de Fósforo Total na ETE2	60
Figura 17 - Valores de Fósforo Total nas ETE1 e ETE3	60
Figura 18 - Valores de Coliformes Totais nas ETE1, ETE2 e ETE3	61
Figura 19 - Gráfico representando a relação entre fatores 1 e 2 e variáveis.....	65
Figura 20 - Representação bidimensional das variáveis na análise.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de domicílios com esgotamento adequado por município na bacia do rio Ipojuca	18
Tabela 2 – Eficiências esperadas por tipo de tratamento na remoção dos poluentes	27
Tabela 3 - Parâmetros para descarga de efluentes líquidos industriais e domésticos.....	28
Tabela 4 - Eficiência de remoção de carga orgânica.....	29
Tabela 5 - Parâmetros para classes de corpos d'água	30
Tabela 6 - Número Máximo Provável de Coliformes Fecais para descarga no corpo receptor	30
Tabela 7 - Matriz de variáveis padronizadas de n indivíduos e p variáveis	40
Tabela 8 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente da ETE Tacaimbó	50
Tabela 9 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente da ETE Rendeiras	51
Tabela 10 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente da ETE Gravatá.....	52
Tabela 11 - Distribuições estatísticas dos parâmetros físico-químicos e biológicos das ETEs e seus respectivos testes paramétricos e “p-valor”.....	53
Tabela 12 - Autovalores e percentual da variância explicada de cada componente.....	63
Tabela 13 - Matriz fatorial da ACP dos dados de qualidade dos efluentes das ETEs.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Matriz de aspectos e impactos ambientais que afetam a qualidade dos recursos hídricos da bacia do Ipojuca	19
Quadro 2 - Operações, processos e sistemas de tratamento frequentemente usados para a remoção de poluentes dos esgotos domésticos	24
Quadro 3 - Eficiência de remoção por nível de tratamento.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
APAC	AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA
BID	BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO
COBH	COMITÊ DE BACIA HIDRIGRÁFICA
COMPESA	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
CONDEPE- FIDEM	AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
CPRH	AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE
DBO	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGÊNIO
DQO	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO
ETE	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
PERH/PE	PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE PERNAMBUCO
PSA IPOJUCA	PROGRAMA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO IPOJUCA
SES	SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO
SMEWW	STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER <i>MÉTODOS PADRÃO PARA ANÁLISE DE ÁGUA E ÁGUAS RESIDUAIS</i>
UASB	UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET <i>REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1	Mapa Hidrográfico do Estado de Pernambuco.....	15
3.2	Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.....	16
3.3	Saneamento Ambiental da bacia do Rio Ipojuca.....	17
3.4	Tipologia de sistemas de tratamento de esgotos e a legislação no Brasil.....	20
3.5	Tecnologias de tratamento e a qualidade necessária para disposição final adequada em corpos hídricos a fim de garantir a qualidade do meio ambiente	25
3.6	Parâmetros físico-químico de esgoto tratado em locais de disposição final de estações de tratamento de esgoto.....	29
3.7	Análise Estatística dos Dados Experimentais	30
3.7.1	Estatística Descritiva	30
3.7.2	Estatística Multivariada.....	31
3.7.3	Técnicas hierárquicas	34
3.7.4	Análise Fatorial e Análise de Componentes Principais.....	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Área de Estudo	42
4.2	Análise dos parâmetros físico-químicos e biológico das amostras	44
4.3	Análise da Estatística Descritiva	45
4.4	Análise Multivariada	46
4.4.1	Análise Fatorial e Análise por Componentes Principais.....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Análise estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente das ETEs	49
5.1.1	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	54
5.1.2	Oxigênio dissolvido (OD).....	55
5.1.3	Sólidos totais, fixos e voláteis	56
5.1.4	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	58
5.1.5	Fósforo Total	59
5.1.6	Coliformes Totais	61
5.2	Análise estatística multivariada dos parâmetros de qualidade do efluente das ETEs.....	62
6	CONCLUSÕES.....	67
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial, juntamente com o crescente volume de esgotos sanitários produzidos, e ao mesmo tempo sendo despejados nos recursos hídricos e no solo, com pouco ou nenhum tipo de tratamento, vem contribuindo para a degradação do meio ambiente, através da poluição dos recursos naturais, desestabilização dos ecossistemas e causando graves problemas ambientais e sociais. Nesse sentido, a busca crescente por soluções de saneamento ambiental e tecnologias de tratamento de esgotos é parte fundamental do processo de recuperação e manutenção da qualidade de vida da população e do meio ambiente (SCOTTÁ, 2015).

Metcalf & Eddy, (2016); Von Sperling, (2005); Jordão & Pessôa, (2011), explicam que os esgotos domésticos são constituídos por uma fração aproximada de 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos e, aproximadamente, 99,9% de água, e que apesar da pequena fração de sólidos, existe a necessidade de se tratar os esgotos, pois suas características (físicas, químicas e biológicas) dependem dos usos à qual a água foi submetida. Ainda segundo os autores, o clima, situação social e econômica e os hábitos da população ao longo do tempo, alteram sua composição tornando complexa sua caracterização.

Mota (2006) ressalta que os esgotos industriais podem carrear aos esgotos domésticos, matéria orgânica e substâncias químicas tóxicas ao homem e outros animais. A porção inorgânica dos efluentes corresponde a 30% do total dos sólidos presentes. Seus principais componentes são minerais, sais e metais. Contudo a maior parcela é de sólidos orgânicos.

O início do desenvolvimento de tecnologias para tratar o esgoto sanitário data do final do século XIX, com foco na remoção dos sólidos sedimentáveis que eram amplamente originados nestes sistemas, entretanto, não se percebia que este parâmetro representava apenas 1/3 da carga orgânica e que os outros 2/3 estavam representados na forma solúvel e de colóides. Os tratamentos aplicados não possibilitavam o contato entre as frações não sedimentadas e as bactérias que estavam ativas no reator, resultando em uma eficiência da remoção da matéria orgânica na ordem de 30 a 40% (FARIAS, 2013).

Com os avanços dos estudos de reatores, os pesquisadores perceberam que havia a necessidade de um maior contato do efluente com as bactérias que degradavam matéria orgânica e que o processo se tornaria mais eficiente se houvesse a imobilização desta biomassa, através da inserção de lodo ativo no reator fazendo crescer a massa bacteriana e promovendo assim, uma digestão anaeróbia da matéria orgânica. Tal concepção fez surgir a base do

tratamento anaeróbio com reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) de alta capacidade e eficiência na remoção de matéria orgânica, devido ao contato da matéria orgânica e a massa bacteriana (HAANDEL *et al.*, 2003).

Segundo Pimenta *et al.* (2002) o tratamento de esgoto consiste na estabilização da matéria orgânica de um certo efluente, de modo a transformar a matéria orgânica em inorgânica (mineralização e conseqüente redução de DBO) e a remoção de microrganismos patogênicos

O Programa de Saneamento Ambiental do Rio Ipojuca – PSA Ipojuca, criado em 2013, foi concebido com o intuito de promover o saneamento ambiental na bacia do Rio Ipojuca a partir da implantação de sistemas de esgotamento sanitário, ampliação da cobertura dos sistemas existentes e melhoria nos índices de tratamento nos municípios que tem a sua sede cortada por este Rio, objetivando melhorar a qualidade ambiental e aumento da disponibilidade da água de boa qualidade, além de ações complementares, que incluem diagnóstico socioambiental, instalação de parques ambientais e reposição florestal das matas ciliares. O PSA Ipojuca deveria reduzir a carga orgânica diária lançada no rio Ipojuca, quanto a DBO₅, em cerca de 18,65 toneladas, representando cerca de 45,4% da carga doméstica garantindo uma melhor qualidade da água no rio e nos reservatórios utilizados prioritariamente para abastecimento público (BID, 2012).

Neste contexto, algumas das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) já se encontram em operação. A ETE Gravatá, instalada em município de mesmo nome, encontra-se em funcionamento e possui capacidade de tratamento para uma vazão de 140 l/s beneficiando aproximadamente, 48.000 habitantes. O Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) do município conta com 35 km de redes implantadas. A ETE Tacaimbó, localizada no município de Tacaimbó cujo sistema foi projetado com capacidade de tratamento para uma vazão de 33,0 l/s, conta com uma rede de 7,53 km de extensão e atende uma população de 12.307 habitantes. Por fim, a ETE Rendeiras, localizada no município de Caruaru, possui capacidade para tratar uma vazão de 450 l/s com previsão de atender uma população de 148.000 habitantes.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros físico-químico e microbiológico das Estações de Tratamento de Esgoto de Tacaimbó, Rendeiras e Gravatá sob a análise da estatística multivariada com aplicação de ferramenta computacional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os parâmetros físico-químico e biológico das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de Tacaimbó, Caruaru e Gravatá sob a análise da estatística descritiva e multivariada com aplicação de ferramenta computacional.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os efluentes das ETEs quanto as tecnologias utilizadas no tratamento dos esgotos e aos padrões de lançamento em vigor;
- Avaliar a qualidade do efluente nos pontos de lançamento das ETEs no rio Ipojuca de acordo com a Resolução CONAMA nº 430/2011, e as normas técnicas 2002/2000 e 2007/2001 da CPRH para a referida classe do corpo hídrico;
- Avaliar a relação entre os parâmetros de qualidade dos efluentes por meio da análise estatística descritiva e de componentes principais (ACP).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Mapa Hidrográfico do Estado de Pernambuco

O Estado de Pernambuco é dividido em 13 grandes bacias hidrográficas, 15 bacias de pequenos rios (litorâneos e interiores) e uma bacia de pequenos rios que constituem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha, constituindo 29 unidades de planejamento (Figura 1). No quesito vertente das bacias hidrográficas, Pernambuco conta com duas: o rio São Francisco e o Oceano Atlântico. Assim consideram-se rios interiores aqueles que vertem para a bacia do São Francisco, enquanto aqueles rios que escoam no sentido do Oceano Atlântico são denominados rios litorâneos (APAC, 2023).

Os rios interiores são geralmente intermitentes, permanecendo secos durante os períodos de estiagem, e os rios litorâneos são intermitentes nos trechos situados na Mesorregião do Agreste Pernambucano, tornando-se permanentes na medida em que penetram na Mesorregião da Mata Pernambucana (PERNAMBUCO, 2022).

Figura 1 - Mapa hidrográfico do estado de Pernambuco



Fonte: CONDEPE/FIDEM (2005)

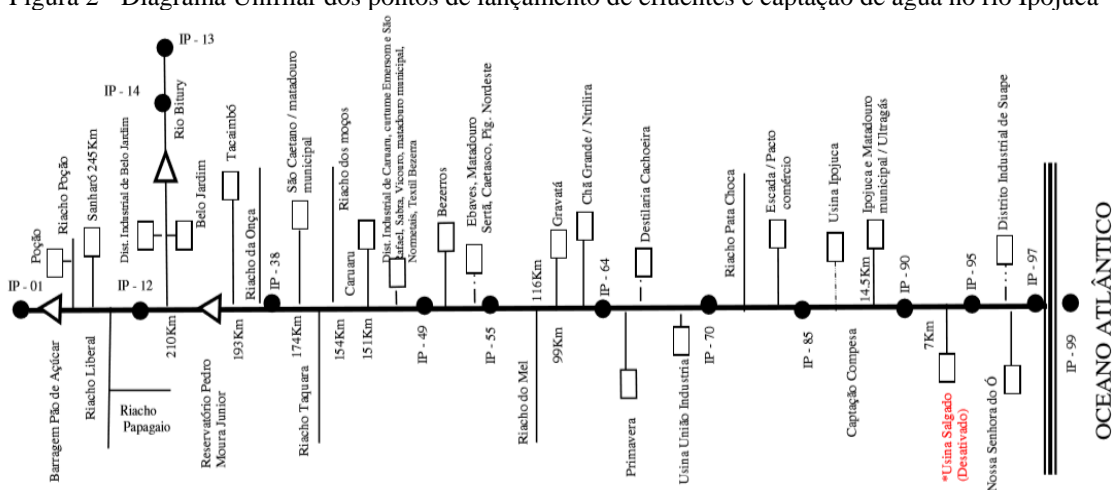
Segundo a PROJETEC (2010), os principais agentes poluidores dos mananciais existentes no sistema hidrográfico em Pernambuco são: esgotos sanitários domésticos, efluentes industriais, efluentes oriundos dos matadouros públicos e efluentes diversos oriundos da agricultura. Os municípios que não coletam e nem tratam seus efluentes corroboram com preocupante situação de poluição dos corpos hídricos. Este fator é especialmente notado nas

áreas de maior adensamento populacional, como nas sedes municipais.

A Agência Estadual de Meio Ambiente – CPRH (2017) indica que as águas do rio Ipojuca além de utilizadas para abastecimento público, são receptoras de efluentes domésticos, industrial e agroindustrial, tais como indústrias de produtos alimentícios, minerais não-metálicos, sucroalcooleira, química, têxtil, metalúrgica, couros, bebidas, farmacêutico, perfumes/sabões/velas, material elétrico/comunicação, calçados, matéria plástica, agropecuária, borracha, produtos veterinários, vestuário e tecidos.

A Figura 2 apresenta em diagrama unifilar com a localização dos municípios, indústrias e estações de monitoramento da qualidade da água no rio Ipojuca.

Figura 2 - Diagrama Unifilar dos pontos de lançamento de efluentes e captação de água no rio Ipojuca



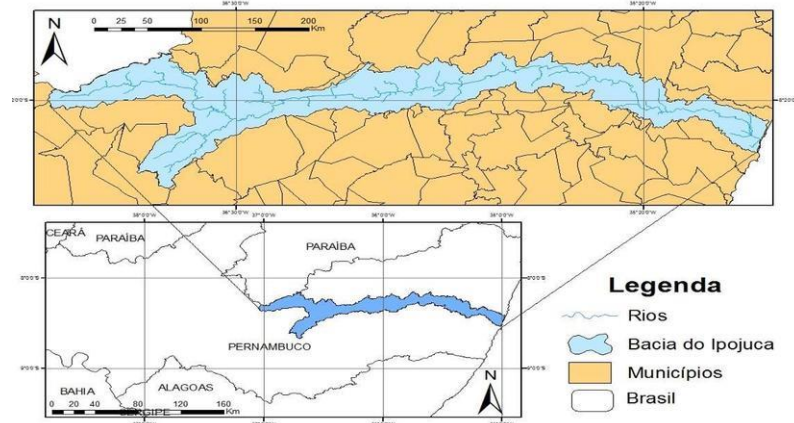
Fonte: CPRH (2017)

3.2 Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca possui uma área de 3.435,34 km², que representa 3,49% do território de Pernambuco, e está localizada na região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental. Ao longo da sua extensão, a Bacia abrange territórios parciais de 25 municípios, dentre os quais 12 possuem suas sedes inseridas na bacia, sendo esses: Belo Jardim, Bezerros, Caruaru, Chã Grande, Escada, Gravatá, Ipojuca, Poço, Primavera, Sanharó, São Caetano e Tacaimbó (APAC, 2023).

A Figura 3 apresenta a localização e segmento de fluxo do principal curso hídrico do rio Ipojuca.

Figura 3 - Mapa de localização da bacia do rio Ipojuca



Fonte: Deus *et al.* (2016)

O rio Ipojuca apresenta extensão de cerca de 324 km, tendo suas nascentes na Serra do Pau D'arco, município de Arcoverde. Tem seu curso orientado na direção oeste-leste, sendo seu regime fluvial intermitente, tornando-se perene a partir do seu médio curso, nas proximidades da cidade de Caruaru (CONDEPE/FIDEM, 2005; APAC, 2023).

As principais fontes potenciais de poluição na bacia do rio Ipojuca são os efluentes industriais, os esgotos domésticos não tratados e os resíduos sólidos lançados a céu aberto, além do uso indiscriminado de agrotóxicos (PROJETEC, 2010).

A bacia hidrográfica do Ipojuca abrange uma população superior a 1,3 milhões de habitantes, com destaque para 836.421 residentes em municípios com sede na Bacia (62% do total). O município de Caruaru, a capital do agreste central, concentra 41% da população dos 12 municípios com a sede na bacia do Ipojuca. A região agreste, onde está inserida 70% da bacia, apresenta um período chuvoso de fevereiro a julho, com as máximas precipitações durante abril e maio (PROJETEC, 2010).

Em dezembro de 2019, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (COBH-Ipojuca), através da Resolução nº 01/2019 aprovou o enquadramento dos corpos d'água da bacia hidrográfica do rio Ipojuca. Segundo essa Resolução, o trecho do rio Ipojuca analisado nesse trabalho é enquadrado como classe 3.

3.3 Saneamento Ambiental da bacia do Rio Ipojuca

Segundo dados da ANA (2017), o cenário dos serviços de esgotamento sanitário, mostra que nos municípios inseridos na área da bacia hidrográfica do rio Ipojuca a média de domicílios sem esgotamento sanitário adequado é de 56%. Somente 10 (dez) municípios possuem estações de tratamento de esgotos, que não necessariamente, atendem toda a população do município.

A tabela 1 apresenta os índices por municípios de coleta e tratamento de esgotos sanitários e os índices de esgotos sem tratamento.

Tabela 1 - Percentual de domicílios com esgotamento adequado (solução coletiva) por município na bacia do rio Ipojuca

Município	Sem atendimento	Com Atendimento
Alagoinha	22,2%	0,0%
Altinho	12,5%	0,0%
Amaraji	33,7%	0,0%
Arcoverde	94,0%	3,0%
Belo Jardim	17,5%	0,0%
Bezerros	17,0%	0,0%
Cachoeirinha	12,9%	0,0%
Caruaru	49,3%	45,8%
Chã Grande	34,2%	65,0%
Escada	58,9%	0,0%
Gravatá	93,4%	1,6%
Ipojuca	72,4%	11,1%
Pesqueira	23,9%	11,0%
Poção	36,9%	0,0%
Pombos	22,5%	0,0%
Primavera	34,4%	0,0%
Riacho das Almas	15,1%	0,0%
Sairé	63,4%	0,0%
Sanharó	23,7%	0,0%
São Bento do Una	19,7%	10,0%
São Caitano	35,0%	0,0%
Tacaimbó	22,0%	0,0%
Venturosa	20,8%	0,0%
Vitória de Santo Antão	56,1%	38,9%

Fonte: ANA (2017)

No quadro 1 são mostrados alguns dos principais aspectos e possíveis impactos ambientais que afetam os recursos hídricos na bacia do Ipojuca, de acordo levantamento apontado pela Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa – CONDEPE/FIDEM (2005).

Quadro 1 - Matriz de aspectos e impactos ambientais que afetam a qualidade dos recursos hídricos da bacia do Ipojuca

Aspectos	Impacto
Queima do bagaço de cana nas caldeiras das usinas de açúcar	Poluição atmosférica; emissão de fuligem
Geração de efluente dos matadouros públicos e clandestinos localizados às margens do rio em diversos municípios Criação de suínos, bovinos e aves nas áreas ribeirinhas Descarga de efluentes domésticos Lançamento de esgoto público nos mananciais Lançamento de vinhaça e de água de lavagem da cana, provenientes de depósitos localizados próximos aos cursos d'água	Poluição dos corpos hídricos por matéria orgânica
Uso de explosivos e rede de malha fina para pesca artesanal de peixes e camarão Construção de edificações (residências, entre outras), próximas aos cursos d'água e nas áreas de proteção dos barramentos (nas margens a montante) Retirada de areia do leito de vários rios da bacia Retirada de pedras dos leitos dos rios para serem aproveitadas na construção civil	Devastação de habitats aquáticos Assoreamento, erosão e desmatamento de APP
Lançamento de lixo doméstico pela população, diretamente na calha dos rios e riachos Lavagem de pulverizadores, polvilhadeiras e embalagens de defensivos agrícolas nas águas dos rios Uso de agrotóxicos nos plantios de cana-de-açúcar localizados às margens dos rios Descarga de efluentes da lavagem de veículos (lava-jato) Descarte de embalagens de agrotóxicos no leito dos rios e riachos	Descarte de resíduos sólidos; Poluição dos corpos hídricos
Queda de encostas proveniente do desmatamento das matas ciliares	Assoreamento, erosão, sedimentação
Captação indiscriminada de água dos cursos d'água da bacia hidrográfica Represamento inadequado (pequenos e médios açudes, entre outros)	Diminuição da disponibilidade hídrica

Fonte: Adaptado de CONDEPE/FIDEM (2005)

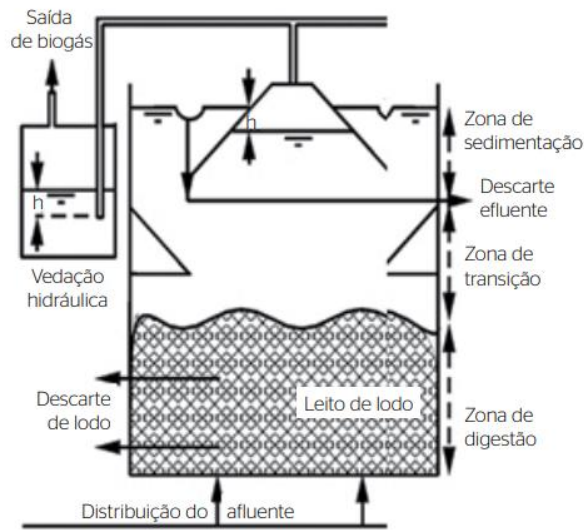
3.4 Tipologia de sistemas de tratamento de esgotos e a legislação no Brasil

O UASB, em tradução literal é um reator anaeróbio de fluxo ascendente, apresenta alta eficiência, e possui como princípio de tratamento a digestão anaeróbia da parte sólida do esgoto. Normalmente, o UASB é utilizado em processos de tratamento secundários para a estabilização da matéria orgânica inicial e pode chegar a uma eficiência de remoção de até 70% da carga orgânica do efluente. É uma tecnologia adotada pela alta eficiência e por não exigir grandes áreas para instalação do equipamento (AFONSO *et al.*, 2016; RIETOW *et al.*, 2023).

O processo de tratamento primário objetiva a redução de sólidos em suspensão por meio de dispositivos com tempo de detenção hidráulica maior que o dos tratamentos preliminares ou por meio de equipamentos que utilizam precipitantes químicos. Nessa etapa pode, também, ocorrer à degradação anaeróbia do material orgânico em suspensão, facilitando o tratamento secundário (CHERNICHARO *et al.*, 2006). A eficiência de remoção de sólidos deste nível de tratamento é de 60 a 70%, e a de DBO de 25 a 35%.

O processo de tratamento do reator UASB consiste em o efluente passar em fluxo ascendente através de um leito de lodo denso contendo microrganismos facultativos e anaeróbios estritos. No fluxo, o efluente entra pelo fundo e sai do reator pela parte superior, através de um decantador interno formado por sólidos muito densos com elevada capacidade de sedimentação (leito de lodo) variando até sólidos leves e dispersos chamado de manta de lodo. É neste perfil de sólidos (do leito a manta de lodo) que ocorre a estabilização da matéria orgânica (DOS SANTOS *et al.*, 2019). Ressalta-se que o reator UASB e qualquer outro tratamento biológico anaeróbio deve ser precedido de remoção de sólidos grosseiros e areia (ABNT, 2011). A figura 4 mostra uma representação esquemática de um reator UASB convencional.

Figura 4 - Representação esquemática de um reator UASB convencional



Fonte: Santos *et al.* (2018)

Este tipo de solução de tratamento apresenta vantagens quando comparados a sistemas aeróbios, como menores custos de implantação, operação e manutenção. Este fato contribui para a disseminação e expansão da tecnologia, e são extremamente importantes para países em desenvolvimento como o Brasil, onde os déficits de saneamento são mais elevados. (SILVA *et al.*, 2022).

Dos Santos *et al.* (2019) acrescentam outras vantagens do UASB em relação a outros tipos de tratamento como: a baixa produção de lodo, o baixo consumo energético, o elevado grau de compactidade e a simplicidade operacional. A estes, podemos adicionar a possibilidade de aproveitamento energético do gás metano produzido no sistema.

Embora estes sistemas sejam bastante eficientes na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos totais, não apresentam boa eficiência quando se trata da remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), patógenos e matéria orgânica residual. Em geral, o efluente gerado no UASB não atende em termos de qualidade, as normas ambientais. Sendo assim necessário a aplicação de um pós-tratamento compatível com o uso pretendido (XAVIER *et al.*, 2020; PAIVA *et al.*, 2020).

Dos Santos *et al.* (2019) colocam que vários tipos de pós-tratamento de efluentes de reatores UASB vêm sendo utilizados no Brasil como lagoas de polimento (especialmente para ETEs afastadas dos centros urbanos ou locais de elevada disponibilidade de área), filtros biológicos percoladores, filtros aerados, lodos ativados, entre outros.

Normalmente quando se fala de eficiência para atendimento à legislação vigente e reúso, o efluente do tratamento no UASB exige um pós-tratamento. Silva *et al.* (2022) consideram que o processo do tratamento de esgotos deve ser confiável, e não somente eficiente. Ou seja, o processo não deve somente apresentar valores de remoção compatíveis com aqueles imaginados na concepção da ETE, mas cumprir os padrões de lançamento de efluentes pela maior parte do tempo de operação. Assim um sistema totalmente confiável é aquele em que não há falhas no desempenho, nem extrapolação dos limites previstos na legislação ou na meta definida pela operadora do sistema.

O processo de tratamento através de lodo ativado, é um sistema aeróbio, onde o crescimento dos microrganismos ocorre em suspensão na massa líquida e há alta retenção de biomassa. Estes sistemas são caracterizados por apresentar maior eficiência de remoção de matéria orgânica, cerca de 80 a 90% em termos de DQO (DOS SANTOS *et al.*, 2019).

Os sistemas de lodos ativados são amplamente utilizados para o tratamento de efluentes domésticos e industriais, onde se faz necessário uma elevada qualidade do efluente em áreas reduzidas. Apesar da economia de área, o consumo de energia elétrica é maior quando comparado a outras tecnologias, pois o índice de mecanização deste sistema também é superior (VON SPERLING, 2016).

Este sistema é um processo biológico de tratamento de efluentes que consiste, basicamente, na formação de uma massa biológica, o lodo, através de um tanque de aeração, que fornece oxigênio para os microrganismos presentes, e proporciona a completa mistura do lodo com o efluente. A matéria orgânica presente no efluente é convertida então em massa biológica, dióxido de carbono (CO₂) e água. Ao final do tratamento, a biomassa é separada do efluente tratado através do processo de decantação (VON SPERLING, 2007).

Von Sperling (2016) explica que o sistema de lodos ativados pode ser usado para remover nitrogênio e fósforo, além da matéria orgânica. Entretanto a eficiência de remoção de coliformes é muito baixa, e é usualmente insuficiente para atender aos requisitos de qualidade dos corpos receptores.

Para atingir os padrões desejáveis do efluente, o processo de lodo ativado pode ser associado a outras tecnologias, as mais importantes envolvem o emprego de reatores UASB a montante e o uso de material de enchimento no tanque de aeração, formando um reator híbrido. O sistema constituído de reator UASB seguido de lodo ativado é um dos mais atrativos atualmente, quando os objetivos são remoção de matéria orgânica e nitrificação do esgoto (DOS SANTOS *et al.*, 2019).

Neste esquema, Paiva *et al.* (2020) avaliaram a aplicabilidade de lodo ativado operado em regime de reator de bateladas sequenciais (RBS) para o pós-tratamento do efluente de reatores UASB, quando se deseja usar o efluente final para irrigação. Nesse caso, o principal objetivo do pós-tratamento aeróbio é a remoção de material orgânico, sólidos em suspensão e ovos de helmintos do efluente do UASB.

Os processos de tratamento de esgoto convencionais na maioria das vezes não são capazes de garantir padrões adequados do efluente para descarte final, principalmente quando se trata da remoção de microrganismos patogênicos potencialmente nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. A fim de sanar esse problema, foram desenvolvidos processos de desinfecção, através da utilização de agentes físicos e químicos obter qualidade microbiológica adequada para retorno do esgoto ao meio ambiente (RIBEIRO JUNIOR, 2018).

São diversos os métodos existentes e aplicáveis de desinfecção de efluentes sanitários, que tem como objetivo a eliminação dos microrganismos patogênicos presentes. Métodos como: cloração, radiação UV (natural ou artificial), ozonização, entre outras, podem ser aplicadas em consonância com o tratamento primário e secundário, a fim de garantir os padrões ambientais adequados. Outro fator que deve ser considerado da definição do método de desinfecção é o custo associado à tecnologia, a facilidade de manuseio e a necessidade de mão de obra qualificada para operação.

Ribeiro Junior (2018) conclui que o dióxido de cloro, desinfecção por cloração, é eficiente seja no formato de pastilhas comerciais ou soluções líquidas. O autor ainda revela que o uso de ondas de ultrassom como pré-tratamento à desinfecção com cloro, é bastante promissora pois melhora consideravelmente a eficiência na remoção de coliformes totais e *E. coli*.

Benedet *et al.* (2019) concluíram que o ferrato de sódio é uma alternativa atrativa para a etapa de desinfecção do efluente, apresentando significativos resultados na remoção da *E. coli*. Destaca-se que quanto maior a dosagem de ferrato de sódio, maior é a eficiência da remoção.

Voltolini *et al.* (2021) estudaram a desinfecção por radiação ultravioleta a partir de lâmpada com dosagem de 0,43 mWs/cm². A esterilização por radiação resultou em uma eficiência de remoção de coliformes totais de 85,83%, para coliformes termotolerantes de 74,43% e 83,1% na redução de *E. coli* da carga microbiana. Concluindo que apesar dos bons resultados do método, a carga patogênica final não apresentou os padrões adequados ao reúso agrícola.

Fernandes *et al.* (2019) explicam que a desinfecção solar se destaca como um processo que promove remoção de patógenos, garantindo um tratamento adequado às águas residuárias tanto em países em desenvolvimento, quanto em áreas rurais. A desinfecção solar se apresenta como uma opção de tratamento de baixo custo, que não necessita de recursos tecnológicos e operacionais significativos, já que utiliza o sol como fonte de radiação ultravioleta e calor.

Outra forma de desinfecção passível de utilização é a ozonização. Moreira *et al.* (2019) a partir da injeção difusa de ozônio através em um reator, apontam como vantagens do processo a alta eficiência na inativação de microrganismos patogênicos, na remoção de micropoluentes orgânicos, além de oxidar ferro e manganês e controlar a cor, o sabor e o odor. Os autores alertam que deve ser estudada a proporção adequada das concentrações de ozônio e de peróxido para a obtenção da eficiência máxima de desinfecção.

A legislação brasileira define os padrões para remoção dos poluentes do esgoto doméstico após todas as fases de tratamento. Ou seja, para o lançamento em corpos hídricos é determinado o padrão requerido. O sistema de tratamentos, em todas as suas etapas, deve ser projetado a fim de atender aos parâmetros determinados para o corpo hídrico.

Von Sperling (2005) lista os principais processos, operações e sistemas de tratamento de esgotos domésticos, em função do poluente a ser removido. A lista é resumida no Quadro 2.

Quadro 2 - Operações, processos e sistemas de tratamento frequentemente usados para a remoção de poluentes dos esgotos domésticos

POLUENTE	OPERAÇÃO, PROCESSO OU SISTEMA
Sólidos em suspensão	- Gradeamento - Remoção de areia - Sedimentação - Disposição no solo
Matéria orgânica biodegradável	- Lagoas de estabilização e variações - Lodos ativados e variações - Filtro biológico e variações - Tratamento anaeróbio - Disposição no solo
Patogênicos	- Lagoas de maturação - Disposição no solo - Desinfecção com produtos químicos - Desinfecção com radiação ultravioleta
Nitrogênio	- Nitrificação e desnitrificação biológica - Disposição no solo - Processos físico-químicos
Fósforo	- Remoção biológica - Processos físico-químicos

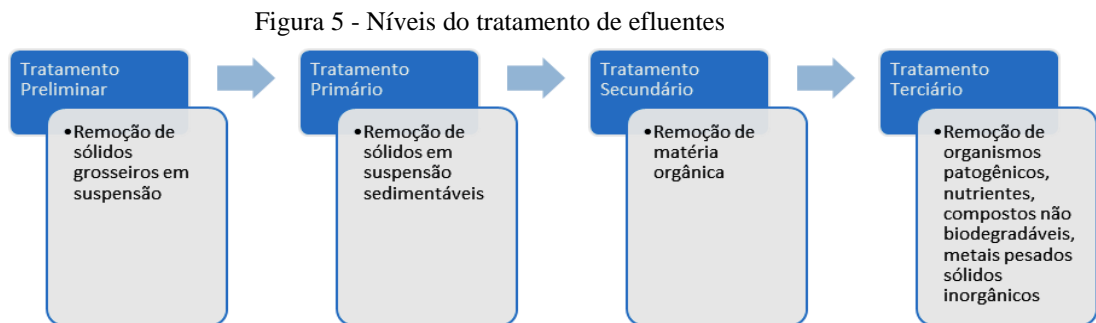
Fonte: Von Sperling (2005)

No Estado do Ceará, a ETE Aracapé III que efetua seu tratamento através de sistema de reator UASB, opera as seguintes unidades de tratamento: elevatória contendo poço de sucção e

duas bombas submersíveis, tratamento preliminar (grade e caixa de areia), além de tratamento biológico a partir de dois reatores anaeróbios de fluxo ascendente ou reatores UASB em paralelo e desinfecção por cloração. A unidade opera com vazão média de 7,5 L/s, apesar da vazão de projeto ser de 10 L/s. (BEZERRA, 2014; LOBÃO *et al*, 2013). Esta ETE teve sua eficiência avaliada por Lobão *et al* (2013) que observou que tem confiabilidade de 36,2% na remoção de DQO, 83,8% na remoção de DBO e 97,5% na remoção de sólidos totais.

3.5 Tecnologias de tratamento e a qualidade necessária para disposição final adequada em corpos hídricos a fim de garantir a qualidade do meio ambiente

Os processos para o tratamento de efluentes podem ser individuais ou combinados, e a decisão do processo a ser escolhido deve considerar, principalmente, a qualidade do corpo d'água receptor (estudo de autodepuração e os limites definidos pela legislação ambiental) e das características do esgoto bruto gerado (CHIAVELLI *et al*, 2019). O processo de tratamento de efluentes, independente da tecnologia adotada, deve seguir um fluxo para remoção dos poluentes conforme apresentado na Figura 5.



Fonte: adaptado de Von Sperling (2005)

Cada nível de tratamento, realiza a remoção dos poluentes destacados na Figura 5, em diferentes eficiências. A eficiência de remoção por nível de tratamento é resumida no Quadro 3.

Quadro 3 - Eficiência de remoção por nível de tratamento

Item	Nível de tratamento		
	Preliminar	Primário	Secundário
Poluentes removidos	Sólidos grosseiros	Sólidos sedimentáveis DBO em suspensão	Sólidos não sedimentáveis DBO em suspensão fina DBO solúvel Nutrientes (parcialmente) Patogênicos (parcialmente)
Eficiência de remoção	-	SS: 60-70% DBO: 30-40% Coliformes: 30-40%	DBO: 60-99% Coliformes: 60-99% Nutrientes: 10-50%
Mecanismo de tratamento predominante	Físico	Físico-químico	Biológico
Cumprir padrão de lançamento?	Não	Não	Usualmente sim
Aplicação	Montante da elevatória Etapa inicial de tratamento	Tratamento parcial Etapa intermediária de tratamento mais completo	Tratamento mais completo para matéria orgânica e sólidos em suspensão

Fonte: Von Sperling (2005)

Normalmente o tratamento de efluentes em nível secundário já se faz suficiente para destinação final. Em casos de corpos receptores de classes mais especiais ou efluentes com altas cargas de poluentes, exigem refinamento no tratamento, assim se fazendo necessário a adição de tratamento em nível terciário. Corroborando com a afirmativa, Cornelli *et al.* (2014) destacam que dentre 274 estudos acerca do tema tratamento de esgotos domésticos, o nível de tratamento secundário é o mais utilizado no Brasil.

Em nível secundário, os métodos mais aplicados de tratamento foram os anaeróbios/UASB, *wetlands* e lodos ativados. Entretanto, os autores concluíram que os melhores métodos de tratamento de esgoto doméstico, ou seja, os que possuem mais vantagens nos critérios apontados, são as lagoas de estabilização, e os biorreatores de membrana (CORNELLI *et al.*, 2014).

Oliveira e Von Sperling (2005) estudaram 166 estações de tratamento de esgotos em operação no Brasil, com diferentes tecnologias aplicadas. As ETEs operando com fossa séptica seguida de filtro anaeróbio apresentaram um desempenho abaixo do esperado em relação aos constituintes; para estações com lagoas facultativas, a eficiência de remoção de DQO, sólidos suspensos totais e nitrogênio foi abaixo do previsto, entretanto com boas eficiências de remoção de fósforo e coliformes fecais foram observadas. Quanto à modalidade

de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, o sistema demonstrou um bom desempenho em termos de remoção de DBO, DQO, fósforo e coliformes fecais, apresentando um percentual significativo de ETEs com eficiências dentro e até acima do desejado. Considerando a remoção de matéria orgânica, o processo de tratamento de lodos ativados foi o mais eficiente dentre os outros sistemas. Os reatores UASB exibiram uma boa eficiência de remoção de DBO, DQO e coliformes fecais e um baixo desempenho em relação à sólidos suspensos e nutrientes, ao observar-se as faixas de referência apontadas na literatura.

Para as principais tecnologias de tratamento de esgotos empregados no Brasil, Von Sperling (2005) apresenta as eficiências de remoção dos poluentes esperadas. Os dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Eficiências esperadas por tipo de tratamento na remoção dos poluentes

Sistema de tratamento	Eficiência na remoção (%)				Tempo de detenção hidráulica (dias)
	DBO	N	P	Coliformes	
Lagoa Facultativa	70-85	30-50	20-60	60-99	15-30
Lagoa anaeróbica – Lagoa facultativa	70-90	30-50	20-60	60-99,9	12-24
Lagoa aerada facultativa	70-90	30-50	20-60	60-96	5-10
Reator anaeróbio de manta de lodo	60-80	10-25	10-20	60-90	0,3-0,5
Lodos ativados convencional	85-93	30-40	30-45	60-90	0,07-0,1

Fonte: adaptado de VON SPERLING (2005); DBO₅^{20°} – Demanda Bioquímica de Oxigênio; N – Nitrogênio; P - Fósforo

Segundo a Agência Estadual do Meio Ambiente (CPRH) no estado de Pernambuco, para descarga de efluentes líquidos industriais e domésticos são adotados os parâmetros apresentados na Tabela 3. Observa-se que sistemas como lagoas de estabilização e lodos ativados são os mais recomendados para atendimento aos níveis exigidos.

Tabela 3 - Parâmetros para descarga de efluentes líquidos industriais e domésticos

Carga Orgânica bruta (kg.DBO/d)	Equivalente Populacional	Eficiência mínima de remoção do sistema (%)	Sistema de tratamento proposto	Carga orgânica residual máxima permitida (kg DBO/d)	Concentração máxima permitida (mg/L)	
					DBO	DQO
$C \leq 2$	37	40	Fossa	1,2	180	360
$2 \leq C \leq 4$	74	70	Fossa/filtro/RAFA	1,2-2,4	80	160
$4 \leq C \leq 6$	111	70	LE/LA	2,4-3,6	80	160
$6 \leq C \leq 8$	148	80	LE/LA	3,6-4,8	60	120
$8 \leq C \leq 10$	185	80	LE/LA	4,8-6,0	60	120
$10 \leq C \leq 50$	926	90	LE/LA	6,0-15,0	30	60
$50 \leq C \leq 100$	1852	90	LE/LA	15,0-20,0	30	60
$C > 100$	1852	90	LE/LA	>10	30	60

Fonte: CPRH (2000); LE – lagoas de estabilização; LA – lodos ativados; RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

3.6 Parâmetros físico-químico de esgoto tratado em locais de disposição final de estações de tratamento de esgoto

O lançamento de efluentes é normatizado no Brasil pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430 de 2011. Esta resolução dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, e para lançamentos indiretos quando da ausência de normatização específica.

Em seu artigo 21, a CONAMA 430 define os parâmetros para lançamento direto de efluentes de sistemas de tratamento de esgoto em corpos hídricos. De forma geral, o pH deve ser mantido entre 5 e 9, enquanto a temperatura deve ser inferior a 40°. A quantidade de sólidos sedimentáveis permitida é de no máximo 1 mL/l de efluente, a Demanda Bioquímica de Oxigênio ($DBO_5^{20^\circ}$), calculada pela quantidade de oxigênio consumido durante 5 dias em uma temperatura de 20°C, não deve ultrapassar 120 mg por litro. A quantidade de óleos e graxas deve ser de no máximo 100 mg/L, e materiais flutuantes devem estar ausentes nas amostras.

No estado de Pernambuco, a CPRH complementa a legislação nacional estabelecendo critérios e padrões de lançamento de esgoto tratado com o objetivo de reduzir a carga orgânica não – industrial lançada nos corpos hídricos, através da norma técnica 2002. Quando do lançamento de efluentes a eficiência de remoção da carga orgânica deve seguir o apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Eficiência de remoção de carga orgânica

Carga Orgânica Bruta (C) Kg DBO/dia	Eficiência Mínima de Remoção (%)
$C \leq 2$	40
$2 < C \leq 6$	70
$6 < C \leq 50$	80
$C > 50$	90

Fonte: CPRH (2000)

Outro parâmetro de qualidade estabelecido pela CPRH é a contagem de coliformes fecais, pois os coliformes são considerados como o principal indicador de contaminação bacteriológica de origem fecal e define a adequabilidade do uso da água. A norma técnica CPRH 2007 estabelece o número máximo de coliformes fecais permitido por classe de corpo d'água e os parâmetros básicos que definem cada uma dessas classes. O resumo dos parâmetros de qualidade definidos por classe de águas doce é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para classes de corpos de águas doce

Classe (corpo d'água)	1	2	3	4
DBO ₅ ²⁰ (mg/l O ₂)	≤3	≤5	≤10	-
OD (mg/l O ₂)	≥6	≥5	≥4	≥2
Turbidez (UNT)	≤40	≤100	≤100	-
pH	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0
Coliformes fecais (NMP/100 ml)	200	1.000	4.000	-
Coliforme total (NMP/100ml)	1.000	5.000	20.000	-

Fonte: adaptado de CPRH (2001)

A Tabela 6 apresenta o Número Máximo de Coliformes Fecais para descarga no corpo receptor de acordo com a classificação de água doce de acordo com seus usos preponderantes, em NMP /100 ml.

Tabela 6 - Número Máximo Provável de Coliformes Fecais para descarga no corpo receptor (água doce)

Classe do rio (Resolução CONAMA nº 430)	NMP para descarga (NMP /100 ml)
Classe especial	0
1	1 x 10 ⁴
2	1 x 10 ⁵
3	1 x 10 ⁶
4	ND

Fonte: adaptado CPRH (2001); ND – não determinado

Para obtenção das reduções exigidas e manutenção do número máximo de coliformes fecais para lançamento dos efluentes tratados nos corpos receptores, são recomendados os seguintes processos de desinfecção: lagoas de maturação ou polimento, cloração, ozonização e ultravioleta para todas as classes de rios, e filtro de areia para rios de classes 2, 3, 6 e 8.

3.7 Análise Estatística dos Dados Experimentais

3.7.1 Estatística Descritiva

A estatística descritiva é a etapa inicial da análise utilizada para descrever e resumir os dados. As disponibilidades de uma grande quantidade de dados e de métodos computacionais eficientes deram condições para que a estatística de dados experimentais pudessem descrever e

sumarizar o conjunto de dados (MORAIS, 2017).

Diferencia-se da estatística inferencial pois seu objetivo é de sumarizar os dados através de técnicas tais como: gráficos descritivos, descrição tabular e medidas de tendência central (média, moda e mediana) e de variabilidade (amplitude, variância, desvio-padrão e intervalo inter-quartil) (CÂMARA FILHO, 2022).

A descrição paramétrica ou não-paramétrica dos dados será observada e de acordo com a sua distribuição, normalidade ou não normalidade, será aplicado testes paramétricos ou não-paramétricos.

As análises estatísticas dependem das ferramentas analíticas disponíveis. No mercado existem *softwares* desenvolvidos por universidades, centros de pesquisa e laboratórios independentes que atendem desde demanda específicas, até demandas gerais. Entretanto, recentemente, os programas considerados “livres” têm ganhado destaque no meio científico, justamente por serem gratuitos e permitirem o acesso ao seu código fonte. Para desenvolvimento das análises estatísticas neste trabalho, foi utilizado o Prograna Statistic 12.0 (STATSOFT, INC., 2011).

3.7.2 *Estatística Multivariada*

Para análise de variáveis, os métodos estatísticos, estão dispostos em dois grupos: um que observa as variáveis de maneira isolada e outro que verifica as variáveis de forma conjunta, definidos como estatística univariada e multivariada, respectivamente (VICINI, 2005).

A Análise de Agrupamentos (AA) constitui uma metodologia numérica multivariada, que tem como objetivo estruturar objetos em grupos similares, onde exista homogeneidade. Assim, dentro grupo haverá homogeneidade e entre diferentes grupos a heterogeneidade (VICINI, 2005).

Para o alcance dos objetivos deste estudo serão verificados dentre os parâmetros físico-químico e microbiológico do esgoto das ETEs, o que foi encontrado em maior quantidade e quais são mais similares ao ponto de formarem grupos. Assim, aplicando-se a técnica estatística de AA, elementos serão classificados em grupos homogêneos.

Vicini (2005) descreve as etapas para realizar a análise de agrupamentos sendo:

1. Formulação do problema (definir as variáveis sobre as quais se baseará o agrupamento);
2. Tratamento dos dados (estruturar os dados em linhas e colunas, padronizando a unidade de medida);

3. Escolha de um coeficiente de semelhança (escolher a medida apropriada de distância que determinará o quão semelhante ou diferentes são os objetos estudados);

4. Escolha de um processo de aglomeração (escolher aquele mais apropriado ao problema estudado); e

5. Avaliação e Interpretação dos resultados.

Em uma AA é importante a escolha de um coeficiente que quantifique a semelhança dos objetos. Esse coeficiente pode ser dividido em duas categorias, que dizem respeito à estimação de uma medida de similaridade, ou dissimilaridade, entre os indivíduos a serem agrupados. Na medida de similaridade, quanto maior for o valor observado, mais parecido serão os objetos. Já na medida de dissimilaridade, quanto maior for o valor observado, menos parecido serão os objetos. Como medida de similaridade tem-se o coeficiente de correlação, pois quanto maior seu valor, maior a associação e de dissimilaridade a distância euclidiana, pois quanto menor o valor mais próximo os objetos estão uns dos outros (VICINI, 2005).

Concluimos que, para avaliação da similaridade de um grupo de objetos, deve-se utilizar um coeficiente de medida de distância. Para esta determinação, se pode utilizar algumas técnicas.

3.7.2.1 Coeficientes de medida de distância

i. Distância Euclidiana

A distância euclidiana é a medida de distância mais utilizada para a análise de agrupamentos, pois se refere a distância entre dois pontos. De forma geral, é calculada pelo teorema de Pitágoras para o espaço multidimensional. É necessário que sejam padronizadas as variáveis originais em estudo para que a variância seja igual a unidade e não seja influenciada pela escala (VICINI, 2005).

Considerando dois indivíduos i e j a distância euclidiana entre eles é dada por:

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2}$$

Sendo,

$d_{ii'}$ – distância euclidiana;

X_{ij} – valor da variável X_i para o objeto i e

X_{ij} – valor da variável X_i para o objeto j

ii. Distância Euclidiana Média

A distância entre dois agrupamentos é obtida pela média das distâncias. Aqui, é possível encontrar o valor da distância através da média aritmética. Através dessa, a distância entre cada conglomerado tem o mesmo peso (VICINI, 2005). A distância euclidiana média é dada por:

$$d_{ii'} = \sum_{j=1}^P \left\{ \frac{(X_{ij} - X_{i'j'})^2}{X_{ij}} \right\}$$

Sendo,

d – distância euclidiana;

X_{ij} – valor da variável X_i para o objeto i e

$X_{i'j'}$ – valor da variável X_i para o objeto j

iii. Distância de Mahalannobis – D^2

A medida mais utilizada, para a quantificação das distâncias entre duas populações, quando existe repetição de dados, é a distância de Mahalanobis (D^2). Esta é baseada nas correlações entre variáveis, com as quais padrões diferentes podem ser identificados e analisados. Diferentemente da distância euclidiana, aqui as correlações do conjunto de dados e é invariante à escala, ou seja, não depende da escala das medições.

A forma mais simples de explicar como obter tal medida é a forma matricial, sendo que essa medida entre duas unidades amostrais (tratamentos, indivíduos, populações), i e i' , é fornecida pela notação:

$$D^2_{ii'} = (\vec{X}_i - \vec{X}_{i'}) S^{-1} (\vec{X}_i - \vec{X}_{i'})$$

Sendo,

$D_{ii'}^2$ – distância Mahalanobis;

$$\vec{X}_i = [\bar{X}_{i1}, \bar{X}_{i2}, \dots \dots \bar{X}_{ip}]$$

$$\vec{X}_{i'} = [\bar{X}_{i'1}, \bar{X}_{i'2}, \dots \dots \bar{X}_{i'p}]$$

\vec{X}_i e $\vec{X}_{i'}$, são os vetores p -dimensionais de médias i e i' , respectivamente, com $i \neq i'$ e $i, i' = 1, 2, \dots, n$.

S – é a matriz de dispersão amostral (matriz de variância e covariâncias residuais)

3.7.3 Técnicas hierárquicas

Nascimento e Guardani (2007) explicam que o agrupamento sucessivo de observações, variáveis ou grupos, pode ser feito segundo critérios de similaridade. As diferentes técnicas hierárquicas adotadas seguem os seguintes critérios:

- a. Ligação simples, ou vizinho mais próximo, baseia-se na menor distância entre quaisquer dois objetos dos dois grupos, o que equivale à distância entre os objetos mais próximos dos dois grupos;
- b. Ligação completa, ou vizinho mais distante, baseia-se na maior distância entre quaisquer dois objetos dos dois grupos, o que equivale à distância entre os objetos mais distantes dos dois grupos;
- c. Ligação média, este método considera a distância entre objetos como sendo a média das distâncias entre pares de todos os componentes de cada objeto;
- d. Centróide, baseia-se nas distâncias entre valores médios dos objetos em cada grupo (centróides). A cada combinação de dois grupos, um novo grupo é formado e seu centróide é calculado novamente.

Pereira *et al.* (2011), avaliando o comportamento de elementos químicos estáveis e parâmetros físico-químicos em resíduos de mineração de urânio através de análise de agrupamento verificaram que a análise de cluster mostrou-se uma ferramenta eficiente para avaliar a associação entre os elementos químicos estáveis e os parâmetros físico-químicos estudados neste trabalho. Os referidos autores também verificaram que a análise separada dos elementos químicos da variável físico-química, seguida de uma análise dos dois grupos em conjunto, mostrou-se importante, pois levou a diferentes associações entre eles.

Jebur & Khudair (2021), avaliando a qualidade de efluentes de estação de tratamento de esgoto no Iraque, utilizando análise de agrupamento, verificaram que os resultados da análise de agrupamento mostraram que os meses (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e junho) indicam um nível médio de tratamento em comparação com o nível do mês (março), quando a eficiência foi boa. Ainda segundo os autores, os resultados da análise de agrupamento mostraram a formação de agrupamentos em quatro estágios e, em seguida, deram a forma final composta por dois grupos. Ao mesmo tempo, dois fatores influenciadores foram extraídos na análise de componentes principais. A qualidade final do efluente (uma média de oito meses consecutivos, de novembro de 2019 a junho de 2020) está em conformidade com os rigorosos

regulamentos propostos nos Requisitos de Qualidade do Iraque.

O método de análise de agrupamentos é considerado um dos métodos mais importantes utilizados na análise estatística dos componentes, a fim de conhecer facilmente a eficiência das estações de tratamento para diagnosticar os problemas que ocorrem na planta e acessar uma operação de alta eficiência de forma regular e contínua. Esta mesma conclusão foi alcançada por outros autores (PEJMAN *et al.*, 2009).

Farias (2013) estudando o afluente e efluente de uma ETE no estado do Pará, fazendo uso da estatística multivariada, concluiu que através da análise de similaridades e agrupamento dos parâmetros físico-químico, os elementos que mais apresentaram similaridades foram o Fósforo (P) e o pH para o afluente, e os Sólidos Suspensos Totais (SST) e os Ácidos Graxos Voláteis (AGV) para efluentes.

3.7.4 *Análise Fatorial e Análise de Componentes Principais*

A Análise Fatorial (AF) fornece ferramentas para analisar a estrutura das correlações entre um grande número de variáveis. A técnica tem como objetivo condensar o grande número de variáveis em um conjunto menor, com uma perda mínima de informação (HAIR *et al.*, 2009).

A AF não se refere a apenas uma técnica estatística, mas sim a uma variedade de técnicas para tornar os dados observados mais facilmente interpretados, ou seja, analisam-se as correlações entre as variáveis, para que possam ser descritas, convenientemente, através de um grupo de categorias, chamado de fatores (VICINI, 2005).

De acordo com Hair *et al.* (2009), os dois principais usos da análise fatorial são resumo e redução dos dados, que podem ser muito úteis à medida que o número de variáveis utilizadas em técnicas multivariadas aumenta. Como resumo dos dados, se considera a definição da estrutura, que permite visualizar os dados desde o nível mais detalhado até o mais generalizado. A redução dos dados se refere a identificação de variáveis representativas a partir de um conjunto maior.

Esse método determina quais variáveis pertencem a quais fatores, e o quanto cada variável explica cada fator. A AF explica a estrutura das covariâncias, entre as variáveis, utilizando um modelo estatístico casual e pressupondo a existência de p variáveis não-observadas e subjacentes aos dados. Os fatores expressam o que existe de comum nas variáveis originais (REIS, 2006).

Quando medimos um conjunto de variáveis, as correlações entre os pares de variáveis

podem ser organizadas em uma matriz de correlações (matriz-R), que é uma tabela de coeficientes de correlação. Na AF, tentamos reduzir a matriz-R à sua dimensão subjacente investigando quais variáveis parecem se agrupar de maneira significativa (FIELD, 2009).

A técnica considera a variabilidade do conjunto de variáveis por um número menor de variáveis índices ou fatores. Pressupõe-se que cada uma das variáveis originais possa ser expressa como uma combinação linear desses fatores mais um termo residual que representa a dependência de uma variável em relação às demais, sendo que tais variáveis podem ser expostas algebricamente, tal como pode ser visto a seguir.

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 &= a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ X_p &= a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots a_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{aligned}$$

Onde:

a_{pm} = constantes;

F_i = fatores comuns ou variáveis latentes;

ε = vetor aleatório chamado de erro

Para o ajuste do modelo de análise fatorial, o primeiro passo é definir o número de fatores que serão extraídos. Essa tarefa é complexa e consiste em encontrar a quantidade de fatores que representa melhor o padrão de correlação entre as variáveis. Para Figueiredo e Silva (2010), a solução ótima seria encontrar o número mínimo de fatores que maximiza a quantidade de variância total explicada.

Como princípio básico da análise fatorial, devem ser retidos apenas fatores com autovalores grandes. Nesse sentido, existe uma regra bastante utilizada (critério de Kaiser) que sugere que devemos extrair somente os fatores com autovalor maior do que 1. Segundo Tabachnick e Fidell (2013), esse critério de Kaiser costuma funcionar melhor quando o investigador analisa entre 20 e 50 variáveis.

O método do diagrama de declividade (*Scree test*) é um gráfico dos autovalores (eixo-y) e seus fatores associados (eixo-x). Esse gráfico tem um formato bem característico: uma inclinação bastante acentuada na curva seguida de uma cauda praticamente horizontal (FIELD, 2009). O ponto de corte para decidir sobre o número de fatores deve ser no ponto de inflexão dessa curva, caracterizando que a variância individual de cada fator se torna horizontal ou então sofre uma queda abrupta, mostrando com isso que houve perda da variância e que a extração

dos fatores deverá ser interrompida.

Um terceiro critério é a porcentagem de variância acumulada para definir a quantidade de fatores que devemos extrair. Nesse método, a extração dos fatores continua até que um patamar específico seja obtido. Hair *et al.* (2009) sugerem o patamar de 60% como aceitável. Conforme Pereira (2001) valor superior a 70% é uma medida de ajuste do modelo à análise de dados.

Antes de aplicar a AF, deve-se levar em consideração certas premissas sobre a natureza dos dados. Primeiramente, deve-se analisar a distribuição de frequência das variáveis através de testes de ajuste da normalidade (Kolmogorov-Smirnov) para amostras grandes ou o Teste de Bartlett, que como todo teste de hipótese, depende muito do tamanho amostral e tende a rejeitar a hipótese nula para amostras grandes (FIELD *et al.*, 2012).

Há, também, uma medida de adequação dos dados, muito importante, sugerida por *Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Adequacy* (KMO). O KMO serve para avaliar o valor de entrada das variáveis para o modelo, sendo que seu valor possibilita prover resultados no alcance de 0,5 a 0,9. Quanto mais próximo esse valor estiver da unidade, mais adequados os dados estão para se ajustar uma AF. Field *et al.* (2012) recomendam utilizar os critérios de adequabilidade da amostra:

- KMO < 0,5 - Inaceitável;
- KMO [0,5 - 0,7] - Medíocre;
- KMO [0,7 - 0,8] - Bom;
- KMO [0,8 - 0,9] – Ótimo;
- KMO > 0,9 – Excelente.

Para uma melhor visualização das variáveis, que melhor representem cada fator, buscase fazer uma rotação nos eixos, pois a AF posiciona os fatores de forma mais simples, com respeito às variáveis originais, que ajudam na interpretação de fatores. Existem várias rotações que podem ser realizadas para a matriz fatorial, *varimax*, *quartimax* e *equimax*. Entre essas, a rotação *varimax* maximiza a variância da carga e é, também, a mais utilizada. Conforme Pereira (2001), a rotação da matriz não afeta a inércia (comunalidades) das variáveis nem a porcentagem de variações explicadas pelos fatores.

A Análise Fatorial e a Análise de Componentes Principais (ACP) têm um objetivo similar: a redução de muitas variáveis para poucas variáveis. Enquanto a ACP cria novas variáveis como combinações lineares das variáveis originais, a AF considera cada uma das variáveis originais como uma combinação linear de alguns fatores subjacentes (GOTELLI &

ELLISON, 2011).

O objetivo da ACP não é explicar as correlações existentes entre as variáveis, mas encontrar funções matemáticas, entre as variáveis iniciais, que expliquem o máximo possível da variação existente nos dados e permita descrever e reduzir essas variáveis (REIS, 2006).

A ACP é uma técnica matemática da análise multivariada, que possibilita investigações com um grande número de dados disponíveis. A meta da análise de componentes principais é abordar aspectos como a geração, a seleção e a interpretação das componentes investigadas. A ideia matemática do método é conhecida há muito tempo, e baseia-se na redução do conjunto de dados a ser analisado, principalmente quando os dados são constituídos de um grande número de variáveis inter-relacionadas.

A técnica permite o agrupamento de indivíduos similares mediante a visualização em dispersões gráficas no espaço bi ou tridimensional, de fácil interpretação geométrica. Na prática, o algoritmo baseia-se na matriz de variância-covariância, ou na matriz de correlação, de onde são extraídos os autovalores e os autovetores.

Segundo Toledo & Nicolella (2002) a AF demanda algumas etapas: a primeira consiste na preparação da matriz de correlação; a segunda na extração dos fatores comuns e a possível redução de variáveis explicativas e, por último, na rotação dos eixos relativos aos fatores comuns, com o objetivo de tornar a solução mais simples e facilmente interpretável.

Segundo Wilks (2006), a ordem de grandeza das variáveis deve ser analisada após a construção da matriz original para que as variáveis com ordem de grandeza discrepantes sejam padronizadas para que o fator de escala influencie nas decisões finais de estudo, dando maior ênfase a uma variável de escala maior (com maior módulo da variância em seus dados) em relação a uma variável de escala menor.

Guedes *et al.* (2012) explicam que para que seja possível padronizar as variáveis, é necessário ter-se uma matriz de dados com i variáveis ($i = 1, 2, \dots, n$) e j objetos ($i = 1, 2, \dots, p$). Sendo que, na matriz de dados, o valor do i -ésimo objeto e j -ésima variável será denotado por X_{ij} , no qual o valor padronizado será representado por Z_{ij} . A padronização das variáveis será feita dividindo-se os desvios em relação à média de cada variável ($X_{ij} - \bar{X}_j$) por seu desvio padrão $S(X_j)$, onde as variáveis padronizadas terão média 0 e variância constante 1, sendo esta a mais utilizada na prática, e é representada pela seguinte função:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S(X_j)}$$

Em que:

Z_{ij} – variável padronizada

$S(X_j)$ – desvio padrão

X_j – média da j -ésima variável original

Vicini (2005) explica os passos para aplicar a análise de componentes principais:

Inicialmente, calcula-se a matriz S (variância-covariância), ou a matriz R (correlação), e verifica-se se as variáveis estão correlacionadas umas em relação as outras. Caso não estejam, deve-se aplicar o teste do KMO, ou fazer um teste que verifique se as correlações entre as variáveis são significativas, ou não, para verificar se é possível proceder a análise dos dados aplicando esta técnica.

A seguir, decide-se pelo número total de componentes que melhor explicarão o conjunto de variáveis originais, fazendo-se uso dos autovalores, de acordo com critério sugerido por Mardia (1979) *apud* Vicini (2005), que consiste em incluir somente aquelas componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70%.

A definição do número de componentes a serem utilizadas é feita por meio de dois critérios. O primeiro, denominado de método gráfico, representa graficamente a porcentagem de variação explicada pela componente nas ordenadas e os autovalores em ordem decrescente nas abscissas. O segundo critério de seleção consiste em incluir aquelas componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70%.

Decidido o número de componentes, passa-se a encontrar os autovetores que irão compor as combinações lineares, que irão formar as novas variáveis. A normalização e a ortogonalização dos autovetores, finalizam as etapas e garantem solução única as componentes principais.

Os componentes são combinações lineares não correlacionados de Y_1, Y_2, \dots, Y_p , cuja variância é a maior possível, de acordo com o sistema:

$$Y_{11} = x_{11}X_{11} + x_{12}X_{12} + \dots + x_{1p}X_{1p}$$

$$Y_{21} = x_{11}X_{21} + x_{12}X_{22} + \dots + x_{1p}X_{2p}$$

$$\begin{array}{cccccc} \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \end{array}$$

$$Y_{n1} = x_{11}X_{n1} + x_{12}X_{n2} + \dots + x_{1p}X_{np}$$

Caso seja necessário padronizar as variáveis, utiliza-se a equação anterior, como mostra a Tabela 7 de um exemplo das variáveis padronizadas.

Tabela 7 - Matriz de variáveis padronizadas de n indivíduos e p variáveis

Indivíduos	Variáveis					
	Z_1	Z_2	...	Z_j	...	Z_p
1	Z_{11}	Z_{12}	...	Z_{1j}	...	Z_{1p}
2	Z_{21}	Z_{22}	...	Z_{2j}	...	Z_{2p}
...
i	Z_{i1}	Z_{i2}	...	Z_{ij}	...	Z_{ip}
...
n	Z_{n1}	Z_{n2}	...	Z_{nj}	...	Z_{np}

Fonte: adaptado de Regazzi (2001)

Utilizando os dados padronizados garante-se que todas as variáveis tenham o mesmo grau de importância, portanto, trabalha-se com o conjunto de dados padronizados. Neste caso, faz-se necessário estimar a matriz R para se calcular os autovalores e autovetores que darão origem às componentes principais.

Considerando-se X_1, X_2, \dots, X_p , as variáveis originais, a estimativa da matriz de correlação (que é igual à estimativa da matriz de variância-covariância entre as variáveis padronizadas Z_1, Z_2, \dots, Z_p) é denotada da seguinte forma:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & \cdots & r_{1p} \\ r_{12} & 1 & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ r_{1p} & r_{2p} & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz R é uma matriz quadrada de ordem $p \times p$, simétrica em relação a diagonal principal, pois $r_{ij} = r_{ji}$ e que é extraída das variáveis originais. As correlações entre as variáveis serão obtidas pela equação abaixo.

$$r_{jj} = \frac{\text{Cov}(X_j, X_j)}{\sqrt{\text{Var}(X_j) \cdot \text{Var}(X_j)}}$$

Como a correlação entre $r_{12} r_{21} = r_{xy}$, logo $r_{11} = r_{22} = r_{xy}$ também são equivalentes, de modo que:

$$r_{11} = \frac{\text{Cov}(X_1, X_1)}{S_{x_1} \cdot S_{x_1}} = \frac{S_{x_1}^2}{S_{x_1}^2} = 1$$

Para encontrar os autovalores, a partir da matriz de correlação R , deve-se tomar como referência a equação característica:

$$|R - \hat{\Lambda} I| = 0$$

Substituindo-se as matrizes de correlação e a matriz identidade na equação característica e fazendo as devidas operações, encontra-se os autovalores correspondentes à matriz R . A soma dos autovalores $(\hat{\Lambda}_1 + \hat{\Lambda}_2 + \dots + \hat{\Lambda}_p)$ corresponde ao traço e ao determinante da matriz R $(\hat{\Lambda}_1) \cdot (\hat{\Lambda}_2) \dots (\hat{\Lambda}_p)$.

A expressão $\frac{\hat{\Lambda}_1}{\text{traço } R} \cdot 100$, determina a proporção da variância total, explicada por cada componente principal.

O cálculo da primeira componente, referente ao autovalor $\hat{\Lambda}_1$, será dado pelo autovetor associado a $\hat{\Lambda}_1$, de acordo com a equação:

$$|R - \hat{\Lambda} I| \hat{e}_1 = 0$$

O segundo componente principal é dado por $\hat{\Lambda}_2$, de acordo com a equação:

$$|R - \hat{\Lambda}^2 I| \hat{e}_1 = 0$$

Substituindo-se nas equações anteriores as matrizes R e I , e os respectivos autovalores, serão determinados os autovetores.

Para completar a análise de componentes principais, quando os autovetores são derivados da matriz de correlação R , é necessário fazer a correlação entre as variáveis Z_j e Y_i , de acordo com a equação que segue:

$$r_{\hat{y}_i, Z_k} = \hat{e}_{ki} \sqrt{\hat{\Lambda}_1}$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A pesquisa foi realizada com três Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) localizadas na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, sendo essas as seguintes estações: ETE Tacaimbó (ETE 1), ETE Rendeiras (ETE 2) e ETE Gravatá (ETE 3), localizadas nos municípios de Tacaimbó, Caruaru e Gravatá, respectivamente. Essas estações fazem parte do Programa de Saneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (PSA – Ipojuca).

A Estação de Tratamento de Esgoto de Tacaimbó (ETE Tacaimbó) de coordenadas geográfica 8°18'59"S 36°16'22"W é operada pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) para tratar uma vazão máxima de final de plano de 33,0 L/s, atendendo uma população de 12.307 habitantes. Sua operação se iniciou em dezembro de 2017. Suas etapas do tratamento de esgoto segundo o projeto final são constituídas por uma unidade de tratamento preliminar composta por gradeamento, unidade de desarenação, dispositivo de medição de vazão, uma estação elevatória de esgoto, uma unidade de tratamento secundário para a remoção de matéria orgânica biodegradável formada por reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo – UASB, seguido de lodos ativados, e por fim desinfecção por cloração. Após as etapas de tratamento o efluente é encaminhado para o rio Ipojuca que é usado como corpo receptor. A Figura 6 mostra a ETE Tacaimbó e suas respectivas etapas do tratamento dos esgotos.

Figura 6 - Estação de Tratamento de Esgotos de Tacaimbó e suas respectivas etapas de tratamento



Fonte: Google Earth (2023)

A Estação de Tratamento de Esgoto de Rendeiras (ETE Rendeiras), com coordenadas geográficas $8^{\circ}16'58''\text{S}$ $35^{\circ}56'14''\text{W}$ tem sua operação feita pela COMPESA e foi projetada para tratar uma vazão de final de plano de 450 L/s com previsão de atendimento de uma população de 148.000 habitantes. Sua operação se deu na década de 70, e desde então vem passando por ampliações e modernizações a fim de suportar o tratamento dos efluentes com suas atuais características. Suas etapas do tratamento de esgoto são constituídas por uma unidade de tratamento preliminar composta por gradeamento, unidade de desarenação, dispositivo de medição de vazão, uma unidade de tratamento secundário para a remoção de matéria orgânica biodegradável formada por reatores UASB, seguido de lodos ativados e lagoas de polimento. Por fim, o efluente passa pelo processo de desinfecção por cloração. Após as etapas de tratamento o efluente é encaminhado para o rio Ipojuca que é usado como corpo receptor. A Figura 7 mostra a ETE Rendeiras e suas respectivas etapas do tratamento dos esgotos.

Figura 7 - ETE Rendeiras e suas etapas de tratamento



Fonte: Compesa (2017)

Por fim, a ETE Gravatá, instalada no município de Gravatá, com coordenadas geográficas $8^{\circ}13'17''\text{S}$ $35^{\circ}33'09''\text{W}$, é operada pela COMPESA desde dezembro de 2019. Em sua primeira etapa, a ETE possui capacidade de tratamento para uma vazão de 140 L/s beneficiando, aproximadamente, 30.000 habitantes. Suas etapas do tratamento de esgoto são constituídas por uma unidade de tratamento preliminar composta por gradeamento, unidade de desarenação, dispositivo de medição de vazão, uma unidade de tratamento secundário para a remoção de matéria orgânica biodegradável formada por um reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), sistema de lodos ativados e sistema de desinfecção

ultravioleta que trata os resíduos e os devolve à natureza com um alto nível de qualidade. Após as etapas de tratamento todo efluente é encaminhado para o Rio Ipojuca que é usado como corpo receptor. A Figura 8 mostra a ETE Gravatá instalada e em operação.

Além do atendimento à população, a contribuição ambiental é também uma meta que vem sendo alcançada por meio do PSA Ipojuca os novos sistemas de esgotamento estão contribuindo para o processo de despoluição do Rio Ipojuca.

Figura 8 - Estação de Tratamento de Esgotos de Gravatá (ETE – Gravatá)



Fonte: Compesa (2018)

4.2 Análise dos parâmetros físico-químicos e biológico das amostras

Os parâmetros analisados neste estudo foram fornecidos pela COMPESA, todas as amostras foram coletadas no ano de 2020, em todos os meses do ano (de janeiro a dezembro). Foram realizadas coletas nas ETEs Tacaimbó, Rendeiras e Gravatá sendo tais amostragem do tipo simples, mediante coleta manual do efluente tratado.

As coletas foram realizadas por equipe da COMPESA, em cada uma das ETEs da área de estudo. As coletas, acondicionamento e transporte das amostras do efluente tratado das ETEs, seguiram as recomendações do controle de qualidade da Companhia, normatizada através de procedimentos internos específicos que são baseados nos *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*.

As amostras simples são coletadas na caixa de saída das ETEs e dispostas em frascos de material plástico de polipropileno com tampa rosqueável e de boca larga com capacidade para 1 litro. As amostras foram coletadas e acondicionadas em caixas isotérmicas sob refrigeração, até seu transporte definitivo para os laboratórios para serem analisados.

Para as informações dos efluentes das ETEs os parâmetros foram analisados de acordo

com suas respectivas recomendações de análises.

- Temperatura: usando método de laboratório e campo (método SMEWW 2550 B)
- pH: determinação utilizando o método eletrométrico (método SMEWW 4500 - H+ B-);
- Alcalinidade Total (AT): determinação utilizando o método tritração (método SMEWW 2320 B);
- Cloreto (CL): método argentométrico (método SMEWW 4500 Cl- B);
- Oxigênio Dissolvido (OD): método de azida modificada (método SMEWW 4500-O C)
- DBO_5^{20} : determinação mediante a utilização do método respirométrico (método SMEWW 5210D);
- DQO: determinação mediante a utilização do método colorimétrico de refluxo fechado (método SMEWW 5220D);
- Sólidos Totais (ST), fíxos (STF) e voláteis (STV): determinação mediante a utilização do método de sólidos suspensos totais fixos e voláteis (métodos SMEWW 2540 D; 2540 E);
- Sólidos Suspensos Totais (SST), Fixos (SSF) e Voláteis (SSV): determinação mediante a utilização do método de sólidos suspensos totais fixos e voláteis (método SMEWW 2540 E);
- Sólidos Sedimentáveis (SS): método dos sólidos sedimentáveis (método SMEWW 2540 F);
- Fósforo total: determinação utilizando o Método Colorimétrico de Ácido Vanadomolibdofosfórico (método SMEWW 4500-P C);
- Óleos e Graxas: método gravimétrico de partição líquido-líquido (método SMEWW 5520 B) e método de partição infravermelho (método SMEWW 5520 C);
- Exames microbiológicos (Coliformes Totais): determinação mediante a aplicação do método de substrato enzimático (método SMEWW 9125 E).

4.3 Análise da Estatística Descritiva

Para obtenção das informações gerais dos parâmetros utilizados neste trabalho foram efetuadas, inicialmente, planilhas contendo as informações dos parâmetros físico-químicos e microbiológico a serem usados, inicialmente, na análise estatística descritiva de modo a se obter as informações básicas dos dados.

Após uma análise de consistência dos dados, para identificação de valores não factíveis ou ainda falhas no preenchimento das planilhas, foi realizada a estatística descritiva onde foram calculados o número de réplicas, a média, a mediana, os valores mínimo e máximo, a soma geral por grupo, a variância, o desvio-padrão os percentis 25% e 75%, a assimetria, a curtose, a média geométrica e o coeficiente de variação. Também foram verificadas a normalidade dos dados por meio da execução dos testes de normalidade Shapiro-Wilk, complementando o sumário estatístico dos dados. Para determinação dos diversos parâmetros foi utilizado o pacote Statistica 12.0 (STATSOFT, INC., 2011).

O período de monitoramento de cada estação, compreendido entre janeiro e dezembro de 2020, foi comum a todas as ETEs, permitindo assim comparações mais homogêneas e confiáveis entre os parâmetros da qualidade dos efluentes das estações. Foram analisados 612 dados dos parâmetros, normalmente, utilizados pela COMPESA para controle de qualidade de efluentes.

Os parâmetros analisados foram: Temperatura, pH, Alcalinidade, Cloreto, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Sólidos Sedimentáveis, Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, Sólidos Suspensos, Sólidos Suspensos Fixos, Sólidos Suspensos Voláteis, Fósforo, Óleos e Graxas, Coliformes Total.

Foram elaborados gráficos descritivos para verificação de como os dados se apresentam, sua tendência e como as variáveis se relacionam. Descrições paramétricas de média, desvio-padrão, mediana, 1º e 3º quartil, também foram consideradas na análise de cada parâmetro, de modo a evidenciar se existia normalidade ou não normalidade nos dados.

4.4 Análise Multivariada

4.4.1 Análise Fatorial e Análise por Componentes Principais

Técnicas estatísticas multivariadas, como Análise Fatorial (AF) e Análise por Componentes Principais (ACP), são amplamente utilizadas para a avaliação de variações temporais e espaciais, por conta da facilidade de análise e interpretação de grande número de variáveis, para diversos fins em diversas áreas de conhecimento (NOGUEIRA *et al.*, 2014; HONGYU, 2018).

Segundo HAIR *et al.* (2009) a análise fatorial (AF) permite examinar os padrões ou relações latentes entre um grande número de variáveis e determinar se a informação pode ser condensada ou resumida a um conjunto menor de fatores ou componentes. É necessário verificar se a matriz de dados possui correlações suficientes para justificar a aplicação da análise

fatorial.

A análise por componentes principais (ACP) é um método de análise estatística multivariada usada com o objetivo de condensar a informação contida em várias variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas, com uma perda mínima de informação (HAIR *et al.*, 2009; HONGYU, 2018). Ainda, segundo Nogueira *et al.* (2014), este método além de reduzir, reunir e simplificar os dados, revela a relação existente entre as variáveis, uma vez que analisa quais variáveis explicam a maior parte da variabilidade total dos dados.

Para avaliar a pertinência das amostras para a ACP, utiliza-se o índice de adequação da amostra ou teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que quantifica o grau de intercorrelação entre as variáveis. Esse índice varia de 0 a 1, e valores acima de 0,5 são aceitáveis, indicando que o método de análise fatorial é adequado para tratamento dos dados (HAIR *et al.*, 2009).

Outro modo utilizado para determinar a adequação da análise fatorial é o teste de esfericidade de Bartlett, que examina a matriz de correlação inteira. Esse teste fornece a significância estatística de que a matriz de correlação tem correlações significativas entre pelo menos algumas das variáveis, ou seja, se em um teste de esfericidade de Bartlett o p -valor $< 0,05$, significa que o teste é significativo e a análise fatorial é adequada (HAIR *et al.*, 2009; DAMÁSIO, 2023).

O método das componentes principais consiste em reescrever as coordenadas das variáveis em um outro sistema de eixo mais apropriado para a análise dos dados. N -variáveis originais geram, através de combinações lineares, n -componentes principais, cuja principal característica, além da ortogonalidade, é que essas novas componentes principais são obtidas em ordem decrescente de máxima variância (ANDRADE *et al.*, 2007).

O cálculo das componentes principais é feito de forma que a primeira componente principal explique o máximo da variabilidade total dos dados; a segunda componente principal explique o máximo da variabilidade total restante dos dados, sendo não-correlacionada com a primeira; a terceira componente principal explique o máximo da variabilidade total restante dos dados, sendo não-correlacionada com a primeira e a segunda componentes, e assim sucessivamente, até que o número de componentes principais seja no máximo igual ao número de variáveis analisadas (ANDRADE *et al.*, 2007).

Segundo Nonato *et al.* (2007), o número de componentes principais importantes para descrição da variabilidade dos dados é menor que o número de parâmetros da base de dados original pois, a partir de certa componente principal limite, a variância das componentes tende a zero, sendo, portanto, desnecessária a inclusão dessas componentes na nova base de dados

reduzida.

Nem sempre a matriz das componentes obtidas na fase de extração não apresenta um conjunto de cargas fatoriais, seja devido à existência de cargas cruzadas, acúmulo de variáveis em um mesmo fator ou a inexistência de variáveis com cargas significativas em alguns fatores. Tais condições, indicam a necessidade da aplicação do procedimento de rotação da matriz das cargas fatoriais, gerando uma nova matriz de cargas fatoriais que apresenta melhor significado interpretativo aos fatores (ANDRADE *et al.*, 2007; HAIR *et al.*, 2009; FIGUEIREDO, 2010).

Normalmente, emprega-se a rotação ortogonal através do método VARIMAX (ANDRADE *et al.*, 2007; HAIR *et al.*, 2009), por a mesma se concentrar na simplificação das colunas da matriz fatorial, facilitando a interpretação dos fatores (HAIR *et al.*, 2009).

No pré-tratamento dos dados, levou-se em consideração a padronização (escore Z), segundo as médias e desvios padrão, devido as diferentes escalas existentes. A padronização faz com que as variáveis transformadas passem a ter média, zero e variância unitária, o que é conseguido pela transformação “Z”. O escore Z pode ser positivo, negativo ou igual a zero. Moita Neto e Moita (1988) afirmam que a finalidade da padronização e escalonamento dos dados originais é expressar cada observação em termos de variações inerentes ao sistema.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente das ETEs

Os resultados das análises físico-químicas e biológicas das ETE Tacaimbó, ETE Rendeiras e ETE Gravatá foram comparados aos valores recomendados pela Resolução CONAMA nº 430/2011, para águas doces, classe 3, referentes ao enquadramento do rio Ipojuca e as Norma Técnica 2007/2001 da CPRH.

Os resultados das análises das referidas ETEs foram submetidos ao tratamento estatístico descritivo com o intuito de se obter informações da média, mediana, valores mínimo e máximo, variância, desvio-padrão, percentis, assimetria, curtose, média geométrica e o coeficiente de variação. Também foram verificados testes de normalidade dos dados por meio da execução dos testes de normalidade Shapiro-Wilk, complementando desta forma o sumário estatístico dos dados, conforme as Tabelas 8, 9 e 10.

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk aplicados aos dados dos parâmetros físico-químicos e biológico para todas as ETEs, mostrou que alguns desses dados apresentaram aderência à distribuição normal (valor $p > 0,05$) ao nível de significância (α) de 5%. No caso em que a distribuição dos dados era não normal (valor $p < 0,5$), foi utilizado o teste de Mann-Whitney com o nível de significância, também, igual a (α), de 5%.

Após a análise de consistência dos dados, procedeu-se à elaboração da estatística descritiva com a elaboração de gráficos de barra para os parâmetros físico-químicos e biológicos que apresentaram distribuição normal. Nestes gráficos são mostrados a média e o desvio padrão dos dados referentes aos parâmetros. Para os parâmetros que apresentaram distribuição não normal, foram elaborados gráficos em *box plot*, nos quais são representados os valores do primeiro quartil (25%), a mediana e o terceiro quartil (75%) dos dados.

A Tabela 10 mostra as distribuições estatísticas dos parâmetros físico-químicos e biológicos das três estações de tratamento de esgotos, seus respectivos testes paramétricos e o “p-valor” que é considerado como o nível descritivo da significância estatística. Conceitualmente, o nível descritivo (p-valor) é definido como o menor nível de significância (α) que pode ser assumido para de rejeitar a hipótese nula (H_0).

Tabela 8 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente da ETE 1 - Tacaimbó

	Temp	pH	Alca.	Cloretos	OD	DBO	DQO	S. Sed.	S. T.	S. F.	S. V.	S. Susp.	S.S. F.	S. S. V.	P	O & G	Coli.Totais
N	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	9.0E+00
Min	24.0	5.1	6.9	100.0	0.0	10.0	42.0	0.6	589.0	467.0	122.0	38.0	17.0	21.0	1.5	7.4	1.0E+02
Max	29.0	7.6	458.0	450.0	10.8	160.0	967.0	34.0	1812.0	938.0	874.0	840.0	554.0	426.0	3.0	58.1	2.7E+05
Soma	322.0	82.9	1895.9	2660.0	57.2	676.0	3354.0	94.2	12773.0	8474.0	4299.0	2787.0	1677.0	1110.0	31.0	257.1	3.7E+05
Méd.	26.8	6.9	158.0	221.7	4.8	56.3	279.5	7.9	1064.4	706.2	358.3	232.3	139.8	92.5	2.6	21.4	4.1E+04
E. P.	0.5	0.2	34.7	24.8	0.9	12.7	89.9	3.1	95.4	42.0	59.5	79.8	49.6	34.0	0.1	4.7	2.9E+04
Var.	3.4	0.4	14415.8	7360.6	8.9	1949.7	96912.8	114.5	109327.5	21127.6	42540.9	76451.3	29490.0	13897.0	0.2	270.1	7.3E+09
D.P.	1.9	0.6	120.1	85.8	3.0	44.2	311.3	10.7	330.6	145.4	206.3	276.5	171.7	117.9	0.4	16.4	8.6E+04
Med.	27.0	7.1	129.0	200.0	4.2	44.0	142.0	3.0	993.5	689.0	295.5	113.5	57.5	51.5	2.5	13.1	1.1E+04
Q1 (25%)	25.3	6.8	73.8	170.0	2.7	25.8	88.3	1.2	835.0	596.3	213.0	72.3	35.5	28.5	2.5	9.6	2.3E+03
Q3 (75%)	28.8	7.2	193.8	250.0	6.9	73.8	340.8	14.0	1210.0	826.8	452.0	258.5	182.5	82.0	3.0	36.3	3.2E+04
Assim.	-0.3	-2.5	1.5	1.6	0.6	1.5	1.7	1.8	1.0	0.0	1.6	1.8	1.8	2.5	-1.5	1.3	2.9E+00
Curt.	-1.2	7.9	2.9	4.6	0.2	1.8	1.8	2.3	1.3	-0.9	2.8	2.1	2.5	6.3	3.7	0.6	8.4E+00
M.G.	26.8	6.9	111.8	208.5	0.0	43.3	176.2	3.5	1021.2	692.1	313.9	141.3	77.7	57.9	2.5	16.9	8.0E+03
C.V.	6.9	8.9	76.0	38.7	62.6	78.4	111.4	136.3	31.1	20.6	57.6	119.1	122.9	127.4	16.2	76.7	2.1E+02
S.-W.(W)	0.9	0.7	0.9	0.8	1.0	0.8	0.7	0.7	0.9	1.0	0.9	0.7	0.7	0.6	0.7	0.8	5.2E-01
p(normal)	0.2	0.0	0.1	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8E-06

N- N° de amostras; Min-Valor mínimo; Máx. – Valor máximo; Soma – Soma geral; Méd. – média; E. P. – erro padrão; Var. – variância; D.P. – desvio padrão; Med.- mediana; Q1 – 1° quartil; Q3 – 3° quartil; Assim. Assimetria; Curt. – Curtose; M.G. – Média geométrica; C. V. – Coeficientes de variação; S.-W.(W) – Shapiro-Wilk; p(normal) – probabilidade dos valores pertencerem a uma distribuição normal

Temp. – Temperatura °C; pH – potencial hidrogeniônico; Alca.- Alcalinidade (mg CaCO₃); Cloretos – (C₂Cl₂); O.D. – Oxigênio dissolvido (mgO₂/l); DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio (mgO₂/l); DQO - Demanda Química de Oxigênio (mgO₂/l); S.Sed. – Sólidos sedimentáveis (mg/l); S. T. Sólidos totais (mg/l); S. F. – Sólidos fixos (mg/l); S. V. – Sólidos voláteis (mg/l); S. Susp.- Sólidos suspensos (mg/l); S.S.F. – Sólidos suspensos fixos (mg/l); S.S.V. – Sólidos suspensos voláteis (mg/l); P – Fósforo (mg/l); O & G – Óleos e graxas (mg/l); Coli. Term.- Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)

Tabela 9 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente da ETE 2 - Rendeiras

	Temp	pH	Alca.	Cloretos	OD	DBO	DQO	S. Sed.	S. T.	S. F.	S. V.	S. Susp.	S.S. F.	S. S. V.	P	O & G	Coli.Totais
N	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Min	25	8.8	110	100	3.9	4	9.6	0	616	445	103	22	1	18	1.5	1.4	0.00E+00
Max	29	9.6	194	250	21.6	40	151	0.1	745	574	194	99	43	67	3	94	1.12E+04
Soma	333	110	1833	2000	154.7	184	699.6	0.3	8061	6220	1841	812	278	534	25	426.9	2.79E+04
Méd.	27.8	9.2	152.8	166.7	12.9	15.3	58.3	0.0	671.8	518.3	153.4	67.7	23.2	44.5	2.1	35.6	2.33E+03
E. P.	0.4	0.1	6.4	12.8	1.5	3.3	11.4	0.0	11.4	10.8	7.6	6.8	3.8	4.8	0.1	7.6	9.24E+02
Var.	1.8	0.1	487.1	1969.7	25.3	129.2	1546.3	0.0	1571.8	1406.1	698.6	556.4	172.0	278.5	0.2	698.0	1.02E+07
D.P.	1.4	0.3	22.1	44.4	5.0	11.4	39.3	0.0	39.6	37.5	26.4	23.6	13.1	16.7	0.5	26.4	3.20E+03
Med.	28	9.15	151	150	13.9	12	53.5	0	673	523	160.5	72	23	45.5	2	35.35	1.37E+03
Q1 (25%)	27	8.9	140.25	150	9.35	6.75	34.5	0	633.75	492.5	128.25	48.75	11.25	28.75	1.625	12.65	2.58E+01
Q3 (75%)	29	9.4	165.25	200	16	17.5	70.25	0.075	699.75	548	172.75	89.25	33.5	58.75	2.5	45.6	3.61E+03
Assim.	-0.77	0.17	0.11	0.14	-0.07	1.38	1.17	1.33	0.21	-0.14	-0.52	-0.48	-0.21	-0.34	0.41	1.01	2.14E+00
Curt.	-0.33	-1.67	0.72	-0.25	-0.12	1.28	1.95	-0.33	-0.63	0.02	-0.36	-0.55	-0.98	-1.26	-0.30	0.99	5.51E+00
M.G.	27.72	9.16	151.26	161.02	11.80	12.08	45.28	0.00	670.68	517.08	151.16	62.90	17.11	41.09	2.04	24.40	0.00E+00
C.V.	4.89	3.33	14.45	26.63	39.02	74.12	67.45	180.91	5.90	7.23	17.23	34.86	56.61	37.50	22.50	74.26	1.38E+02
S.-W.(W)	0.85	0.88	0.97	0.90	0.98	0.83	0.90	0.55	0.97	0.94	0.96	0.96	0.97	0.93	0.89	0.92	7.32E-01
p(normal)	0.041	0.085	0.951	0.160	0.981	0.020	0.158	0.00004	0.895	0.465	0.733	0.784	0.894	0.383	0.123	0.286	1.756E-03

N- N° de amostras; Min-Valor mínimo; Máx. - Valor máximo; Soma - Soma geral; Méd. - média; E. P. - erro padrão; Var. - variância; D.P. - desvio padrão; Med.- mediana; Q1 - 1° quartil; Q3 - 3° quartil; Assim. Assimetria; Curt. - Curtose; M.G. - Média geométrica; C. V. - Coeficientes de variação; S.-W.(W) - Shapiro-Wilk; p(normal) - probabilidade dos valores pertencerem a uma distribuição normal

Temp. - Temperatura °C; pH - potencial hidrogeniônico; Alca.- Alcalinidade (mg CaCO₃); Cloretos - (C₂Cl₂); O.D. - Oxigênio dissolvido (mgO₂/l); DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio (mgO₂/l); DQO - Demanda Química de Oxigênio (mgO₂/l); S.Sed. - Sólidos sedimentáveis (mg/l); S. T. Sólidos totais (mg/l); S. F. - Sólidos fixos (mg/l); S. V. - Sólidos voláteis (mg/l); S. Susp.- Sólidos suspensos (mg/l); S.S.F. - Sólidos suspensos fixos (mg/l); S.S.V. - Sólidos suspensos voláteis (mg/l); P - Fósforo (mg/l); O & G - Óleos e graxas (mg/l); Coli. Term.- Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)

Tabela 10 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do efluente da ETE 3 - Gravatá

	Temp	pH	Alca.	Cloretos	OD	DBO	DQO	S. Sed.	S. T.	S. F.	S. V.	S. Susp.	S.S. F.	S. S. V.	P	O & G	Coli.Totais
N	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	11	12	12	1.00E+01
Min	24	5.8	54	50	0.0	6.0	11	0.0	520	435	67	13	1.0	8.0	1.5	2.5	1.00E+02
Max	28	8.4	327	250	9.9	44	220	0.5	791	575	231	44	25	23	3.0	63.5	2.22E+05
Soma	234	86	2412	2000	53.6	222	1117	2.1	7601	5993	1608	284	105	179	30.5	264.2	4.74E+05
Méd.	26	7.17	201.00	166.67	4.47	18.50	93.08	0.18	633.42	499.42	134.00	25.82	9.55	16.27	2.54	22.02	4.74E+04
E. P.	0.41	0.18	22.76	17.77	0.94	3.34	16.92	0.04	23.68	13.88	14.99	2.84	2.19	1.62	0.11	5.36	2.22E+04
Var.	1.50	0.41	6214.91	3787.88	10.62	134.09	3434.99	0.02	6730.08	2312.27	2695.46	88.56	52.87	29.02	0.16	344.20	4.94E+09
D.P.	1.22	0.64	78.83	61.55	3.26	11.58	58.61	0.15	82.04	48.09	51.92	9.41	7.27	5.39	0.40	18.55	7.03E+04
Med.	26	7.15	205.5	175	4.15	15	73.5	0.1	650	501	126	26	8.0	18	2.5	18.75	1.18E+04
Q1 (25%)	25	6.93	152.50	112.50	1.50	10.00	58.50	0.10	552.25	453.75	92.75	18.00	2.00	11.00	2.50	7.53	1.88E+03
Q3 (75%)	27	7.40	260.50	200.00	7.60	24.75	125.00	0.28	673.50	542.00	152.75	32.00	14.00	21.00	2.88	31.08	7.44E+04
Assim.	0.0	-0.20	-0.39	-0.42	0.12	1.18	0.93	1.03	0.23	0.17	0.98	0.29	0.91	-0.14	-1.47	1.10	1.99E+00
Curt.	-0.29	1.90	-0.04	-0.45	-0.98	0.78	0.70	0.39	-0.20	-1.46	0.42	-0.13	0.71	-1.66	4.32	0.86	4.21E+00
M.G.	25.97	7.14	182.07	153.32	0.00	15.64	74.47	0.00	628.56	497.30	125.60	24.18	6.65	15.39	2.51	14.76	9.99E+03
C.V.	4.71	8.89	39.22	36.93	72.95	62.59	62.96	88.27	12.95	9.63	38.74	36.45	76.18	33.10	15.60	84.27	1.48E+02
S.-W.(W)	0.96	0.94	0.97	0.93	0.95	0.89	0.93	0.87	0.95	0.93	0.88	0.95	0.92	0.90	0.71	0.89	7.26E-01
p(normal)	0.83	0.49	0.94	0.39	0.69	0.10	0.42	0.07	0.58	0.39	0.10	0.70	0.30	0.21	0.001	0.13	1.81E-03

N- N° de amostras; Min-Valor mínimo; Máx. - Valor máximo; Soma - Soma geral; Méd. - média; E. P. - erro padrão; Var. - variância; D.P. - desvio padrão; Med.- mediana; Q1 - 1° quartil; Q3 - 3° quartil; Assim. Assimetria; Curt. - Curtose; M.G. - Média geométrica; C. V. - Coeficientes de variação; S.-W.(W) - Shapiro-Wilk; p(normal) - probabilidade dos valores pertencerem a uma distribuição normal

Temp. - Temperatura °C; pH - potencial hidrogeniônico; Alca.- Alcalinidade (mg CaCO₃); Cloretos - (C₂Cl₂); O.D. - Oxigênio dissolvido (mgO₂/l); DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio (mgO₂/l); DQO - Demanda Química de Oxigênio (mgO₂/l); S.Sed. - Sólidos sedimentáveis (mg/l); S. T. Sólidos totais (mg/l); S. F. - Sólidos fixos (mg/l); S. V. - Sólidos voláteis (mg/l); S. Susp.- Sólidos suspensos (mg/l); S.S.F. - Sólidos suspensos fixos (mg/l); S.S.V. - Sólidos suspensos voláteis (mg/l); P - Fósforo (mg/l); O & G - Óleos e graxas (mg/l); Coli. Term.- Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)

Tabela 11 - Distribuições estatísticas dos parâmetros físico-químicos e biológicos das ETEs e seus respectivos testes paramétricos e “p-valor”

Estação	Distribuição estatística	Parâmetros	Teste estatístico	p-(valor)	Hipótese
		Físico-químico e biológico			
ETE1 - Tacaimbó	Normal	Temperatura; Alcalinidade; Oxigênio Dissolvido; Sólidos Totais; Sólidos Fixos; Sólidos Voláteis	Shapiro – Wilk	p>0,05	Não rejeita H ₀
	Não normal	pH; Cloretos; Demanda Bioquímica de Oxigênio; Demanda Química de Oxigênio; Sólidos Sedimentáveis; Sólidos Suspensos; Sólidos Suspensos Fixos; Sólidos Suspensos Voláteis; Fósforo; Óleos & Graxas; Coliformes Totais	Mann-Whitney	P<0,05	Rejeita H ₀
ETE2 - Rendeiras	Normal	pH; Alcalinidade; Cloretos; Oxigênio Dissolvido; Demanda Química de Oxigênio; Sólidos Totais; Sólidos Fixos; Sólidos Voláteis; Sólidos Suspensos; Sólidos Suspensos Fixos; Sólidos Suspensos Voláteis; Fósforo; Óleos & Graxas;	Shapiro – Wilk	p>0,05	Não rejeita H ₀
	Não normal	Temperatura; Demanda Bioquímica de Oxigênio; Sólidos Sedimentáveis; Coliformes Totais	Mann-Whitney	P<0,05	Rejeita H ₀
ETE3 - Gravatá	Normal	Temperatura; pH; Alcalinidade; Cloretos; Oxigênio Dissolvido; Demanda Bioquímica de Oxigênio; Demanda Química de Oxigênio; Sólidos Sedimentáveis; Sólidos Totais; Sólidos Fixos; Sólidos Voláteis; Sólidos Suspensos; Sólidos Suspensos Fixos; Sólidos Suspensos Voláteis; Óleos & Graxas.	Shapiro – Wilk	p>0,05	Não rejeita H ₀
	Não normal	Fósforo; Coliformes Totais	Mann-Whitney	P<0,05	Rejeita H ₀

H₀ – hipótese nula na distribuição normal admite-se as médias dos valores de cada parâmetro das ETEs não se diferenciam, isto é, são iguais; H₀ – hipótese nula na distribuição não normal admite-se que as medianas dos valores de cada parâmetro das ETEs não se diferenciam, isto é, são iguais.

5.1.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial Hidrogeniônico (pH) é um dos parâmetros mais importantes e frequentemente usados para avaliar o efluente, devido ao fato de que todas as fases que envolvem o tratamento de águas residuais são dependentes do pH.

Segundo Von Sperling (2005), alterações no pH das águas superficiais podem ter origens naturais, ocasionadas pela dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica ou fotossíntese, ou ter origem antropogênica, dados por despejo de efluentes domésticos ou industriais. Santos (2020) explica que o excesso de matéria orgânica influencia na redução do valor de pH nas águas residuais devido à liberação de gás carbônico decorrente de compostos orgânicos ácidos e da decomposição, a qual origina ácido carbônico em meio aquoso.

Ao confrontar os resultados com os limites definidos na Resolução CONAMA nº 430/2011, constata-se que, em geral, os valores de pH das ETE1, ETE2 e ETE3 encontram-se em conformidade com o estabelecido pela Resolução, cujo limite situa-se entre 5 e 9. De acordo com Santos (2020) o rio Ipojuca apresenta em média, águas mais próximas da neutralidade.

Figura 9 - Valores de pH do efluente nas ETE2 e ETE3

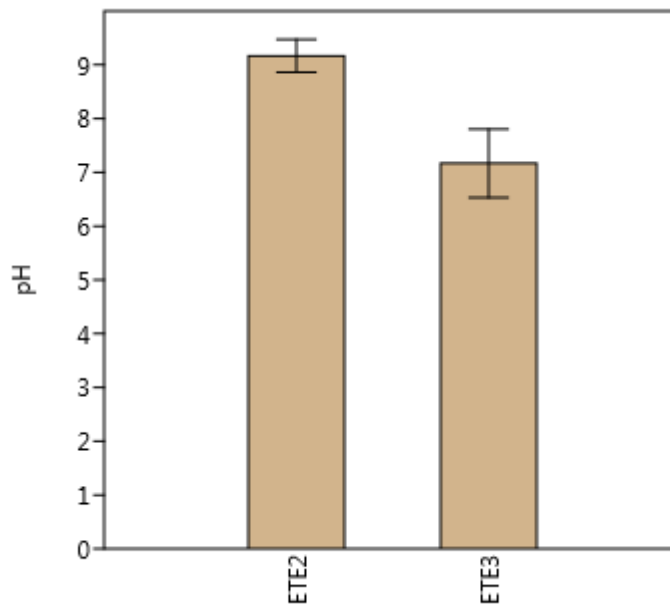
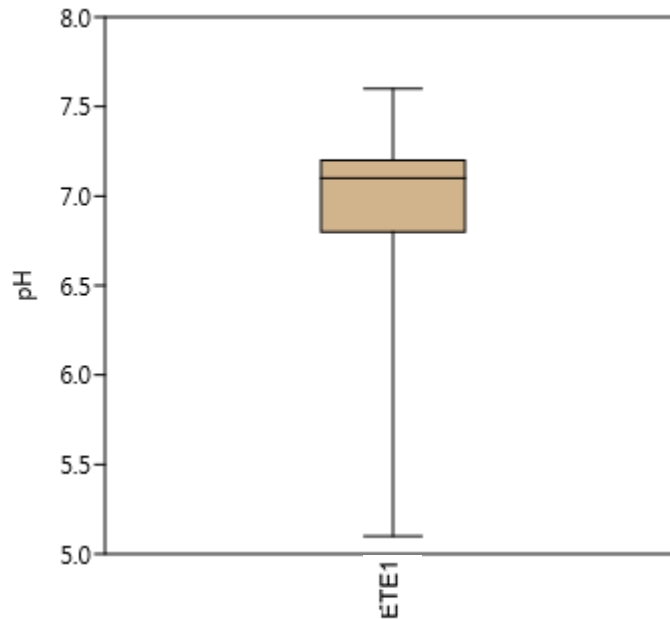


Figura 10 - Valores de pH do efluente na ETE1

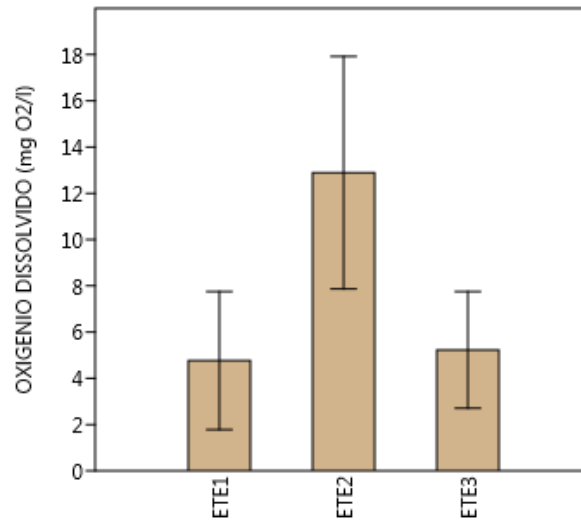


5.1.2 Oxigênio dissolvido (OD)

O oxigênio constitui-se em um dos principais parâmetros para a avaliação do meio líquido, pois é usado para determinar o impacto de poluentes sobre os corpos hídricos, além de ser fundamental para a manutenção da vida aquática. Assim, este é um importante fator no desenvolvimento de qualquer planejamento na gestão de recursos hídricos. O que determina as concentrações de OD nas águas superficiais são os processos de produção do oxigênio, associados à reaeração da atmosfera, à fotossíntese e por sua entrada em tributários e efluentes de forma forçada e os processos de consumo de oxigênio, como a respiração dos organismos aquáticos, oxidação da matéria orgânica e demanda bentônica (MENDES *et al*, 2021).

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que o valor de OD para as águas enquadradas na classe 3, seja não inferior a 4 mg/L. A Figura 11 mostra a concentração de OD nos efluentes das ETEs quando lançados no rio Ipojuca, respectivamente. Neste corpo receptor, onde se encontram as ETEs, durante o período amostral, os níveis de OD ficaram acima do limite mínimo exigido pela Resolução, para rio com enquadramento na Classe 3. Ou seja, atendem ao parâmetro estabelecido.

Figura 11 - Valores de Oxigênio Dissolvido nos efluentes das ETE1, ETE2 e ETE3



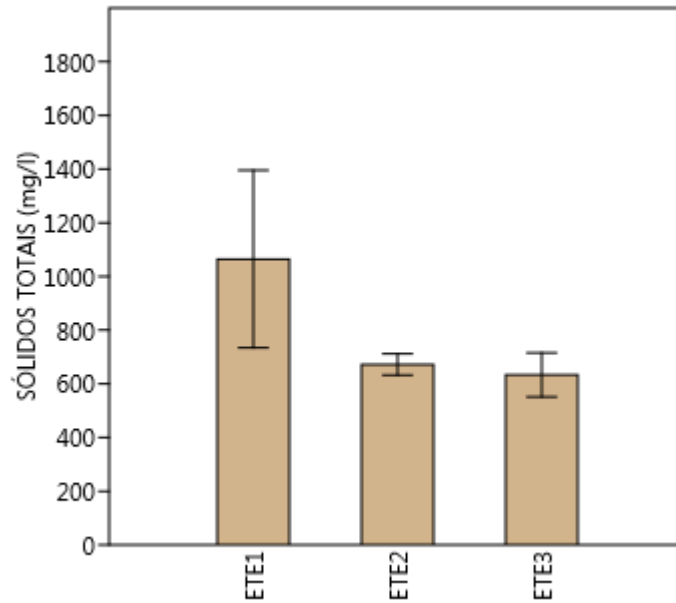
O oxigênio dissolvido é fundamental para os organismos aeróbios aquáticos e assim, é o principal parâmetro químico de caracterização dos efeitos da poluição das águas por matéria orgânica. A oxidação da matéria orgânica é dada pelo processo de respiração biológica das bactérias levando ao consumo do OD, ocasionando a redução da sua concentração no meio. Se o consumo do OD for muito elevado, poderá causar morte de diversos seres aquáticos, inclusive peixes; caso o consumo de OD seja total, o meio passa a ser anaeróbio (VON SPERLING, 2005).

5.1.3 Sólidos totais, fixos e voláteis

A carga de sólidos do meio líquido é constituída por todos os contaminantes, exceto os gases. Estes sólidos podem ser classificados quanto ao seu tamanho e estado, características químicas e decantabilidade. De acordo com as características químicas, os sólidos totais (ST) podem ser classificados em sólidos voláteis (SV) e fixos (SF). Os sólidos voláteis representam uma estimativa da matéria orgânica nos sólidos, já os sólidos fixos, representam a matéria inorgânica (VON SPERLING, 2005).

Além dos sólidos totais foram realizadas as análises dos sólidos fixos e voláteis, como uma forma de estimar a matéria orgânica e inorgânica presente nos efluentes das ETEs do estudo. A Resolução CONAMA nº 357/2005 não estabelece limites para os sólidos totais, fixos e voláteis, apenas para os sólidos dissolvidos totais, sendo este de até 500 mg/L para as classes de 1 a 4. O resultado das análises dos sólidos totais nas ETEs em estudo, encontram-se na Figura 12.

Figura 12 - Valores de Sólidos Totais nos efluentes das ETEs

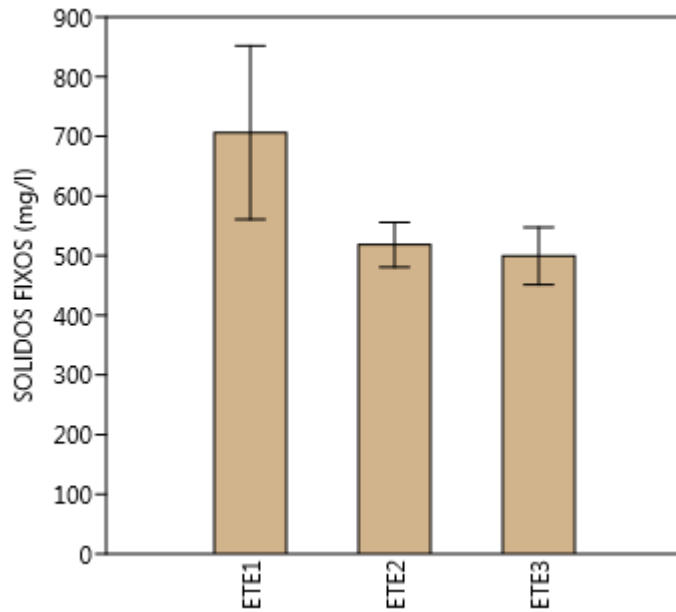


O comportamento dos sólidos totais na ETE1 apresentou valor médio de 1.064,00 mg/l, enquanto a ETE2 e a ETE3 apresentaram os valores de 672,0 mg/l e 633,0 mg/l, respectivamente. Admite-se que maiores concentrações de sólidos totais observadas na ETE1 se deva a lançamento de resíduos sólidos na zona urbana ou descarga de drenagem urbana nas redes coletoras de esgotamento sanitário, o que contribuiu bastante para o aumento dos sólidos totais.

Na Figura 13 pode ser observado os resultados das análises dos sólidos fixos nas ETEs em estudo. O comportamento dos sólidos fixos apresentou valores médios de 706,2 mg/l, 518,3 mg/l e 499,4 mg/l para as ETE1, ETE2 e ETE3, respectivamente. Maiores concentrações de sólidos fixos na ETE1 se deva a alguma degradação ambiental, tal como processos erosivos devido as chuvas nas áreas ainda não urbanizadas ou ambiente degradados na cidade, fazendo com que a maior parte de matéria inorgânica ou mineral possa ser carregada para as caixas de recepção ou poços de visita da rede de esgotamento sanitário de modo a causar maiores concentração dos sólidos fixos.

A ETE3 apresentou valores médios de sólidos fixos dentro o limite estabelecido, e a ETE2 valor médio ligeiramente próximo ao preconizado na legislação. Desta forma, pode-se analisar que o tratamento do efluente está sendo eficiente para a remoção da carga de poluentes sólidos e também pode-se inferir que a região apresenta meio ambiente natural mais preservado.

Figura 13 - Valores de Sólidos Fixos nos efluentes das ETEs



No tocante aos sólidos voláteis a ETE1 apresentou o valor médio de 358,3 mg/l, enquanto as ETE2 e ETE3 apresentaram valores médios de 153,4 mg/l e a 134,0 mg/l, respectivamente. Maiores concentrações de sólidos voláteis, como no caso da ETE1, se deve a formas de matéria orgânica oriunda do processo de tratamento existente na estação.

5.1.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) a quantidade de oxigênio dissolvido necessário para estabilizar (decompor) através de processos bioquímicos, a matéria orgânica em uma amostra. Assim, considera-se uma indicação indireta da quantidade de carbono biodegradável (VON SPERLING, 2005).

Os valores referentes as amostras de DBO nos pontos de disposição das ETEs no rio Ipojuca, são mostradas nas Figuras 14 e 15, respectivamente. As estações apresentaram os resultados da DBO bastante inferiores ao valor preconizado pela CONAMA nº 430/2011 e pelo CPRH, com valor máximo de 120 mgO₂/L. As ETE1, ETE2 e ETE3 apresentaram médias de 80 mgO₂/L, 19 mgO₂/L e 5,2 mgO₂/L, respectivamente. Assim, concluímos que os sistemas estão operando satisfatoriamente na remoção de matéria orgânica. No caso da ETE1 o valor da DBO se apresenta com maior variabilidade, podendo apresentar ~~em~~ valores superiores aos de referência (CONAMA e CPRH). Isso se deve, possivelmente, a que em algum período das coletas os sistemas de tratamento tenham operado com menor eficiência, permitindo que o efluente em seu despejo ainda tivesse conteúdo de matéria orgânica, permitindo tamanha

variabilidade.

Figura 14 - Valor de DBO no efluente da ETE3

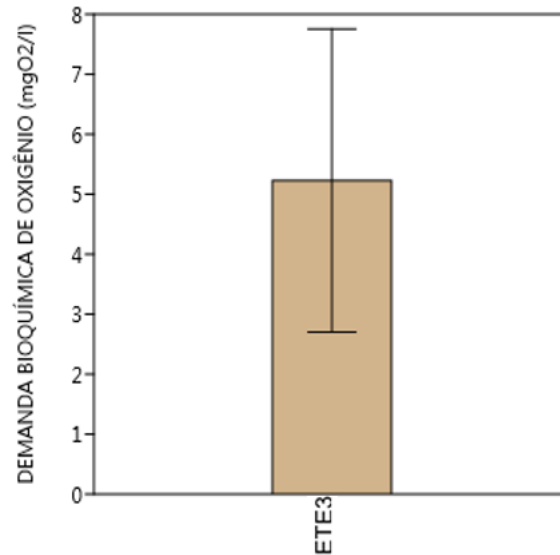
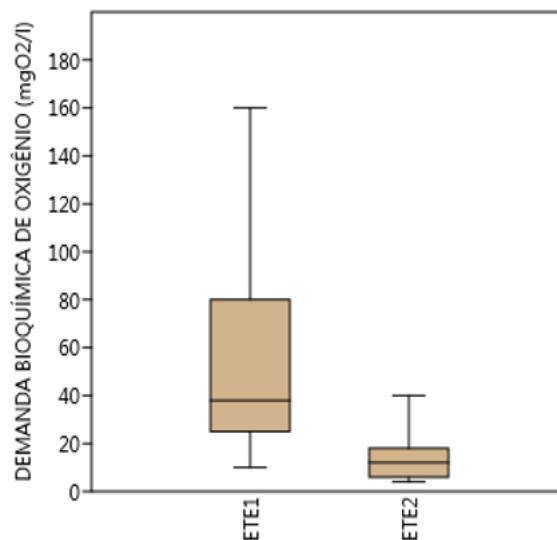


Figura 15 - Valores de DBO nos efluentes das ETE1 e ETE2



5.1.5 Fósforo Total

A qualidade da água nos corpos receptores é amplamente prejudicada pela alta carga de fósforo, indicando normalmente processos de eutrofização. O fósforo é nutriente essencial para o crescimento de microrganismos responsáveis pela estabilização de matéria orgânica. Esgotos domésticos, usualmente pode conter carga excessiva desse nutriente (VON SPERLING, 2005).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, a concentração máxima de fósforo total para lançamento em rios classe 3 é de 0,15 mg/L, para ambientes lóticos. Nas Figuras 16

e 17, encontram-se as concentrações de fósforo nas ETE1, ETE2 e ETE3 ao longo do rio Ipojuca.

Figura 16 - Valores de Fósforo Total na ETE2

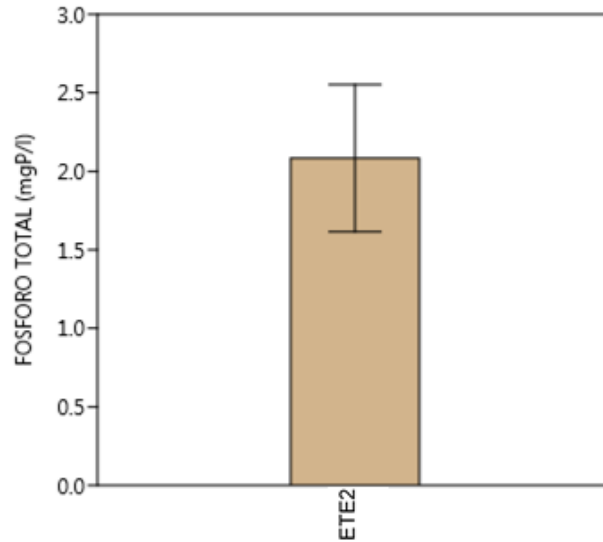
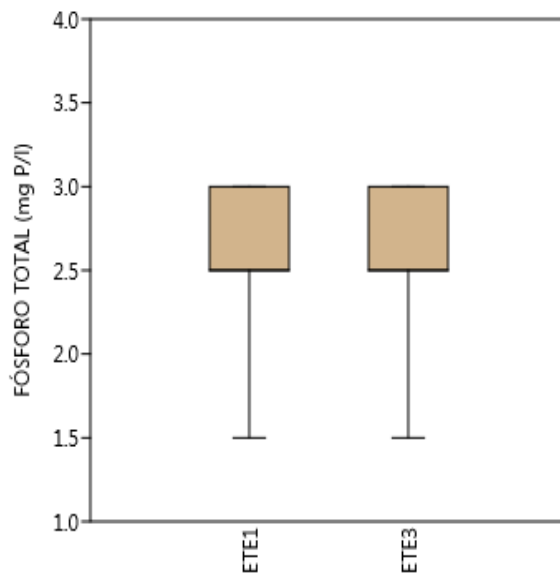


Figura 17 - Valores de Fósforo Total nas ETE1 e ETE3



Os valores de fósforo nas ETE1, ETE2 e ETE3 estão acima do valor preconizado pela Resolução CONAMA nº 357/2005 o que mostra a presença desse elemento no efluente, a matéria orgânica fecal e os detergentes em pó de uso doméstico, constituem as principais fontes de fósforo. Isto constitui um aspecto importante e que deve ser considerado em relação as etapas do sistema de tratamento de cada uma das ETEs, indicando a necessidade de uma etapa de tratamento terciário para reduzir a concentração deste nutriente nos esgotos sanitários.

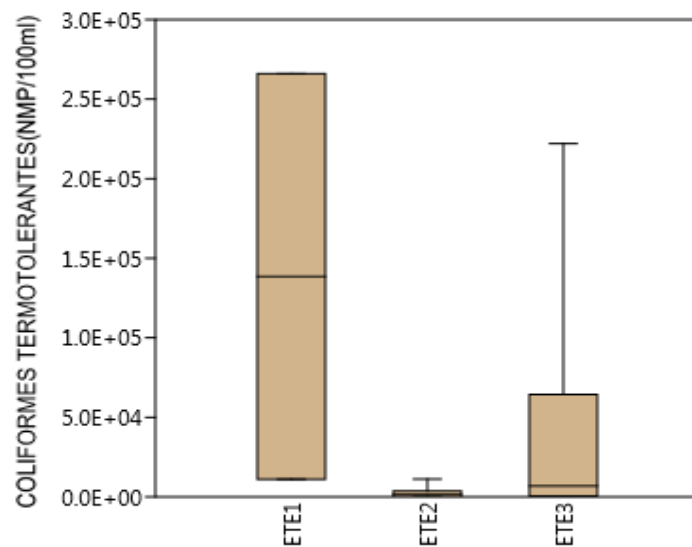
5.1.6 Coliformes Totais

A contaminação da água por fezes humanas ou animais, indicam sua potencialidade de transmitir doenças e pode ser determinada de forma indireta, através dos organismos indicadores de contaminação fecal, pertencentes principalmente ao grupo de coliformes (VON SPERLING, 2005).

Os coliformes totais são um grande grupo de bactérias presentes em fezes de seres humanos e animais que podem ser encontradas em amostras de água e solos, sejam poluídos ou não (VON SPERLING, 2005).

De acordo com o limite máximo de coliformes totais proposto pela norma técnica CPRH nº 2007 (20000 NMP/100 mL), para rios classe 3, as ETEs apresentaram concentrações de coliformes totais acima do limite preconizado por essa Resolução e os parâmetros de padrão de efluentes da CPRH, atingindo valores máximos de $2,5 \cdot 10^5$ NMP/100 mL na ETE1, $1,10 \cdot 10^4$ NMP/100 mL na ETE2 e $2,2 \cdot 10^5$ NMP/100 mL na ETE3. Na Figura 18 encontram-se os valores de coliformes totais nas ETEs.

Figura 18 - Valores de Coliformes Totais nas ETE1, ETE2 e ETE3



Ainda nessas mesmas estações os valores médios de coliformes totais nos doze meses de coletas foram de $4,1 \cdot 10^4$ NMP/100 mL na ETE1, $2,3 \cdot 10^3$ NMP/100 mL na ETE2 e $4,7 \cdot 10^4$ NMP/100 mL na ETE3. Desses valores, a média registrada pela ETE2 ($2,3 \cdot 10^3$ NMP/100 mL) é a que se apresenta inferior ao valor preconizado nas resoluções ($4,0 \cdot 10^3$ NMP/100 mL).

5.2 Análise estatística multivariada dos parâmetros de qualidade do efluente das ETEs

Na Análise Fatorial (AF) e na Análise dos Componentes Principais (ACP) são necessárias algumas etapas para a obtenção e interpretação dos resultados. Primeiramente, se faz necessária a preparação da matriz de correlação das variáveis em análise; em sequência, procede-se a extração dos fatores comuns e a possível redução de variáveis explicativas e, por último, a rotação dos eixos relativos aos fatores comuns, com o objetivo de tornar os resultados mais fáceis de serem interpretados (TOLEDO e NICOLELLA, 2002).

A análise fatorial se procedeu através da transformação da matriz de correlação por meio de estimação em uma matriz fatorial contendo cargas fatoriais para cada variável, em cada fator (ou componente) obtido. Então, as cargas de cada variável nos fatores foram interpretadas para identificar a estrutura latente das variáveis (HAIR *et al.*, 2009).

O que chancela para a realização da AF é a aplicação do teste KMO e o teste de Bertellet. Os testes KMO e de esfericidade de Bartlett, aplicados à matriz de dados, demonstraram que existem correlações suficientes que permitem a continuidade da aplicação da AF/ACP nas variáveis estudadas nas referidas ETEs.

Com a análise dos componentes principais foi possível obter a redução dos dados multivariados e a detecção de estrutura na relação entre os dados, transformando-os em um novo conjunto de variáveis, as componentes principais, que resultam de uma combinação linear das variáveis originais. Nessa análise, foram utilizados todos os parâmetros de qualidade do efluente das estações ETE1 (Tacaimbó), ETE2 (Rendeiras) e ETE3 (Gravatá), a fim de determinar as características de maior participação no comportamento das variáveis quando atuam conjuntamente nos respectivos despejos no corpo receptor (rio Ipojuca).

Devido as variáveis em estudo possuírem valores com diferentes escalas se fez necessário padronizar as variáveis, de modo que as mesmas passem a ter média 0 e variância constante igual a 1.

Ainda não há um critério consensual com relação à quantidade de componentes que devem ser extraídas ou retidas na ACP (FIGUEIREDO e SILVA, 2010). No entanto, de acordo com Hair *et al.* (2009), a técnica mais comumente usada é o critério da raiz latente, que, segundo esse critério, todos os fatores que possuem autovalores (ou raízes latentes) maiores que 1 são considerados significantes, o que inclui na análise aquelas componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada de 70%.

Na interpretação dos fatores foi necessário tomar decisão sobre quais cargas fatoriais apresentam significância. Foram consideradas significativas as cargas que excedem $\pm 0,70$, que

são consideradas indicativas de estruturas bem definidas, estando fortemente associadas a um componente. Cargas fatoriais de $\pm 0,50$ ou maiores foram consideradas como razoavelmente associadas a um componente, e cargas na faixa de $\pm 0,30$ a $\pm 0,40$ foram consideradas como atendendo o nível mínimo para interpretação da estrutura (HAIR *et al.*, 2009).

Quando da existência nos resultados do acúmulo de variáveis em um mesmo fator nas matrizes fatoriais, se fez necessária a utilização do método de rotação *varimax*, com o objetivo de obter uma matriz de mais fácil compreensão (BRITTO *et al.*, 2020; KALE *et al.*, 2020).

A aplicação dos testes de Esfericidade de Bartlett (p -valor $<0,05$) e KMO (coeficiente de 0,74) demonstraram que o tamanho da amostra do conjunto de dados de qualidade da água foi adequado para ACP.

A Tabela 12 apresenta a matriz dos resultados dos autovalores para extração de componentes da matriz de correlação dos dados de qualidade dos efluentes referentes as ETEs estudadas. De acordo com o critério da raiz latente, as três primeiras componentes explicam 72,29% da variância total dos dados.

Tabela 12 - Autovalores e percentual da variância explicada de cada componente

Componentes	Autovalores	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
1	8.44	49.67	8.44	49.67
2	2.45	14.40	10.89	64.08
3	1.40	8.21	12.29	72.29
4	1.36	8.02	13.65	80.31
5	1.00	5.90	14.66	86.21
6	0.58	3.43	15.24	89.64
7	0.54	3.20	15.78	92.83
8	0.44	2.59	16.22	95.42
9	0.27	1.62	16.50	97.04
10	0.19	1.09	16.68	98.13
11	0.14	0.83	16.82	98.95
12	0.08	0.48	16.90	99.43
13	0.05	0.32	16.96	99.76

A Tabela 13 apresenta a matriz fatorial da análise de componentes, expressando a relação entre fatores e variáveis, permitindo a identificação das variáveis com maiores inter-relações em cada componente.

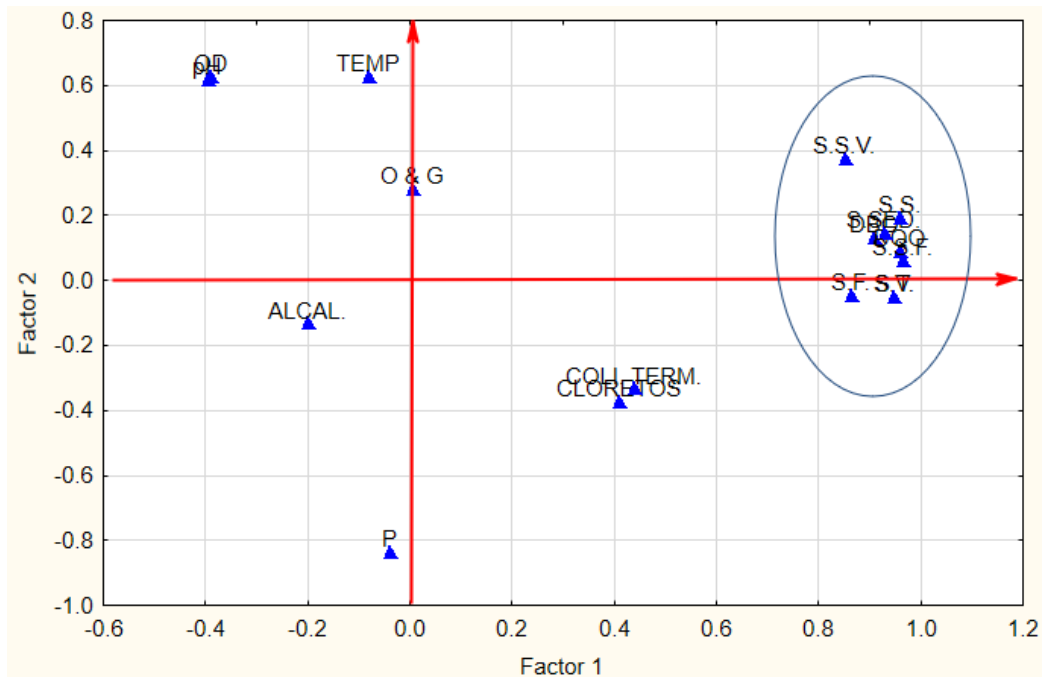
Tabela 13 - Matriz fatorial da ACP dos dados de qualidade dos efluentes das ETEs

Variáveis	COMPONENTES PRINCIPAIS		
	CP1	CP2	CP3
TEMP	-0.081	0.625	0.116
pH	-0.396	0.619	0.275
ALCAL.	-0.200	-0.132	0.823
CLORETOS	0.409	-0.372	0.138
OD	-0.388	0.628	-0.162
DBO	0.908	0.132	0.130
DQO	0.960	0.092	0.130
S.SED.	0.929	0.145	0.064
S.T.	0.949	-0.049	-0.159
S.F.	0.863	-0.044	-0.209
S.V.	0.947	-0.049	-0.106
S.S.	0.959	0.194	0.041
S.S.F.	0.966	0.063	0.037
S.S.V.	0.852	0.374	0.044
P	-0.039	-0.836	-0.242
O & G	0.005	0.280	-0.495
COLI. TOTAIS	0.439	-0.333	0.397
Autovalor	8.44	2.45	1.40
Variância (%)	49.67	14.40	8.21
Variância acum. (%)	49.67	64.08	72.29

Observa-se na Tabela 13 que não existem cargas cruzadas ou acúmulo de cargas em apenas uma componente, portanto, optou-se por não realizar a rotação *varimax*. A CP1 explica 49,67% da variância total dos dados e é representada fortemente pela componente de sólidos (S. Sed.; ST; S.F.; S.V.; S.S.; S.S.F.; S.S.V.) e de demanda bioquímica (DBO) e química (DQO) de oxigênio. A CP2, explica 14,40% dos dados e está fortemente relacionada ao aporte de matéria orgânica (P). A CP3 explica 8,21% da variância total dos dados, sendo relacionada com a alcalinidade.

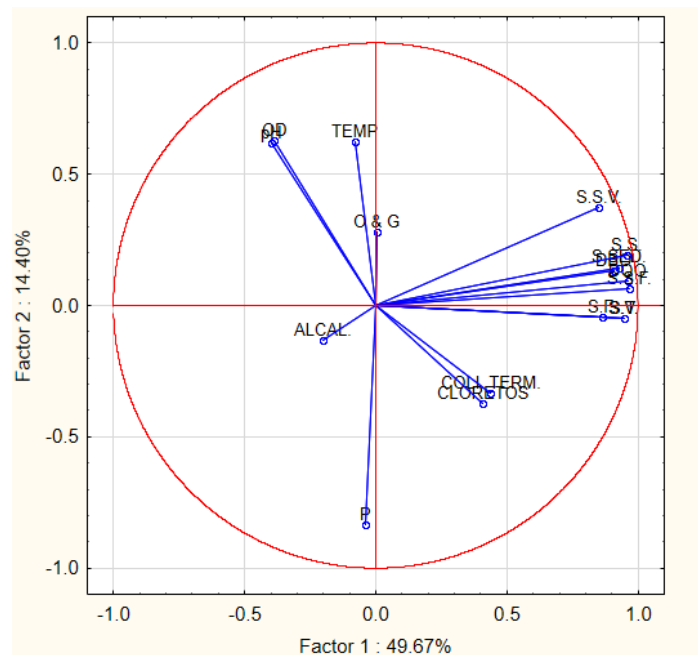
A Figura 19 corresponde a relação entre as variáveis, que formam grupos agrupados por fatores. As variáveis que melhor representam a classe formada pelos grupos sólidos, DBO e DQO, estão localizadas distantes da origem, sendo estas que possuem uma maior representatividade em relação a classe matéria orgânica (P). As demais variáveis possuem baixa representatividade, devido ao fato de estarem próximas da origem, em relação aos dois eixos.

Figura 19 - Gráfico representando a relação entre fatores 1 e 2 e variáveis



Na Figura 20 mostra o círculo de correlação unitário, com a nuvem de pontos de variáveis com representação bidimensional na análise ACP dos parâmetros de qualidade dos efluentes das estações ETE1, ETE2 e ETE3.

Figura 20 - Representação bidimensional das variáveis na análise



Como pode-se observar, na Figura 20, algumas variáveis estão sobrepostas umas às outras. Isso mostra que essas variáveis, possuem a mesma representatividade no gráfico, sendo

principalmente, aquelas relacionadas com sólidos e demanda bioquímica e química da qualidade dos efluentes.

Essa carga de sólidos pode estar relacionada, possivelmente, ao escoamento superficial, depósito de resíduos sólidos na bacia de esgotamento sanitário, e ao processo natural de intemperismo dos componentes geológicos do solo (ANDRADE *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2008).

Na Figura 20, pode-se observar que as variáveis apresentaram comportamentos diferenciados em relação aos componentes principais. As variáveis em relação ao Fator1 e ao Fator2 que foram responsáveis pela maior dispersão dos resultados para os parâmetros de qualidade dos efluentes analisados, são aquelas relacionadas com poluição hídrica. No gráfico percebe-se que a ETE Tacaimbó contribuiu com a maior parte dos componentes principais PC1 (DBO; DQO, S.SED.; S.T.; S.F.; S.V.; S.S.; S.S.F. e S.S.V.) mostrando que no período analisado a estação não esteve operando de forma satisfatória. Na ETE Rendeiras, o gráfico mostra que houve alta concentração de OD e de pH e que houve baixa concentração daqueles componentes apresentados na ETE Tacaimbó porque encontram-se opostos nos seus respectivos quadrantes. A ETE Gravatá, de acordo com o gráfico, mostra que esta estação apresentou valores de coeficientes negativos para o fósforo (P), componente de poluição orgânica, e para Alcalinidade. Ainda, apresentou baixa concentração de OD, pH, O & G por estarem de forma opostas em seus quadrantes. No entanto, não apresentou componentes de poluição hídrica durante o período de análise dos dados, caracterizando que entre as três estações a que melhor contribuiu para as variáveis dos parâmetros de qualidade do efluente.

6 CONCLUSÕES

Com as análises estatísticas de qualidade dos efluentes das ETEs Tacaimbó, Rendeiras e Gravatá, foi possível analisar os parâmetros de qualidade e realizar algumas conclusões.

Pela análise da estatística descritiva, o parâmetro pH, somente a ETE Tacaimbó apresentou valores médios dentro do padrão definido pela Resolução CONAMA 430/2011. Ressalta-se que este parâmetro pode ser influenciado por ações antropogênicas, considerando que o município tem como principal atividade econômica, a agricultura.

Ainda pela estatística descritiva, observou-se que o oxigênio dissolvido foi um parâmetro no qual todas as ETEs ultrapassaram o limite mínimo previsto na legislação, o que caracteriza efluente com qualidade adequada, com pouca probabilidade de eutrofização.

Quanto aos sólidos totais, as ETE1 e ETE2 apresentaram valores acima dos limites definidos na legislação. Tal fato pode ser associado a entrada de sedimentos provenientes da drenagem urbana que são inseridos na rede de esgoto, apesar de o Estado de Pernambuco permitir somente a implantação de sistemas separadores absolutos. Quando tratamos de sólidos voláteis, as altas concentrações se explicam pela matéria orgânica proveniente do processo de tratamento do efluente instalado na estação. Quanto aos sólidos fixos, a ETE Tacaimbó apresentou maiores concentrações, explicada pela degradação ambiental da região, como processos erosivos em áreas não urbanizadas ou até urbanizadas nas quais as águas pluviais podem carrear os sedimentos para os poços de visita e caixas de reunião da rede de esgotos do município. A ETE3 (Gravatá) apresentou valor médio dentro do preconizado na legislação, demonstrando eficiência na remoção pelo tratamento e também preservação ambiental adequada.

Tratando da DBO, ainda pela análise descritiva, percebemos que todas as ETEs operaram de forma satisfatória no período estudado, apresentando valores inferiores ao preconizado na legislação. A ETE Tacaimbó apresentou grandes variações, possivelmente, em alguns períodos esta ETE operou com menor eficiência, permitindo que o efluente ainda tivesse conteúdo de matéria orgânica, em determinadas épocas do ano.

A concentração de fósforo em valores acima do que preconiza a Resolução CONAMA nº 430/2011 para as ETEs estudadas, apresentam a necessidade de adequações nos processos de tratamento, como prologar a aeração dos lodos ativados ou incluir uma etapa de coagulação química, para que o efluente possa atingir o grau de qualidade requerido pela legislação.

Ainda, pela estatística descritiva, pode-se verificar que os efluentes estudados apresentaram altas concentrações de coliformes totais, representando a poluição do meio e

fazendo-se necessário adequar a etapa de desinfecção seja através da concentração de cloro ou radiação ou pelo tempo de exposição a estes agentes desinfetantes.

Pela análise da estatística descritiva dos parâmetros de qualidade dos efluentes, conclui-se de forma geral, as ETEs estudadas, atendem aos requisitos definidos pelos órgãos ambientais, notadamente no quesito de remoção de matéria orgânica. Assim as tecnologias de tratamento adotadas são adequadas à região. Quanto a remoção de sólidos a ETE Tacaimbó apresenta certa variação, que não necessariamente está relacionada a deficiência no tratamento, mas pode se relacionar a áreas de degradação ambiental na região.

Em paralelo pode-se também sugerir ações de recuperação ambiental de áreas dos municípios, afim de minimizar os processos erosivos que podem influenciar na qualidade do efluente, bem como ações de educação e fiscalização para inibir ligações clandestinas na rede de esgoto. Em tempo, deve-se observar a necessidade de melhoria no processo de remoção de nutrientes como o fósforo.

Corroborando com a análise da estatística descritiva, através da estatística multivariada, foi possível concluir que os parâmetros relativos aos sólidos (sedimentáveis, totais, fixos e voláteis), DBO e DQO são responsáveis por 49,67% da variância total dos dados, representando a componente principal 1 (CP1). A variância pode ser explicada também por falha nos procedimentos de coleta, armazenamento e transporte das amostras. As análises de DBO e DQO, principalmente, exigem que a coleta, armazenamento (refrigeração) da amostra e o tempo para realização da análise seja criteriosamente seguido. Procedimentos inadequados, podem influenciar fortemente os resultados das análises.

A componente principal 2 (CP2), explica 14,40% da variância dos dados e está fortemente relacionada ao aporte de matéria orgânica, no caso o fósforo. Mais uma vez relacionando os resultados a poluição do meio líquido. Já a componente principal 3 (CP3) explica que 8,21% da variância total dos dados, está relacionada com a alcalinidade.

Podemos concluir que a maior variação dos dados, estão relacionadas aos parâmetros que representam a poluição (matéria orgânica). Estes são os parâmetros mais importantes para identificação de poluição ambiental e portanto aqueles que a Companhia destaca em seu controle. A variância pode tanto representar falhas nos procedimentos de coleta e armazenagem, ou operação ineficiente em determinados períodos do ano.

A ETE Gravatá foi a que apresentou melhores resultados na remoção de matéria orgânica, sólidos inorgânicos e nutrientes.

Períodos de operação dos sistemas como menor eficiência não significa, necessariamente, que o sistema não atende aos requisitos ou não foi projetado adequadamente

para a demanda. Fatores externos como intrusão de drenagem urbana no sistema de esgotamento sanitário, degradação ambiental, intensidade de chuvas e ligações clandestinas, podem alterar a composição do efluente fazendo que o sistema projetado não seja eficiente no tratamento.

REFERÊNCIAS

AFONSO, M.S.; NADALETI, W.C.; ANDREAZZA, R.; QUADRO, M.S.; LEANDRO, D.; CORRÊA, L.B. **Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB): características e funcionalidade**. XXV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Disponível em: https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2016/EN_01769.pdf. Acesso em 03 ago 2023.

Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas – Condepe/Fidem. **Rio Ipojuca: Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco**, 1. Recife: Condepe/Fidem, 2005. 64p.

Agência Estadual de Meio Ambiente – CPRH. **Relatório de monitoramento de bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco – 2016**. Recife, 2017. 106p.

Agência Estadual de Meio Ambiente – CPRH. **Norma Técnica 2002: Controle de Carga Orgânica não industrial**. Aprovada na 215ª Reunião do Conselho de Administração da CPRH, em 21/02/00. Recife, 2000. Disponível em <http://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/normas-cprh-2002.pdf>. Acesso em 13 dez 21.

Agência Estadual de Meio Ambiente – CPRH. **Norma Técnica 2007: Coliformes fecais – Padrão de lançamento para efluentes domésticos e/ou industriais**. Aprovada na 224ª Reunião do Conselho de Administração da CPRH, em 07/08/01. Recife, 2001. Disponível em http://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/coliformes_fecais_padrao.pdf. Acesso em 13 dez 21.

Agência Nacional de Águas – ANA. **Atlas Esgotos: Despolição das Bacias Hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. Acesso em 28 ago 2018.

Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC. **Bacia do Rio Ipojuca**. Disponível em: <http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/196-bacia-do-rio-ipojuca>. Acesso em 24 mai 23.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation – APHA/AWWA/WEF. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 23th ed. Washington: American Public Health Association, 2017. 1545 p.

ANDRADE, E. M. D.; ARAÚJO, L. D. F.; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. **Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada**. Engenharia agrícola, v. 27, n. 3, p. 683-690, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/tF5D7Q4vqZRwh8NQnkbmLyn/>. Acesso em 15 jun 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.** Rio de Janeiro, p. 53. 2011.

Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID. **Projeto de Saneamento Ambiental da bacia do rio Ipojuca: Informe de Gestão Ambiental e Social.** Recife, 2012.

BENEDET, Y.W.; SUZUKI, P.I.F.; SILVA, S.C.; MENDES, M.P.; CORRÊA, G.G.P. **Avaliação da utilização de ferrato de sódio (VI) na desinfecção de efluente sanitário tratado.** In: Anais 30º Encontro Técnico AESABESP. São Paulo: 2019. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2019/11/ferrato-sodio-desinfeccao-efluente-tratado.pdf>. Acesso em 31 jan 2023.

BEZERRA, K.M. **Caracterização do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário da região metropolitana de Fortaleza visando sua utilização na agricultura.** (dissertação) Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11376/1/2014_dis_kmbezerra.pdf. Acesso em 01 fev 2023.

BRITTO, F. B.; VASCO, A. N.; MORAIS, G. F. O.; NETTO, A. O. A. **Técnicas estatísticas para análise da qualidade da água em áreas irrigadas no baixo Rio São Francisco.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 11, n. 2, p. 192- 203, 2020. Disponível em: <https://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.002.0021/1946>. Acesso em 15 jun 2023.

CÂMARA FILHO, J.A. **Um guia prático para apoiar tarefas preditivas em ciência de dados.** (dissertação) Programa de Mestrado e Doutorado em Ciência da Computação da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/71031/3/2022_dis_jacamarafilho.pdf. Acesso em 11 jun 2023.

CHERNICHARO, C.A.L.; FLORÊNCIO, L.; BASTOS, R.K.X.; PIVELI, R.P.; VON SPERLING, M.; MONTEGGIA, L.O. Tratamento de Esgotos e Produção de Efluentes adequados a diversas modalidades de reúso da água. 2006. In: **Tratamento e utilização de esgotos sanitários.** FLORÊNCIO, L.; BASTOS, R.K.X.; AISSE, M.M. [coord]. PROSAB. Recife: ABES, 2006. 427 p.

CHIAVELLI, H.G.R.; TORRECILHAS, A.R.; SELLA, M.R.; CARDOSO, M.A.P.; MARTIN, D.R. **Etapas de um sistema de tratamento de efluente e processos convencionais de tratamento: uma revisão de literatura.** In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa: PR, 2019. Disponível em:

http://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/10212019_141019_5dade9ffd8fb0.pdf. Acesso em 18 jul 2023.

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

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

CORNELLI, R.; AMARAL, F.G.; DANILEVICZ, A.M.F.; GUIMARÃES, L.B.M. **Métodos de Tratamento de Esgotos Domésticos: Uma Revisão Sistemática**. REA: Revista de Estudos Ambientais, Rio Grande do Sul, v. 16, n. 2, p.20-36, dez. 2014. Semestral. Disponível em: <http://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/4423/3007>. Acesso em: 20 mar. 2023.

DAMÁSIO, B.F. **Análise Fatorial Exploratória: o que é, para que serve e os principais procedimentos**. Artigo publicado em 24/03/2023. Disponível em: <https://psicometriaonline.com.br/analise-fatorial-exploratoria-o-que-e-para-que-serve-e-como-e-realizada/>. Acesso em 20 jun 2023.

DEUS, R.A.S.G.; COSTA, S.O.S; LOURENÇO, E.R.C.; GOLDFARB, M.C.; DUARTE, C.C.; GOMES, D.D.M. **Análise das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE**. Revista de Geociências do Nordeste, Vol.2, N. Especial, outubro 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320234426_Analise_das_caracteristicas_morfometricas_da_bacia_hidrografica_do_rio_Ipojuca-PE. Acesso em 16 jun 2023.

DOS SANTOS, A.B.; CHERNICHARO, C.A.L.; LAPOLLI, F.R.; VON SPERLING, M.; KATO, M.T.; PIVELI, R.P.; RIBEIRO, T.B. **Tecnologias de tratamento de correntes de esgotos não segregados aplicadas a empreendimentos habitacionais**. In: DOS SANTOS, A.B. [coord]. Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais. Fortaleza: Imprece, 2019. Cap. 4, 219-391.

FARIAS, F.S. **O balanço de massa das unidades componentes de uma estação de tratamento de esgoto e a utilização da estatística multivariada como ferramenta de verificação do comportamento físico, químico, bacteriológico e de metais no esgoto bruto e tratado. Estudo de caso: Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico – ETE Sideral – Belém – PA**. (dissertação) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. Belém, 2013. Disponível em:

https://www.repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/7914/1/Dissertacao_BalancoMassaUnidades.pdf. Acesso em 25 mai 2023.

FERNANDES, C.N.; CAVALCANTE, F.L.; BATISTA, R.O. [orgs] **Desinfecção solar de efluentes sanitários**. Natal: IFRN, 2019.

FIELD, A. **Descobrimo a Estatística usando o SPSS**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

FIELD, A.; MILES, J.; FIELD, Z. **Discovering statistics using R**. Sage Publications, 2012. 992 p.

FIGUEIREDO, D. B.; SILVA, J. A. **Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial**. Opinião Pública, Campinas, v. 16, n. 1, p. 160-185, jun. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/op/a/bGsWsRVKbC55hFcpxYryjCL/?lang=pt>. Acesso em 26 mai 2023.

GUEDES, H.A.S.; SILVA, D.D.; ELESBON, A.A.A.; RIBEIRO, C.B.M.; MATOS, A.T.; SOARES, J.H.P. **Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 16 (5), Maio 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/pYzDPFQQTmNyZbnJ7GFHKd/abstract/?lang=pt>. Acesso em 29 mai 2023.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia**. Porto Alegre: ARTMED, 2011. 527 p.

HAANDEL, A. C. V.; GUIMARÃES, P.; MELO, H.N.S.; CAVALCANTI, P.F.F. **Anaerobic-aerobic sewage treatment using the combination UASB- SBR activated sludge**. Journal of Environmental Science and Health Part A - Environmental Science and Engineering & Toxic and Hazardous Substance Control, Washington, v. 38, n.11, p. 2633-2642, 2003.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HONGYU, K. **Análise Fatorial Exploratória: resumo teórico, aplicação e interpretação**. E&S - Engineering and Science, Volume 4, Edição 7 (2018) p. 88-103.

JEBUR S. U.; KHUDAIR, B. H. **Effluent quality assessment of sewage treatment plant using principal component analysis and cluster analysis**. Journal of Engineering Number 4

Volume 27 April 2021. Disponível em

<https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/j.eng.2021.04.07>. Acesso em 26 mai 2023.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6ª edição. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 969 p.

KALE, A.; BANDELA, N.; KULKARNI, J.; RAUT, K. **Factor analysis and spatial distribution of water quality parameters of Aurangabad District, India**. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 10, p. 100345, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352801X19303273>. Acesso em 15 jun 2023.

LOBÃO, J.R.S.; AQUINO, M.D.; SOUZA, R.O.; MOREIRA, R.T.; SILVA FILHO, F.C. **Estudo operacional comparativo em diferentes concepções de ETEs em Fortaleza**. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. Vol. 6, No. 2, 12 – 25, 2013. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/41073>. Acesso em 18 jul 2023.

MENDES, T.A.; ALVES, F.C.R.; FERREIRA, D.; MENDES, D.; CUBA, R.M.F. **Avaliação de diferentes técnicas de medição do oxigênio dissolvido para o saneamento básico**. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*. v.10, n.1, Jan.-Abr. 2021. p. 406-426. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/7d43/896dc0720f59fd775014a45a37ed8bdb64f6.pdf>. Acesso em 12 jun 2023.

METCALF, L.; EDDY, H.P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5ª Edição. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2016. 2008 p.

MOITA NETO, J.M.; MOITA, G.C. **Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados**. *Revista Química Nova*, Vol. 21, No. 4, 467-469, 1988. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/b64d96fbT5jMHmnc48SdXnr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 20 jun 2023.

MORAIS, D.A.M. **Uma aplicação de vlogs nas aulas de estatísticas na educação básica**. (dissertação) Programa de Pós-graduação em Matemática da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3047/1/LD_PPGMAT_M_Morais%2c%20Daiane%20Aparecida%20Miliossi_2017.pdf. Acesso em 11 jun 2023.

MOREIRA, A. V. S.; SILVA, V. E. P. S. G.; COSTA, A. G.; BUARQUE, H. L. B. **Avaliação técnica e econômica de agentes químicos para desinfecção de efluentes**

domésticos: ozônio e peróxido de hidrogênio. In: VII Seminário de iniciação científica e tecnológica. IFCE: Fortaleza, 2019. Disponível em: https://prpi.ifce.edu.br/nl/_lib/file/doc5571-Trabalho/SEMIC2019-PIBITI.pdf. Acesso em 31 jan 2023.

MOTA, F.S.B. **Introdução à Engenharia Ambiental.** 4ª Edição. 388 p. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

NASCIMENTO, C.A.O.; GUARDANI, R. **Análise estatística multivariada aplicada a processos químicos. Parte 6: análise de grupamentos.** USP: São Paulo, 2007. Apostila de disciplina. Disponível em: <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/geobras/article/download/10434/9859>. Acesso em 18 jul 2023.

NOGUEIRA, V.F.N., NOGUEIRA, V.S., CORREIA, M.F., BRAGA, C.C. **Variabilidade espaço-temporal da razão de mistura para estações do Estado do Maranhão através da análise multivariada.** Revista Brasileira de Geografia Física, vol.07, n.05 (Número Especial-VIWMCRHPE), (2014) 978-989. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/233412/27138>. Acesso em 20 jun 2023.

NONATO, E.A.; VIOLA, Z.G.G.; ALMEIDA, K.C.B.; SCHOR, H.H.R. **Tratamento estatístico dos parâmetros de qualidade das águas da bacia do alto curso do Rio das Velhas.** Revista Química Nova, Vol. 30, No. 4, 797-804, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228707408_Tratamento_estatistico_dos_parametros_da_qualidade_das_aguas_da_bacia_do_alto_curso_do_Rio_das_Velhas/link/0c960519a618bbc525000000/download. Acesso em 20 jun 2023.

OLIVEIRA, S.M.A.C.; VON SPERLING, M. **Avaliação de 166 ETEs em Operação no país, compreendendo diversas tecnologias: Parte 1 - análise de desempenho.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, Minas Gerais, v. 10, n. 4, p.347-357, out. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PAIVA, L.A.L.; HAANDEL, A.C.V.; MOTA, L.S. **Lodo ativado em bateladas sequenciais como opção de pós-tratamento de efluentes de reatores UASB.** Eng Sanit Ambient | v.25 n.2 | mar/abr 2020 | 259-269. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/gB6xW9VQZGfcq7HNpk5HXMf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 14 jan 2023

PEJMAN A. H.; NABI BIDHENDI, G.R.; KARBASS, A.R.; MEHRDAD, N.; ESMAEILI BIDHENDI, M. **Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques.** International Journal Environmental Science and

Techology, 6 (3), 467-476, Summer 2009. Disponível em:
<http://www.bioline.org.br/pdf?st09052>. Acesso em 26 mai 2023.

PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos: estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais**. São Paulo: Edusp, 2001.

PEREIRA, W.S.; MORAIS, G.F.; PY JYUNIOR, D.A.; DORES, L.A.C.B.; CAMPELO, E.L.C.; KELECOM, A.; GONÇALVES, S. **Cluster analysis to evaluate stable chemical elements and physicalchemical parameters behavior on uranium mining waste**. In: 2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011 Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24-28, 2011. Disponível em:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/046/43046408.pdf?r=1. Acesso em 18 jul 2023.

Pernambuco. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos: resumo executivo**. Recife: Seinfra, 2022. 112 p.

PIMENTA, H. C.D.; TORRES, F.R.M.; RODRIGUES, B.S.; ROCHA JÚNIOR, J.M. **O esgoto: a importância do tratamento e as opções tecnológicas**. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Curitiba – PR, 2002. p. 1- 8. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2002_tr104_0458.pdf. Acesso em 16 jun 2023.

Projetec – BRLi. **Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo I – Diagnóstico hidroambiental**. Recife, 2010. 339 p.

REGAZZI, A.J. **Análise multivariada**. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Departamento de Informática. Viçosa: UFV, 2001. 166 p. Apostila de disciplina.

REIS, E. **Estatística multivariada aplicada**. 2ª ed. Lisboa: Sílabo, 2006. 344 p.

RIBEIRO JÚNIOR, R.S. **Desinfecção de efluentes provenientes de estação de tratamento de esgoto com dióxido de cloro**. (dissertação) Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

RIETOW, J.C.; AISSE, M.M.; BARÉA, L.C.; ANDREOLI, C.V.; POSSETTI, G.R.C. **Consolidação da tecnologia de reatores UASB no estado do Paraná para o tratamento de esgotos sanitários**. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 28, e20220298, 2023. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/esa/a/CfB6w5WfDSXVtbV7QshHFbT/?lang=pt>. Acesso em 03 ago 2023.

SANTOS, R.M.S. **Avaliação da qualidade de água e presença de compostos emergente em rios no semiárido Pernambucano.** (dissertação) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2020.

Disponível em:

<https://www.ufpe.br/documents/39810/1355139/DISSERTA%C3%87%C3%83O+Renatha+Michelly+Sabino+dos+Santos.pdf/3c026b8c-8faf-43d4-814d-3e1e1ecd7f55>. Acesso em 25 jan 2023.

SANTOS, S.L.; SIMÕES, J.P.O.; PAIVA, F.V.; VAN HAANDEL, A. **Projeto de otimização de sistemas anaeróbios para tratamento de esgoto em escala unifamiliar.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental | v.23 n.6 | nov/dez 2018 | 1213-1225. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/GTk3yHpMfhczQ8dzGqfhLBz/?lang=pt>. Acesso em 18 jan 2023

SCOTTÁ, J. **Avaliação e otimização de uma estação de tratamento de esgoto com sistema fossa e filtro de um município da Serra Gaúcha.** Monografia. Centro de Ciências Exatas e Tecnologias. Centro Universitário UNIVATES. Lajeado - RS: 2015. Disponível em:

<https://www.univates.br/bdu/items/85569344-69b1-46fd-8a77-9073a4875697>. Acesso em 20 jan 2023.

SILVA, A. E. P.; ANGELIS, C. F.; MACHADO, L. A. T.; WAICHAMAN, A. V. **Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus.** Acta amazônica, v. 38, n. 4, p. 733-742, 2008. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/aa/a/mwHP8HMv955dkZ984LmmGLr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 15 jun 2023.

SILVA, R.M.; SILVA, M.E.R.; FIRMINO, P.I.M.; SANTOS, A.B. **Análise de desempenho e confiabilidade de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos sanitários descentralizadas.** Revista DAE | São Paulo | v. 70, n 234 / pp 78-92 | Jan a Mar, 2022.

Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/69357/1/2022_art_pimfirmينو.pdf. Acesso em 13 jan 2023.

TABACHNICK, B.; FIDELL, L. **Using multivariate statistics.** 6ª ed. New Jersey: Pearson, 2013.

TOLEDO, L. G. DE; NICOLELLA, G. **Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano.** Scientia Agrícola, v.59, p.181-186, 2002. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/sa/a/kpzVhzFFCk3zxFZfVFXPvZG/?lang=pt>. Acesso em 26 mai 2023.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática.** (monografia) Programa de Pós graduação em estatística e modelagem quantitativa. Centro de Ciências naturais e exatas, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/18058>. Acesso em 18 jul 2023.

VOLTOLINI, L.C.; GARAY, D.F.A.; SOUZA, C.F. **Esterilizador ultravioleta em estação de tratamento de esgoto visando reúso agrícola**. Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente, 2021, vol. 11. Disponível em: <https://www.revistacta.ufscar.br/index.php/revistacta/article/view/190/108>. Acesso em 31 jan 2023.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p.

VON SPERLING, M. **Biological wastewater treatment series – volume 5: Activated sludge and aerobic biofilm reactors**. London: IWA Publishing, 2007.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Lodos ativados**. 4. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

XAVIER, J.K.A.M.; OLIVEIRA, M.L.; SILVA, C.M.; ANDRADE, C.C.; LIMA, Y.E.S.P. **Pós-tratamento de efluente de reator UASB em filtro anaeróbio**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 13838-13847 Mar. 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/7868/6822>. Acesso em 18 jan 2023.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. San Diego: Elsevier, 2006. 649p.